

Mesurage de vitesses et débits gazeux en vue de déterminer des flux de polluants canalisés

Revue critique et retours d'expériences



**MESURAGE DE VITESSES ET DEBITS GAZEUX EN VUE DE
DETERMINER DES FLUX DE POLLUANTS CANALISES**

REVUE CRITIQUE ET RETOURS D'EXPERIENCES

RAPPORT FINAL

avril 2017

R. LUCAS – ALCIMED

J. POULLEAU – INERIS

Créée en 1989 à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD – REseau COopératif de Recherche sur les Déchets et l'Environnement – est le fruit d'une triple coopération entre industriels, pouvoirs publics et chercheurs. L'objectif principal de RECORD est le financement et la réalisation d'études et de recherches dans le domaine des déchets et des pollutions industrielles.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et organismes publics) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

Avertissement :

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :
RECORD, Mesurage des vitesses et débits gazeux en vue de déterminer des flux de polluants canalisés. Revue critique et retours d'expérience, 2017, 77 p, n°16-0156/1A
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
www.ademe.fr

© RECORD, 2017

Comité de suivi de l'étude :

Gérard ANTONINI et Bénédicte COUFFIGNAL – RECORD, Neil BRETON – SOLVAY TECHNOLOGY, RESEARCH & PROCUREMENT, Nicolas BRUNEL – SUEZ RV BIOENERGIES, Pascale DARDE – GROUPE TIRU, Emmanuel FIANI – ADEME, Céline GEMISE-FAREAU – SARP INDUSTRIES, Yannick LEBLANC – SOCOTEC

RESUME

Le présent rapport constitue le rapport final de l'étude RECORD n°16-0156/1A relative à la réalisation d'un état de l'art des **techniques de mesurage des vitesses / débits** des effluents gazeux issus de la combustion ou de gaz de process dans les installations de traitement de déchets et de biogaz. Les résultats de l'étude sont présentés en 4 parties :

- ✓ **Rappels théoriques et pratiques sur le mesurage de vitesses et de débits** de flux canalisés : l'objectif est de donner à l'opérateur les clés pour un mesurage fiable, grâce à des explications théoriques accompagnées d'exemples pratiques.
- ✓ **Identification des techniques** : grâce à la bibliographie et aux entretiens réalisés, 18 technologies ont été identifiées pour la caractérisation de vitesses / débits. Cependant, seules 10 d'entre elles sont pertinentes dans le sens où elles sont applicables dans le milieu industriel concerné par cette étude. Cette partie explique les raisons pour lesquelles certaines techniques ont été écartées.
- ✓ **Revue des technologies** : pour chacune de ces 10 techniques, une fiche pratique a été réalisée comprenant : le principe de mesurage, les informations relatives à l'installation, ses avantages et inconvénients, ses principaux domaines d'application, son taux de diffusion en milieu industriel, ses conditions d'utilisation et performances, la qualité de ses mesures, ses coûts et enfin une liste non-exhaustive des principaux fournisseurs de cette solution. Ces fiches pratiques ont été complétées dans la mesure du possible par des retours d'industriels utilisant ces techniques.
- ✓ **Conclusions et comparaison des technologies** : un tableau de synthèse permet aux industriels de comparer les différentes techniques entre elles selon différents critères tels que le type et les paramètres du fluide, le coût, etc. et ainsi de pouvoir choisir au mieux la technique la plus adaptée.

MOTS CLES: VITESSE, DEBIT, VELOCIMETRE, DEBITMETRE, PITOT, ULTRASON A TEMPS DE TRANSIT, MASSIQUE THERMIQUE, ORGANES DEPRIMOGENES, MICRO-VENTURI, CORRELATION LASER, SCINTILLATION LED, CORRELATION INFRAROUGE, EFFET VORTEX, ANEMOMETRE A HELICES, COMPTEURS VOLUMETRIQUES, UTILISATION D'UN TRACEUR (TEMPS DE TRANSIT ET DILUTION), LASER DOPPLER, ELECTROMAGNETIQUE, ROTAMETRE, EFFET CORIOLIS, DEBITMETRE A OSCILLATION

SUMMARY

The present document is the final report of the RECORD study n°16-0156/1A aiming at reviewing the **techniques for flow rate and velocity measurement** of stack flue gases and process gases in incinerators and biogas plants. The results of the study are presented in 4 parts:

- ✓ **Theoretical and operational reminders** on flow rate and velocity measurement of canalized flows: the objective is to give the keys to the operators for a reliable measurement.
- ✓ **Identification of the technologies**: during the bibliographic researches and the conducted interviews, 18 technologies have been identified for flow rate/velocity measurement. Nevertheless, only 10 are relevant for this study; this section explains the reasons of this selection.
- ✓ **Review of the technologies**: for each technology, an ID-card has been created describing: the principle of the measurement, the installation conditions, the benefits vs. the drawbacks of the solution, the main fields of application and typical case-studies if available, the diffusion rate of the solution in the industry, the operating conditions of the technology, the performances of the method, the costs and finally the main suppliers. These ID-cards are a synthesis of the literature review, the suppliers' and the industrial users' feedback.
- ✓ **Technologies comparison**: this section provides a comparison tool for the industrials, using different criteria related to the type of fluid, the environment of the measurement, the cost, etc.

KEY WORDS: VELOCITY, FLOW RATE, VELOCIMETER, FLOW METER, PITOT, ULTRASOUND TRANSIT TIME, THERMAL MASS FLOW, DIFFERENTIAL PRESSURE, MICRO-VENTURI, LASER CORRELATION, LED SCINTILLATION, INFRARED CORRELATION, VORTEX EFFECT, ANEMOMETER, DISPLACEMENTMETER, LASER DOPPLER, ELECTROMAGNETIC, ROTAMETER, CORIOLIS EFFECT, OSCILLATION FLOW METER

SOMMAIRE

A.	Introduction	6
B.	Objectifs et méthodologie	7
1.	Objectifs	7
2.	Méthodologie	7
a.	Etat de l'art des méthodes de mesurage de débits et vitesses des flux gazeux.....	8
b.	Revue des normes en vigueur concernant le mesurage de la vitesse et du débit des effluents gazeux.....	9
c.	Recueil et restitution de retours d'expérience d'utilisateurs industriels de ces différentes méthodes	9
d.	Planning et organisation	9
C.	Rappels théoriques et pratiques sur le mesurage de débits et de vitesses de flux canalisés	10
1.	Fondamentaux de la mécanique des fluides.....	10
a.	Equation d'état des gaz	10
b.	Débit d'un gaz.....	12
c.	Typologie des régimes d'écoulement.....	15
d.	En résumé :	18
2.	Les effluents gazeux : un fluide compressible.....	19
a.	Variation de la viscosité dynamique des gaz en fonction de la température	19
b.	Perte de charges et augmentation de la vitesse	20
3.	Le mesurage de pression	22
4.	Le mesurage de température	23
5.	Le mesurage de composition des gaz.....	25
D.	Identification des techniques	26
1.	Techniques non-retenues.....	26
2.	Techniques identifiées pour le mesurage de gaz de combustion, de biogaz et de gaz de process.....	28
E.	Revue des technologies	29
1.	Définition des termes employés pour la caractérisation des technologies dans les fiches pratiques.....	29
a.	Vélocimétrie et débitmétrie	29
b.	Mesurages mono-point ou moyennée	29
c.	Ponctuelle ou continue	29
d.	Longueurs droites	30
e.	Conditions d'utilisation et performances.....	30
f.	Gammes de mesure	31
g.	Fiabilité opérationnelle.....	32
h.	Facteurs d'influence – mesurages additionnels	33

2. Fiches pratiques	34
F. Conclusions et comparaison des technologies	55
ANNEXES.....	57
1. Reproductibilité	57
2. Contexte normatif	58
a. Norme EN 15 259 : Emissions de sources fixes — Exigences relatives aux sections et aux sites de mesurage et relatives à l'objectif, au plan et au rapport de mesurage	58
b. EN 16911 : Emission de sources fixes – Détermination manuelle et automatique de la vitesse et du débit-volume d'écoulements dans les conduits.....	58
c. Norme EN 14 181 : Emission de sources fixes – Assurances qualité des systèmes automatiques de mesurage (AMS) – Suivi des dispositifs utilisés en auto surveillance	61
d. Exemple de fiche certification QAL 1 – Vélocimètre à ultrasons PCME	62
3. Tube Pitot et anémomètre à hélices – Nombre et positions des points de mesurage.....	63
4. Informations relatives aux Organes Déprimogènes	64
a. Contexte normatif des organes déprimogènes	64
b. Pertes de charges tabulées des organes déprimogènes.....	65
5. Exemples de variations des longueurs droites en fonction du type d'obstacle.....	66
6. Revue des technologies non-retenues.....	67
7. Influence de la composition du fluide sur le mesurage de la vitesse avec un tube Pitot	76

A. Introduction

Pour toute unité industrielle, une meilleure connaissance de ses émissions polluantes passe par une **quantification des flux de polluants gazeux et particulaires**, émis à l'exhaure du process, et non uniquement par la détermination d'une concentration en polluant.

Ces déterminations, quotidiennes, hebdomadaires, voire annuelles, imposent un couplage entre diverses informations quantitatives dont a minima, **la concentration en polluant dans le fluide émis, la vitesse et/ou le débit de ce dernier**. Vitesse et débit sont alors déterminés au niveau des cheminées – après traitement, au même emplacement que les analyseurs de gaz – pour des mesurages de gaz de combustion. Ces problématiques sont aussi d'actualité dans le mesurage **de biogaz et de gaz de process** plus généralement. Les mesurages peuvent être réalisés en plusieurs points du réseau : au niveau des déchets dans les puits de production de biogaz, sur le réseau de transport et encore en amont des équipements de combustion (moteurs thermiques, cogénération, etc.). Dans le cadre de ces mesurages, pression et température sont également nécessaires. Ces mesurages répondent à des **besoins opérationnels** (calcul de rendement, vérification du process, etc.) ou encore des **besoins réglementaires** (en vue de facturation pour le biogaz notamment, ou lorsque des arrêtés préfectoraux ou nationaux l'imposent). Il est intéressant de souligner que le débit volumique est la grandeur la plus utilisée contrairement à la vitesse qui n'est utilisée que plus rarement en milieu industriel.

Les résultats de mesurage dans des conditions particulières où ceux-ci sont réalisés en un seul point avec des écoulements non établis, non symétriques, peuvent s'avérer imprécis. D'autres conditions spécifiques telles que les mesurages dans des fluides chargés peuvent conduire à des résultats peu fiables si les bonnes pratiques ne sont pas mises en œuvre. L'ensemble de la profession s'accorde pour dire que, faute d'appliquer les dispositions particulières qui s'imposent dans ces cas difficiles, les mesures peuvent s'avérer imprécises.

En outre, **la publication de nouvelles normes Européennes – EN 16911 parties 1 et 2 –** a relancé le débat sur ces mesurages puisqu'elles décrivent plusieurs méthodes de référence possibles ainsi que les dispositions pour l'assurance qualité à mettre en place pour les systèmes d'auto surveillance utilisés par les industriels pour le mesurage de débit. Cette norme n'a été publiée que récemment et commencera à être mise en œuvre par les organismes de contrôle en 2017.

B. Objectifs et méthodologie

1. Objectifs

Ce rapport présente un état de l'art des méthodes et des réglementations de mesurage des paramètres de vitesses et débits permettant de remonter de manière fiable aux flux gazeux, et ce, en complément des méthodes de mesurage des teneurs en polluants. L'objectif de ce projet est également d'identifier les bonnes pratiques à mettre en œuvre pour fiabiliser les mesurages de débits et de vitesses des effluents gazeux.

Cette étude a donc pour objectif d'offrir un guide pour les industriels souhaitant réaliser des mesurages de débits des flux de polluants, de biogaz et enfin de gaz de process plus généralement (hors vapeur). Elle ne vise pas à reprendre un à un les éléments des manuels d'utilisation des différents appareils mais à souligner les points de vigilance et les bonnes pratiques pour ces mesurages.

Ce rapport est accompagné d'un fichier Excel à destination des opérateurs, présentant la liste des fournisseurs identifiés et une feuille de calcul des principaux paramètres décrits dans la partie théorique.

2. Méthodologie

Ce guide a été construit en plusieurs étapes :

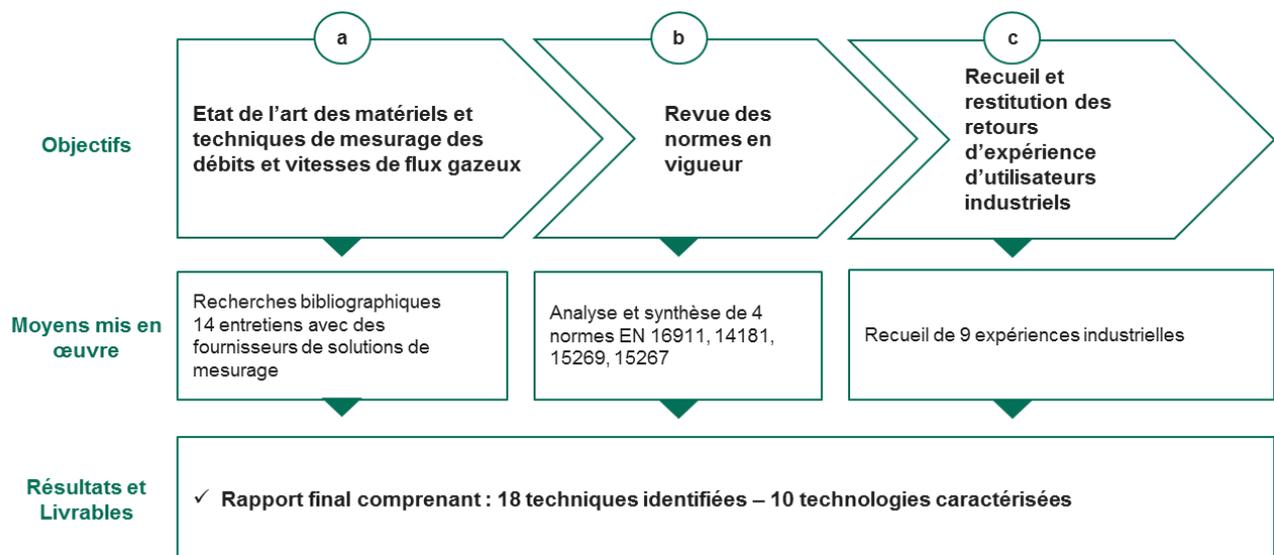


Figure 1 : Méthodologie employée pour l'étude

L'étude porte sur les « flux de polluants gazeux et particulaires émis à l'exhaure des process ». Il a été décidé par le comité de pilotage que le travail couvrirait les techniques pour :

- Le mesurage de débit des gaz de combustion (cheminée), pour pouvoir estimer les émissions et éventuellement se conformer à des réglementations. En effet, dans les prochaines années, la réglementation européenne pourrait fixer plus couramment des valeurs limites exprimées en termes de flux, ce qui s'accompagnera sur certaines installations de l'exigence du contrôle en continu du débit pour la surveillance des rejets atmosphériques. Pour les domaines de l'incinération et des grandes installations de combustion, l'EN 14181 s'appliquerait aussi aux

mesurages de vitesse/débit (cf. en annexe 2 les exigences en termes d'assurance qualité pour les appareils utilisés - certification QAL 1).

- Le mesurage de débit des gaz de process dans les installations de traitement des déchets et de biogaz, pour s'assurer de la bonne régulation des procédés.

a. *Etat de l'art des méthodes de mesurage de débits et vitesses des flux gazeux*

Cette étape a permis d'identifier et de caractériser différentes méthodes de mesurage, elle s'est appuyée sur de multiples moyens (les recherches ont été réalisées en français et en anglais) :

Sites web généralistes	Techniques de mesurages de débits fluides dans l'industrie (Thèse) ¹ ; Support d'enseignement BTS CIRA (contrôle industriel et régulation automatique) ; Mesurages de débit de liquides, gaz et vapeurs ; Techniques de l'ingénieur
Publications scientifiques	27 publications pertinentes recensées depuis 2011
Brevets	300 brevets revus ²
Publications institutionnelles	Guides pratiques sur le mesurage de débits et de vitesses - UK, US, FR : National Physical Laboratory (UK), National Measurement Systems (UK), Environmental Protection Agency (US), Ademe (France)
Best Available Techniques³	Monitoring of emissions from Industrial Emission Directive-installations ⁴ , Waste incineration ⁵
Sites internet et documentations techniques de fournisseurs de solutions	ABB, Codel international, Cole Parmer, Dantec, Delta fluid, Dr. Födish, Durag, Fluid Component international, Fuji Electrics, Hontzsch, Horiba, Itron, Kurz, OSI, OTI industries, PCME, Sick, Siemens, SKI, TSI, Vortek, Yokogawa
14 entretiens téléphoniques avec des fournisseurs de débitmètre et vélocimètre	ABB, Codel international, Deltafluid, Durag, Engineering mesures, ER industries, Fluid component international, Fuji electric, Hontzsch, Kurz, OTI industries, Photo control, Sick, Yokogawa

Figure 2: Principales sources bibliographiques

¹ CHERIGUI Mohamed, *Etude expérimentale des effets d'installation sur les débitmètres à organes déprimogènes utilisés pour le comptage des fluides industriels*, Mémoire de magister en mécanique des fluides appliquée, Oran : Université de Mostaganem, 2003

² Lors de l'analyse des publications et des brevets, la technologie *Scintillation LED* a pu être identifiée. Les autres innovations relevées ne concernaient que l'optimisation de méthodes déjà identifiées via les autres sources.

³ Les BREF (Best available techniques REFERENCE documents) sont les documents techniques établis par la commission européenne et la profession concernée, servant notamment d'outil de référence à l'industriel afin qu'il puisse se positionner par rapport aux meilleures techniques disponibles

⁴ Joint research Centre, *JRC reference Report on Monitoring emission from IED-installation*, "Monitoring of emission to air and water", Institute for prospective technological studies sustainable production and consumption unit, European IPPC Bureau, October 2013

⁵ Integrated pollution prevention and control, *Reference document on the Best Available Technics for Waste Incineration*, European Commission, August 2006

b. Revue des normes en vigueur concernant le mesurage de la vitesse et du débit des effluents gazeux

Cette phase a inclus l'analyse et la synthèse des normes EN 16911⁶, 14181⁷, 15259⁸, 15267⁹ relatives aux matériels, aux méthodes de mesurage, à la qualification et la certification des appareils utilisés ainsi que leur étalonnage et les exigences de performances (incertitudes par exemple). Au cours de cette analyse plusieurs points de vigilance et bonnes pratiques ont pu être identifiés puis contextualisés dans ce rapport.

c. Recueil et restitution de retours d'expérience d'utilisateurs industriels de ces différentes méthodes

9 entretiens, dont 8 en interne avec des membres du réseau RECORD, ont été réalisés pour recueillir les retours d'expérience des utilisateurs industriels.

En plus de permettre d'identifier les bonnes pratiques ces retours d'expérience apportent également des informations sur les performances techniques, sur la fiabilité et la robustesse des appareillages en conditions continues et industrielles, mais aussi sur l'influence de certains paramètres de l'écoulement, etc.

d. Planning et organisation

L'étude s'est déroulée comme suit :

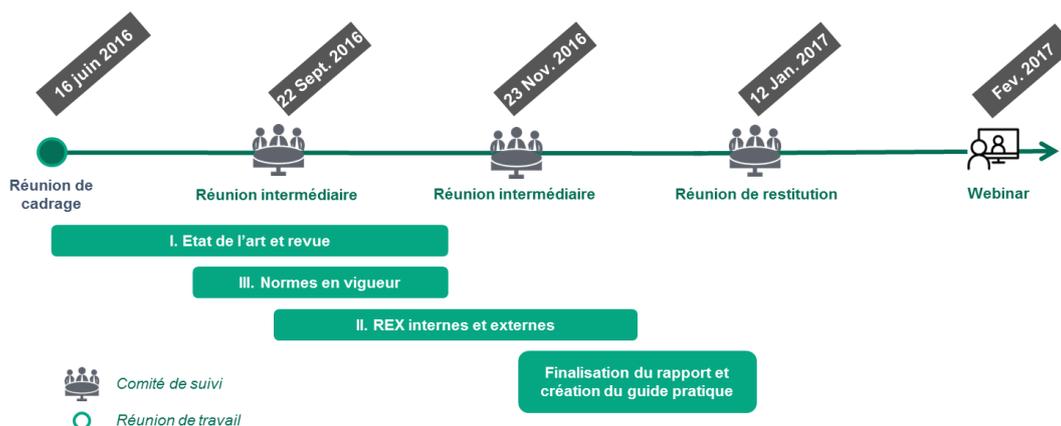


Figure 3 : Planning de l'étude

⁶ EN 16911 : Emissions de sources fixes – Détermination manuelle et automatique de la vitesse et du débit-volume dans les conduits

⁷ EN 14181 : Emission de sources fixes – Assurance qualité des systèmes automatiques de mesurages

⁸ EN 15259 : Qualité de l'air – Mesurage des émissions de sources fixes – Exigences relatives aux sections et aux sites de mesurage et relatives à l'objectif, au plan et au rapport de mesurage

⁹ EN 15267 : Qualité de l'air – Certification des systèmes de mesurage automatisés

C. Rappels théoriques et pratiques sur le mesurage de débits et de vitesses de flux canalisés

En préambule, il est utile de rappeler l'utilisation des conditions normales de température et de pression (notées N devant les unités ou bien X^0 pour les grandeurs physiques). Il s'agit des conditions de mesurages pour lesquelles la température et la pression sont fixées, respectivement à pression atmosphérique ($P^0 = 1,013\ 105\ \text{Pa}$) et à $0\ ^\circ\text{C}$ ($T^0 = 273\ \text{K}$). Ainsi, on parlera plus généralement de Nm^3/h plutôt que de m^3/h . Plus rarement, on pourra trouver la notion de conditions standards pour lesquelles la pression est la pression atmosphérique mais la température est prise à $25\ ^\circ\text{C}$.

1. Fondamentaux de la mécanique des fluides

Dans cette section, les principes fondamentaux de la mécanique des fluides utilisés dans le mesurage de vitesses et de débits sont rappelés. L'influence des différents paramètres physiques entre eux, et notamment sur le calcul du débit, sera également mise en avant.

a. Equation d'état des gaz

L'équation d'état des gaz est la relation qui permet de relier sa température T , sa pression P , son volume V ainsi que son nombre de particules n :

$$Pv = nRT \quad \text{Eq. 1}$$

Où P s'exprime en Pa, v en m^3 , n en mol, T en Kelvin, et enfin R est la constante des gaz parfaits ($R = 8.314\ \text{J/mol/K}$).

On pose généralement la grandeur r , définie par : $r = \frac{R}{M}$ où M est la masse molaire du gaz (exprimée en g ou kg par mol). Ainsi l'équation d'état s'exprime aussi sous la forme suivante :

$$P = \rho r T = \rho \frac{R}{M} T \quad \text{Eq. 2}$$

i. Le volume molaire V_m

Il s'agit du volume occupé par une mole de gaz, noté V_m .

A partir de l'équation (1), on peut en déduire la relation suivante :

$$V_m = 0.0224\ \text{Nm}^3/\text{mol} \quad \text{Eq. 3}$$

Cette valeur est valable quelle que soit la nature du gaz.

ii. La masse volumique ρ

Il s'agit de la masse d'une unité volumique de gaz, notée ρ , s'exprimant en kg/m^3 .

A partir de l'équation (1), on peut déduire :

$$\rho = \frac{P}{rT} = \frac{P M}{RT} \quad \text{Eq. 4}$$

Comme souligné dans le préambule, de nombreuses données s'expriment aux conditions normales de température et de pression, il est donc impératif de pouvoir traduire les données mesurées à pression et température du processus industriel (appelées conditions vraies) aux expressions aux conditions normales.

En utilisant l'équation (1), il vient :

$$\rho(P, T) = \rho^0 \left(\frac{P(T)}{P^0} \right) \left(\frac{T^0}{T} \right) \quad (2) \quad \text{Eq. 5}$$

Il est important de noter que l'accès à la valeur de ρ^0 nécessite la connaissance de la composition du gaz (O_2 , CO_2 , N_2 , H_2O , etc. car il s'agit rarement de gaz purs) et plus particulièrement de la fraction volumique de chacun de ses composants et de leur masse volumique respective afin d'en faire la moyenne pondérée et ainsi obtenir la masse molaire du fluide. On utilise donc :

$$\rho(P, T) = \frac{P M}{RT} \quad \text{où } M = 10^{-2} \sum \%X M_X \quad \text{Eq. 6}$$

Où %X est la teneur en composant X du flux de gaz en pourcentage volumique (aussi appelée fraction volumique) sur gaz humide et M_X sa masse volumique (exprimée en kg/mol).

On ne considère généralement que les espèces suivantes : O_2 , CO_2 , H_2O et N_2 (qui peut être déterminé à partir des espèces précédentes : $\%N_2 = 100 - (\%O_2) - (\%CO_2) - (\%H_2O)$). La masse molaire M du gaz devient alors :

$$M = 10^{-5} (32 (\%O_2) + 44 (\%CO_2) + 18 (\%H_2O) + 28 (100 - (\%O_2) - (\%CO_2) - (\%H_2O))) \quad \text{Eq. 7}$$



Illustration : Influence de la température sur la masse volumique ρ

Par exemple, pour un gaz composé uniquement d'air, pour un passage de la température de 120 °C à 140 °C, la masse volumique du gaz diminuera de 0,898 kg/m³ pour 120 °C à 0,854 kg/m³ pour 140 °C. **Dans ce cas, une augmentation de 17% de la température induit une diminution de 5% de la masse volumique.**

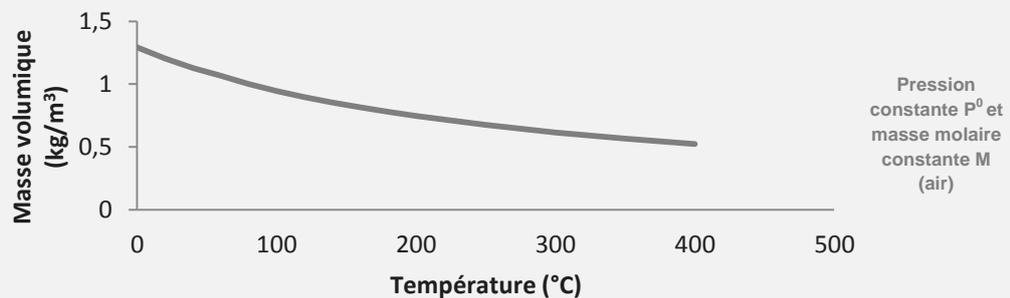


Figure 4 : Evolution de la masse volumique en fonction de la température pour un gaz uniquement composé d'air



A noter :

- ✓ L'effet de la pression et de la température sur la valeur de ρ est non négligeable.

b. Débit d'un gaz

Un débit permet d'exprimer le flux d'une quantité relative à une unité de temps à travers une surface quelconque. Il peut également être défini comme le volume de fluide écoulé divisé par le temps de passage (Cf. ANNEXE 5 – Utilisation d'un traceur – Temps de séjour). Enfin, le débit volumique d'effluents gazeux post combustion, comme l'incinération de déchets, peut être calculé à partir des données relatives au combustible, à la combustion et à la production énergétique issue de cette combustion (Cf. ANNEXE 5 – Méthode de calcul de débit par consommation d'énergie).

i. Débit volumique

Le débit volumique relie directement la vitesse du fluide à la section dans laquelle se trouve l'écoulement.

Il s'exprime de la manière suivante :

$$Q_v = \langle v \rangle A \quad \text{Eq. 8}$$

Où $\langle v \rangle$ représente la vitesse moyenne débitante sur la section et A l'aire de la section droite de passage du fluide.

On peut également utiliser la notion de diamètre hydraulique D_h qui permet de calculer une surface de forme quelconque. Il est défini comme suit :

$$D_h = \frac{4 A}{L} \quad \text{Eq. 9}$$

Où A est l'aire de la section droite de passage du fluide et L le périmètre mouillé c'est-à-dire la partie du périmètre de la section avec lequel le fluide est en contact (dans notre domaine d'étude on prendra toujours le périmètre total de la section).

Ainsi, il vient :

$$Q_v = \langle v \rangle \pi \left(\frac{D_h}{2} \right)^2 \quad \text{Eq. 10}$$



A noter :

- ✓ Dans le cas d'une conduite circulaire, D_h correspond au diamètre **interne** de la conduite.

ii. Débit massique

On définit, dans un premier temps, le débit massique \dot{m} exprimé en kg/h (ou tonnes/h) :

$$\dot{m} = \rho^0 Q_v^0 \quad \text{Eq. 11}$$

Où Q_v^0 représente le débit volumique aux conditions normales ; il s'exprime en Nm^3/h .

Il est important de souligner que le débit massique obéit à une loi de conservation. Ainsi, la relation suivante apparaît :

$$\dot{m} = \rho^0 Q_v^0 = \rho(P, T) Q_v(P, T) \quad \text{Eq. 12}$$

Des équations précédentes, il vient :

$$\dot{m} = \rho^0 Q_v^0 = \rho(P, T) Q_v(P, T) = \rho^0 \left(\frac{P(T)}{P^0} \right) \left(\frac{T^0}{T} \right) < v > A \quad \text{Eq. 13}$$

La formule (13) illustre le fait que le débit massique est inversement proportionnel à la température.



Illustration : Influence de la température sur le débit massique

Par exemple, pour un gaz composé uniquement d'air, ayant une température de 120 °C, une vitesse d'écoulement de 10 m/s, circulant dans une conduite circulaire de diamètre hydraulique 1m, à pression atmosphérique, le débit massique de l'écoulement est de 7,05 kg/s soit 25,4 tonnes/h. **Le passage de la température de 120 °C à 140 °C diminue le débit massique de 5% (6,7 kg/s soit 24 tonnes/h).**

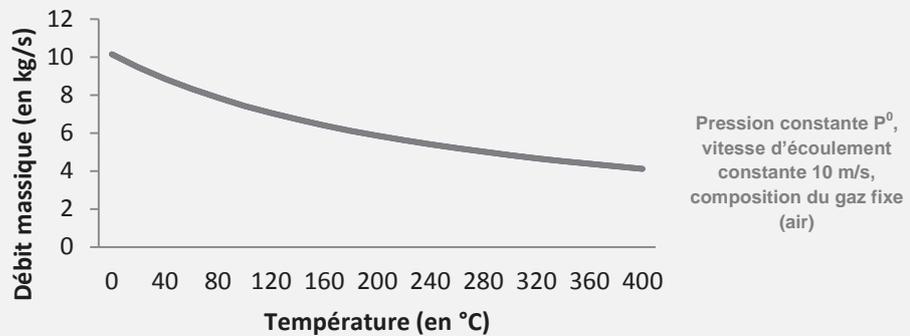


Figure 5 : Evolution du débit massique en fonction la température pour un écoulement composé d'air uniquement, ayant pour vitesse moyenne 10 m/s, dans une conduite circulaire de diamètre 1 mètre.

Une modification de la composition du gaz impacte aussi directement la valeur de la masse volumique ρ^0 de l'écoulement. L'équation (13) illustre l'influence directe de la composition du gaz sur le débit massique puisqu'elle nous montre que ces deux paramètres, le débit massique et la masse volumique ρ^0 du gaz, sont proportionnels.



Illustration : Influence de la composition du gaz sur le débit massique

Par exemple, pour un gaz composé uniquement d'air, ayant une température de 120 °C, une vitesse d'écoulement de 10 m/s, circulant dans une conduite circulaire de diamètre hydraulique 1m, à pression atmosphérique, le débit massique de l'écoulement est de 7.05 kg/s soit 25.4 tonnes/h. **Une modification de 10% de la masse volumique (et donc de la composition du gaz) aura pour impact une modification de 10% du débit massique.**

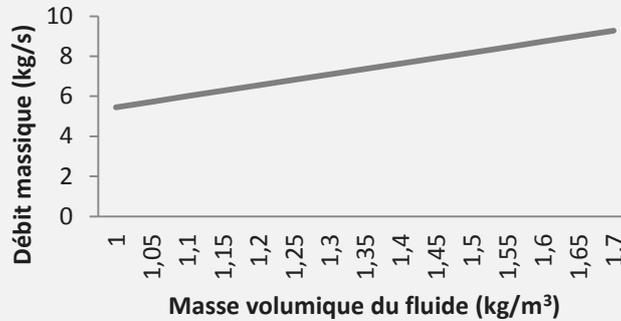


Figure 6 : Evolution du débit massique en fonction la valeur de la masse volumique pour un écoulement ayant pour vitesse moyenne 10 m/s, dans une conduite circulaire de diamètre 1 mètre.



A noter :

- ✓ Le mesurage du débit massique dans un écoulement est exprimé bien souvent aux conditions réelles ; ainsi il est indispensable d'utiliser la valeur de la masse volumique $\rho(P,T)$ aux conditions réelles, qui nécessite le mesurage de la pression P et de la température T ainsi que la composition du gaz.

iii. Débit aux conditions normales sur gaz sec à teneur en oxygène de référence

En outre, il est courant¹⁰ d'exprimer le débit volumique aux conditions normales mais aussi **sur gaz sec et à teneur en oxygène de référence (11%)**. Le débit s'exprime alors comme suit :

$$Q_{v,sec,O_2 ref}^0 = Q_v \frac{P}{P^0} \frac{T^0}{T} \frac{100 - \%H_2O}{100} \frac{20.9 - \%O_2}{20.9 - \%O_{2 ref}} \quad \text{Eq. 14}$$

Où Q_v est le débit volumique aux conditions vraies, P^0 et T^0 les valeurs de pression et température aux conditions normales, $\%H_2O$ l'humidité du gaz aux conditions vraies (c'est-à-dire le pourcentage volumique de teneur en eau du gaz), $\%O_2$ est la concentration en oxygène mesurée dans le conduit pendant le mesurage (% volumique sur gaz sec) et $\%O_{2 ref}$ la concentration en oxygène de référence (exprimée en pourcentage volumique et souvent prise égale à 11%).

¹⁰ FNADE – ADEME, Guide d'aide à la déclaration des rejets annuels de polluants dans l'eau, l'air, les déchets et les sols à destination des exploitants d'installation d'incinération de déchets non dangereux et de déchets d'activités de soins à risques infectieux, Version 2, Octobre 2006

c. Typologie des régimes d'écoulement

On définit deux régimes principaux d'écoulement dans une section : le régime laminaire et le régime turbulent. Le nombre de Reynolds (noté Re et sans dimension) permet de caractériser ces derniers. Il est défini par l'expression suivante :

$$Re = \frac{D_h \langle v(P, T) \rangle}{\mu(P, T)} \rho(P, T) \quad \text{Eq. 15}$$

Où μ désigne la viscosité dynamique du fluide s'exprimant en PI (Poiseuille ou Pa.s), ρ sa masse volumique (en kg/m^3).

i. Régime laminaire : $Re < 2100$

Un écoulement est dit laminaire lorsque son nombre de Reynolds est inférieur à 2100.

Face à ce type d'écoulement, il est important de noter que la vitesse suit un profil bien particulier où la vitesse maximale (au centre de l'écoulement) correspond au double de la vitesse moyenne débitante (utilisée pour le calcul de débit). Cette caractéristique induit fréquemment des erreurs dans l'utilisation des tubes Pitot par exemple.

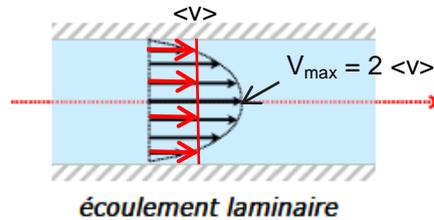


Figure 7 : Profil de vitesse en écoulement laminaire

ii. Régime turbulent : $Re > 10^4$

Un écoulement est dit turbulent lorsque son nombre de Reynolds est **supérieur à 10^4** .

Ce type d'écoulement présente un profil de vitesse « en bouchon » moins propice aux erreurs de mesurages, puisque que la vitesse est quasi uniforme sur l'ensemble de la section (excepté dans la couche limite).

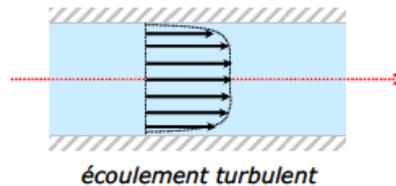


Figure 8 : Profil des vitesses en écoulement turbulent



Illustration : Calcul du nombre de Reynolds d'un écoulement

Prenons par exemple, le cas de l'écoulement d'air à 120°C , dans une conduite circulaire d'1 mètre de diamètre, ayant une vitesse de 10 m/s, le nombre de Reynolds est de 390 000 : il s'agit donc d'un écoulement turbulent.



A noter :

- ✓ Dans le cas d'un régime turbulent ayant un profil stable et développé, le point du profil des vitesses ayant pour valeur la vitesse moyenne se situe à une distance du bord du conduit située à 12% du diamètre ou encore à 25 % du rayon (source : EN 16911-2).
- ✓ Lors du mesurage de la vitesse, il est important de bien connaître le régime de l'écoulement afin d'adapter le positionnement de la sonde ainsi que le calcul de la vitesse moyenne débitante en vue d'obtenir le débit. Néanmoins, pour la caractérisation de biogaz ou encore des rejets de polluants après combustion, le régime de l'écoulement est a priori toujours turbulent, étant donné les paramètres habituels de ces types de flux.

iii. Longueur d'établissement (ou d'entrée) d'un régime établi

Pour un régime turbulent, la longueur nécessaire à l'établissement d'un régime établi pour un écoulement dans une conduite circulaire, c'est-à-dire la longueur nécessaire pour que l'écoulement développe pleinement son profil (profil symétrique, sans giration et homogène comme décrit ci-dessus) peut être approximée à l'aide de la corrélation ci-dessous :

$$L_e = 0.63 D_h Re^{0.25} \quad \text{Eq. 16}$$

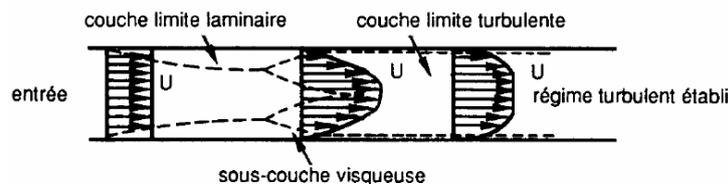


Figure 9 : Longueur d'établissement d'un régime établi

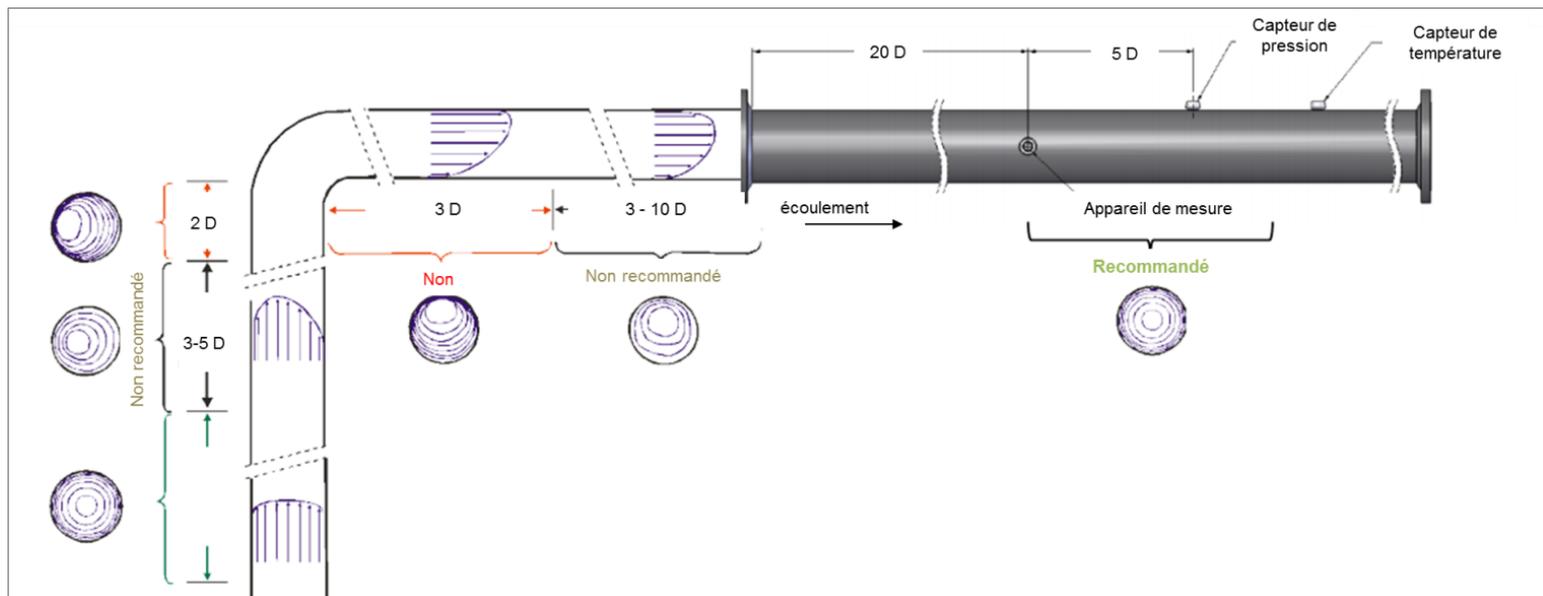


Figure 10 : Evolution du profil des vitesses après un coude à 90°C, source : Photocontrol, Optical gas flow meter (la position du capteur de pression sur ce schéma n'est pas systématique puisqu'il est souvent conseillé de positionner le capteur de pression en amont de l'appareil de mesure pour éviter une chute de pression, voir [E.1.h](#))

Pour un régime laminaire, la relation suivante peut être utilisée :

$$L_e = 0,06 D_h Re \quad \text{Eq. 17}$$

Ainsi, il apparait ici clairement que pour avoir un profil bien établi il est nécessaire d'avoir une certaine longueur droite en amont. Une longueur droite en aval est aussi indispensable pour ne pas venir perturber l'écoulement.



A noter :

Pour les instruments de mesure nécessitant un profil établi, on pourra prendre la référence de la norme EN 16911-2 préconisant une distance de $25 D_h$ en amont et $5 D_h$ en aval.

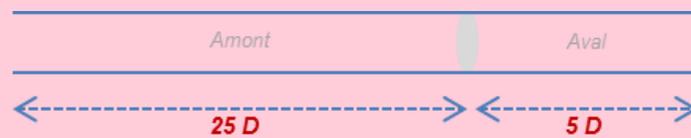


Figure 11 : Longueurs droites et profil des vitesses établi

Cependant, il convient de prendre un compte les informations fournies par le constructeur. Enfin, les résultats des cartographies des écoulements effectuées pour les pré-études des normes EN-16991-1 (mesures QAL 2 pour le choix de l'emplacement de l'AMS pour la mesure de débit et validation de la représentativité du point de mesure) et EN-15259 (étude d'essai d'homogénéité pour l'ensemble des systèmes de mesurage des émissions de sources fixes) peuvent réduire ces longueurs droites

Les longueurs droites peuvent également varier en fonction du type d'éléments en amont (exemple ANNEXE 4).

d. En résumé :

1- Pour calculer la masse volumique du gaz aux conditions vraies $\rho(P,T)$, il faut :

- Connaître la composition du gaz (nature et fraction volumique des différents composants) puis calculer la masse volumique du gaz (somme pondérée des masses volumiques de chacun des composants) aux conditions normales ρ^0
- Mesurer la température T et la pression P
- Puis utiliser : $\rho(P,T) = \rho^0 \left(\frac{P(T)}{P^0}\right) \left(\frac{T^0}{T}\right)$ (Eq.4)

2- Pour calculer le débit volumique Q_v , il faut :

- Déterminer le nombre de Reynolds Re pour bien choisir sa technique et les calculs à effectuer pour avoir accès à la vitesse moyenne débitante $\langle v \rangle$
- Déterminer la section A
- Puis utiliser : $Q_v = \langle v \rangle A$ (Eq.8)

3- Si cela est nécessaire, pour calculer le débit massique \dot{m} , on utilise les deux paramètres ci-dessus :

$$\dot{m} = \rho^0 Q_v^0 = \rho(P,T) Q_v(P,T) \text{ (Eq. 12)}$$

4- Finalement, on calcule le débit volumique aux conditions normales, sur gaz sec et à teneur en oxygène de référence :

$$Q_{v,sec,O_2 \text{ ref}}^0 = Q_v \frac{P}{P^0} \frac{T^0}{T} \frac{100 - \%H_2O}{100} \frac{20.9 - \%O_2}{20.9 - \%O_{2 \text{ ref}}} \text{ (Eq. 14)}$$

2. Les effluents gazeux : un fluide compressible

Généralement, la théorie hydraulique (théorie des liquides) est la plus connue et la plus utilisée. Cependant, dans le cas d'étude d'effluents gazeux, cette théorie a ses limites : elle traite de fluides non-compressibles (ayant une masse volumique ρ constante) alors que cela est remis en cause lorsqu'il est question de gaz.

a. Variation de la viscosité dynamique des gaz en fonction de la température

La définition du nombre de Reynolds reste valable en compressible. Il est défini par :

$$Re = \frac{D_h \langle v \rangle}{\mu} \rho = \frac{D_h G}{\mu} \quad \text{Eq. 15}$$

Où G représente la quantité de mouvement et est définie comme le produit de la masse volumique et de la vitesse :

$$\rho \langle v \rangle = G \quad \text{Eq. 18}$$

On peut souligner que la viscosité dynamique d'un gaz μ augmente avec la température. Ainsi, lorsque la température augmente, μ augmente lui aussi, diminuant alors la valeur du nombre de Reynolds Re ; ce qui signifie que l'écoulement est de moins en moins turbulent.

Typiquement, pour les gaz, la viscosité dynamique augmente d'environ 2 à $5 \cdot 10^{-8}$ Pa.s par degré d'élévation de T .¹¹

¹¹ La loi de Sutherland relie la viscosité dynamique à la température selon la relation suivante :

$$\mu(T) = \mu_0 * \left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/2} \frac{T_0 + S}{T + S} \quad \text{Eq. 19}$$

Où μ_0 vaut $\mu(T_0)$ et S est appelée la température de Sutherland et est prise à 110.4 K dans le cas de l'air.



Illustration : Influence de la température sur le nombre de Reynolds Re

Si on considère un gaz composé d'air, ayant pour vitesse 10 m/s, s'écoulant dans une section de diamètre d'1m, pour **un changement de température de 120 à 140 °C**, sa viscosité dynamique aura augmenté de 3.5% passant de $2,30.10^{-5}$ Pa.s à $2,38.10^{-5}$ Pa.s⁴. En outre, sa masse volumique ρ diminuera avec la température pour passer de 0.898 à 0.854 kg/m³.

Ainsi, **le nombre de Reynolds passera de 390.10^3 à 358.10^3 , soit une diminution de 8%**, en prenant en compte les effets de la température sur la viscosité dynamique μ et la masse volumique ρ . On reste dans un régime turbulent ($Re > 10^4$) dans ce cas.

Prenons en considération des conditions extrêmes (dans le cadre de mesurage d'effluents gazeux en cheminée) afin de vérifier que le régime demeure turbulent dans tous les cas. Pour une température de 250 °C, un diamètre de 0.5 m, une vitesse de 3 m/s, le nombre de Reynolds est de $3,60.10^4$: on reste encore largement dans un régime turbulent bien que les conditions soient extrêmes pour des mesures d'effluents gazeux.

Prenons le cas du transport de biogaz (modélisé par 100% de CH₄), s'écoulant dans une conduite circulaire de diamètre 80 mm à 50°C à 10 m/s. On obtient alors un nombre de Reynolds de $4,35.10^4$. On est donc en régime turbulent.



A noter :

- ✓ On considérera que le régime est **turbulent** pour les conditions que l'on trouve dans les écoulements d'effluents gazeux en cheminées.
- ✓ On considérera que le régime est **turbulent** pour les conditions que l'on trouve dans le transport de biogaz.

b. Perte de charges et augmentation de la vitesse

Pour un fluide compressible, la quantité de mouvement (produit de la masse volumique ρ et de la vitesse $\langle v \rangle$) se conserve :

$$\rho \langle v \rangle = G \text{ où } G \text{ est une constante (4)} \quad \text{Eq. 18}$$

De plus, la relation suivante s'applique également aux fluides compressibles :

$$\frac{P}{\rho} = \text{Constante (5)} \quad \text{Eq. 20}$$

Une attention toute particulière doit être apportée aux conséquences des pertes de charges sur la vitesse dans le cas de fluides compressibles.

Effectivement, les pertes de charge se traduisent par une diminution de la pression. Or d'après l'équation (20), cela entraîne une diminution de la masse volumique qui implique, en utilisant la relation (18) une augmentation de la vitesse (contrairement aux fluides incompressibles).

$$\searrow P \rightarrow \searrow \rho \rightarrow \nearrow \langle v \rangle$$

En outre, il est possible de démontrer que cette perte de pression est reliée à la vitesse selon la relation suivante dite équation de Darcy-Weisbach :

$$\Delta P = 2 f_f \frac{1}{\rho} \left(\frac{L}{D}\right) G^2 = 2 f_f \rho_{\text{amont}} \left(\frac{L}{D}\right) \langle v \rangle^2 \quad \text{Eq. 21}$$

Où f est le facteur de frottement de Fanning (on prendra la corrélation de Hagen-Poiseuille pour les régimes laminaires : $f_f = \frac{16}{Re}$ (Eq. 22) et la corrélation de Blasius $f_f = 0.079 Re^{-0.25}$ (Eq. 23) pour les régimes turbulents), ρ la masse volumique en amont de la perte de charge, L la longueur sur laquelle on considère les pertes de charge, $\langle v \rangle$ la perte de vitesse de l'écoulement en amont et en aval de L et D le diamètre hydraulique.



Illustration : Calcul des pertes de charge sur un écoulement

Par exemple, pour un écoulement d'air s'écoulant à 10 m/s dans une conduite circulaire de diamètre hydraulique d'1 mètre, à 120 °C, à pression atmosphérique, le nombre de Reynolds est 390 000, il s'agit donc d'un écoulement turbulent.

On utilise donc la corrélation de Blasius : $f = 0,079 Re^{-0.25}$. Ainsi dans notre cas, on obtient $f = 0,00316$.

De plus, la masse volumique du fluide est celle de l'air à 120 °C soit 0.898 kg/m³ (cf. Figure C.1 .ii.1).

Ainsi, on obtient les pertes de charges suivantes sur 10 m :

$$\Delta P = 2 f \rho_{\text{amont}} \left(\frac{L}{D}\right) v^2 = 2 \times 0,00316 \times 0,898 \times \frac{10}{1} \times 10^2 = 5,67 \text{ Pa}$$

Sur 10 mètres de conduite, l'écoulement a perdu un peu moins de 6 Pa soit 0,006 % de sa pression initiale (pression atmosphérique) soit une vitesse de 10,61 m/s : la vitesse subit une augmentation de 6%.

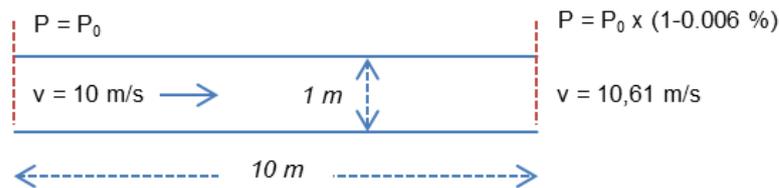


Figure 12 : Illustration du calcul des pertes de charge sur un écoulement



A noter :

- ✓ En régime compressible, les pertes de charges se traduisent par une augmentation de la vitesse.

3. Le mesurage de pression

Comme il a été souligné auparavant et comme il apparaîtra par la suite dans certaines méthodes de mesurage de débit, le mesurage de la pression est un point crucial. Il existe différents types de capteurs de pression ou manomètres, que l'on rappelle ci-dessous avec les différents critères de choix associés.

Principe	Type	Sous-type	Critère
Colonne de liquid	Manomètre à tube en U		<ul style="list-style-type: none"> - Indicateur - Faibles pressions
	Manomètre à tube incliné		<ul style="list-style-type: none"> - Mesurages de très faibles pressions - Plus grande précision que le tube en U
Déformation de solide	Manomètre à tube de Bourdon		<ul style="list-style-type: none"> - Indicateur à aiguille - Peut fonctionner en déprimomètre (instrument destiné au mesurage de différences de pression)
	Manomètre à soufflet		<ul style="list-style-type: none"> - Mesurages de pression atmosphérique jusqu'à des pressions de 25 bars avec une bonne précision
	Manomètre à membrane	Capteur à jauge de contrainte	<ul style="list-style-type: none"> - Délivre un signal analogique en fonction de la déformation de la jauge sous la pression - Le traitement d'un signal analogique faible ainsi que l'influence de la température augmentent la complexité ainsi que le coût de cette technologie
		Capteur à transformation différentielle	<ul style="list-style-type: none"> - Mesurage d'une pression différentielle à l'aide des courants induits par le déplacement d'une membrane entre deux chambres - Robuste et exact (>99%) - Il n'est pas conseillé pour les variations trop rapides de pression (quelques Hz)
	Capteur à effet capacitif	<ul style="list-style-type: none"> - La capacité électrique varie en fonction de la déformation de la membrane - Il est utilisé pour des mesurages de faibles pressions - Il possède un temps de réponse très faible 	
Piézo-électrique	Capteur piézo-électrique		<ul style="list-style-type: none"> - La pression appliquée au quartz génère une tension électrique proportionnelle à la déformation du matériau - Il possède un temps de réponse très rapide - Il est peu sensible (quelques millibars) - Il a un avantage en termes de coût pour des pressions > 100 mbar

Tableau 1: Typologie des capteurs de pression

4. Le mesurage de température

Comme il a été souligné auparavant et comme il apparaîtra par la suite dans certaines méthodes de mesurage de débit, le mesurage de la température est un point crucial. Il existe différents types de capteurs de température, que l'on rappelle ci-dessous avec les différents critères de choix associés.

Principe	Description	Sous-type	Critère
Thermocouple	Le principe de fonctionnement du thermocouple repose principalement sur l'effet Seebeck. Lorsque deux métaux différents sont réunis pour former un circuit fermé et que les deux extrémités de ce circuit sont soumises à une différence de température, un courant s'établit ce qui aboutit à une différence de potentiel dépendant uniquement de la nature des deux métaux et de la différence de température.	<p>T : Cu / Cu-Ni</p> <p>J : Fe / Cu-Ni</p> <p>E : Ni-Cr / Cu-Ni</p> <p>K : Ni-Cr / Ni-Al</p> <p>S et R: Pt-Rh / Pt</p> <p>B : Pt -Rh / Pt - Rh</p> <p>N : Ni-Cr-Si / Ni-Si</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Pour chacun des types (T, J, E, K, S, R, B et N) la gamme de température varie de -270 à 1800 °C. La plus petite gamme de température est celle du type T allant de -270 à 400 °C. - Les principaux avantages du thermocouple sont : un temps de réponse très court, un faible encombrement. - Ses principaux inconvénients sont : une réponse non-linéaire, une sensibilité moyenne, la nécessité d'un point de mesurage référence pour les mesurages absolus. - Son prix varie de 20 à 100 €.
Sonde à résistance (RTD)	Le principe de mesurage des sondes à résistance repose sur la variation de résistance de fils métalliques en fonction de la température.	<p>Résistance métallique</p> <p>Résistance semi-conductrice (dont les diodes)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Les résistances sont généralement constituées de platine (sonde Pt 100 ou TRPI : Thermomètre à résistance de platine industriel). - Les gammes de température peuvent aller de -250 à 630 °C. - Ses principaux avantages sont : une grande sensibilité, une bonne stabilité dans le temps, une faible incertitude de mesure (reproductibilité : 0.05 - 0.1 °C, exactitude, 0.15 + 0.002 T ou 0.03 + 0.005 T). - Ses principaux inconvénients sont : un temps de réponse relativement long (en fonction des paramètres de la sonde), une attention particulière concernant les chocs mécaniques et thermiques. - Son prix se situe autour de 100 €.

Tableau 2 : Typologie des capteurs de pression

De nombreux appareils de mesure de débits et de vitesses possèdent leur propre système de mesure de température et de pression absolue. Il s'agit bien souvent de capteurs optionnels, les données récoltées (P,T et $\langle v \rangle$) sont alors transmises à une centrale d'évaluation qui effectue les calculs afin d'obtenir le débit volumique aux conditions normales Q_v^0 . Le débit massique \dot{m} n'est généralement pas calculé directement par l'appareil de mesure (sauf pour les débitmètres massiques thermique et effet Coriolis).

On peut donc choisir d'obtenir directement une valeur de vitesse ou de débit (si l'appareil réalise directement le calcul – après avoir entré la valeur de la section de mesure) aux conditions normales (Nm/s ou Nm³/s).

Voici quelques exemples, de sondes de température intégrées sur les instruments typiques de mesure de vitesse :

Appareil	Mesurage de température intégré
Tube Pitot	Mesurage de température et de pression absolue, optionnelles : Horiba, SKI Mesurage tout intégré : sonde RTD pour Dr Födish
Vélocimètre à ultrasons	Mesurage de température et de pression absolue, optionnel : Durag
Vélocimètre à effet Vortex	Mesurage de température et de pression absolue, optionnels : Hontzsch

Tableau 3 : Exemples d'appareil de mesurages de vitesse / débit avec sondes de température intégrées

5. Le mesurage de composition des gaz

L'analyse de la composition des gaz permet d'avoir ensuite accès à la masse volumique du fluide étudié, donnée indispensable pour le calcul du débit massique des fumées.

Technique	Type de prélèvement	NOx	SO ₂	CO	CO ₂	O ₂	NH ₃	HCl	HF	COVT
Absorption IR	Extractif ou in-situ	✓	✓	EN 15058 SRM	•		•	•	•	•
IR Gas Filter Correlation (GFC)	Extractif ou in-situ	•	•	•	•		•			
FTIR	Extractif	•	•	•	•		•	•	•	COV spécifiques
Spectroscopie photo-acoustique	Extractif	•	•	•	•		•	•	•	
Tunable laser diode (TLD)	Extractif ou in-situ	•	•	•	•			•	•	
Absorption UV	Extractif ou in-situ	•	•							•
Fluorescence UV	Extractif		•				•			
DOAS	Extractif ou in-situ	•	•	•	•			•	•	
Chimiluminescence	Extractif	EN 14792 SRM					•			
Ionisation de flamme	Extractif						•			EN 12619 SRM
Sonde Zircône	In-situ					•				
Paramagnétisme	Extractif					EN 14789 SRM	•			
Electrochimie	Extractif	•	•	•	•	•	•	•	•	

Tableau 4 : Principales méthodes de mesurage des composés gazeux atmosphériques courants¹²

Les mesurages ne sont pas toujours effectués en temps réel, les fumées peuvent être échantillonnées et analysées en différé.

¹² Etude RECORD sur le sujet : 13-0149/1A || SRM = Méthode de référence normalisée

D. Identification des techniques

Au cours de cette étude, 18 techniques ont été identifiées dont 10 ont été retenues pour les mesurages de gaz de combustion (cheminée), de biogaz et de process.

1. Techniques non-retenues

Parmi les 18 techniques identifiées, 8 ont été considérées comme non pertinentes dans le cadre de cette étude, pour les raisons détaillées dans le tableau ci-dessous, et n'ont donc pas fait l'objet d'une fiche descriptive détaillée. Cependant, ces techniques peuvent être utilisées dans d'autres cas particuliers ; leur principe et leurs domaines d'application sont décrits en Annexe 6¹³.

Technologies non-retenues	Inadaptées aux mesurages définis dans cette étude
Compteurs volumétriques ou débitmètres à déplacement positif	Les mesurages de polluants ou bien de biogaz humides et chargés ne peuvent pas être envisagés car les particules et l'humidité ne sont pas compatibles avec les pièces en mouvement (pistons, palettes ou encore engrenages) de ces débitmètres. Lorsqu'elle est employée avec des gaz, cette méthode est utilisée sur des gaz propres, pour le mesurage de faibles débits d'alimentation des chaudières domestiques, par exemple.
Utilisation d'un traceur – Temps de séjour ou Dilution	Ces 2 méthodes sont utilisées pour des étalonnages ou bien des mesurages périodiques de la vitesse moyenne dans un conduit. Aucune solution de mesurage continue basée sur ce principe n'a été identifiée à ce jour.
PIV – Particle Image Velocimetry	La vélocimétrie à image de particules est réservée aux usages scientifiques de laboratoire puisqu'elle nécessite des composants d'optique, de mécanique, de traitement du signal, d'analyse des données de qualité qui en font un appareil très coûteux, encombrant et difficile à mettre en œuvre industriellement.

¹³ La technologie *Organes déprimogènes à oscillations* est également en ANNEXE 6, contrairement aux 8 technologies non-retenues. En effet elle peut être envisagée pour des mesures de débits gazeux mais ses caractéristiques étant similaires à celles de la fiche *Organes déprimogènes*, seuls ses critères de différenciation ont été soulignés.

<p>Vélocimétrie Laser Doppler</p>	<p>Le vélocimètre Laser Doppler est réservé aux mesurages en laboratoire. Effectivement, le volume occupé par un vélocimètre Laser opérationnel (en dehors de l'écoulement), la mise en œuvre du (ou des) laser et sa consommation, rendent la technique assez difficile à utiliser, d'autant plus qu'il faut maîtriser un ensemble de problèmes : optique, mécanique, traitement du signal, analyse des données, ensemencement et finalement mécanique des fluides. Le coût d'un appareillage opérationnel est relativement élevé car il faut rassembler des composants de qualité.</p>
<p>Vélocimètres électromagnétiques</p>	<p>La vélocimétrie électromagnétique à force de Lorentz est utilisée pour des fluides conducteurs (d'une conductivité minimale de 5 à 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Il peut s'agir d'eaux conductrices, de boues de produits chimiques ou encore de liquides conducteurs. Les fumées – il en est de même pour le biogaz ou les gaz de process –, étant peu ou pas conductrices, cette technique ne peut donc pas être utilisée pour les mesurages de débit de polluants gazeux.</p>
<p>Méthode de calcul de débit par consommation d'énergie</p>	<p>Cette méthode n'est pas une méthode de mesurage mais un calcul du débit des gaz de combustion. Elle nécessite un combustible homogène.</p>
<p>Rotamètre</p>	<p>Cette méthode est plutôt utilisée à l'échelle pilote, elle est destinée au réglage grossier d'un débit. Elle ne correspond donc pas aux exigences du mesurage des gaz dans le cadre de cette étude.</p>
<p>Débitmètre à effet Coriolis</p>	<p>Cette technologie est utilisée pour les applications où la précision est le premier critère retenu (s'agissant d'un appareil très onéreux) : transactions commerciales (gaz naturel), optimisation de process de produits coûteux (où la moindre économie de matière est intéressante). De plus, elle n'est pas adaptée aux mesurages de polluants d'effluents gazeux car la pression et la masse volumique de ces derniers n'est pas suffisante pour pouvoir utiliser l'effet Coriolis.</p>

Tableau 5 : Technologies non retenues

2. Techniques identifiées pour le mesurage de gaz de combustion, de biogaz et de gaz de process

10 méthodes de mesurages de débits ou vitesses ont été identifiées pour le mesurage de gaz de combustion, de biogaz et de gaz de process. Elles sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Technologies identifiées
Tube Pitot
Vélocimètre à ultrason
Débitmètre massique thermique
Organes déprimogènes
Micro - Venturi
Vélocimètre à corrélation Laser
Vélocimètre par scintillation LED
Vélocimètre à corrélation infra-rouge
Vélocimètre à effet Vortex
Anémomètre à hélices

Tableau 6 : Technologies retenues

Il est également intéressant de noter que lors de la réalisation de l'état de l'art et notamment la recherche dans les brevets, les innovations relevées ne concernaient que l'optimisation de méthodes déjà existantes. Aucune nouvelle méthode en développement et possiblement utilisable en milieu industriel n'a été identifiée.

E. Revue des technologies

Chacune des technologies retenues a fait l'objet d'une fiche pratique descriptive utilisant plusieurs concepts décrits ci-dessous.

1. Définition des termes employés pour la caractérisation des technologies dans les fiches pratiques

a. Vélométrie et débitmétrie

Les technologies retenues sont à diviser en deux catégories :

- Les **vélomètres** qui donnent accès dans un premier temps à une **vitesse** – ils sont communément appelés *débitmètres volumiques* puisque le débit volumique Q_v est directement proportionnel à la vitesse (rappel [C.1.b.i](#)) via la surface de la conduite S ,
- Les **débitmètres massiques** donnant directement accès à la valeur du **débit** massique \dot{m} .

Cette distinction n'est pas à prendre à la légère lorsque la grandeur recherchée est une valeur de débit massique. Effectivement, comme il a été souligné dans la partie [C.1.d](#), **le passage de la vitesse moyenne au débit normal nécessite la connaissance de la composition du gaz, de la température et de la pression**. Les mesurages de ces paramètres en plus de celle de la vitesse **influent et ajoutent des incertitudes sur la valeur finale du débit normal**.

b. Mesurages mono-point ou moyennée

Un **mesurage mono-point** est un mesurage qui ne prend en compte la valeur de la vitesse ou du débit qu'en un seul point d'écoulement. Il est alors nécessaire de vérifier la **représentativité du point de mesure**, c'est-à-dire vérifier que la valeur en ce point de mesure est égale à la valeur moyenne de la vitesse. Pour cela on utilisera les recommandations de la norme EN-16911-2 décrite en [C.1.c.v](#) (un mesurage à 12% du diamètre ou bien la cartographie du profil des vitesses lors de la phase d'étude du projet de mesure).

Un mesurage **moyenné** est un mesurage effectué de telle sorte qu'il indique directement la moyenne des valeurs des vitesses sur un diamètre. Bien que nécessitant parfois également des longueurs droites en amont ou en aval de la section de mesure, ce mesurage conduit à une incertitude plus faible.

c. Ponctuelle ou continue

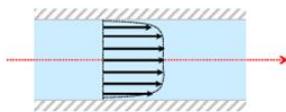
Ces deux critères font référence au **caractère temporel** du mesurage. Un mesurage ponctuel est de faible durée (quelques minutes ou quelques heures) pour des mesurages réglementaires par exemple. La mesure continue est quant à elle utilisée pour des mesurages d'auto-surveillance.

Cependant, pour des contraintes de stockage de données et de mémoire, il convient de définir une fréquence d'enregistrement pour le mesurage en continu, qui évitera la création de fichiers de données trop volumineux (fréquence très variable selon les applications, 15 minutes par exemple)¹⁴

¹⁴ RIQUIER études environnement, Guide opérationnel pour la mesure des flux de biogaz canalisés dans les installations de stockage de déchets non dangereux, ADEME, Juin 2013

d. Longueurs droites

Certaines technologies nécessitent un régime établi, c'est-à-dire un écoulement stable, symétrique et sans giration :



Écoulement turbulent – établi (stable, symétrique et sans giration)

Afin d'obtenir un régime établi, il est nécessaire de respecter des longueurs droites en amont et en aval de l'appareil définies par les normes (ci-dessous) ou bien celles préconisées par les constructeurs dans les manuels d'utilisation.

Rappels [C.1.c.iv](#) - Pour les instruments de mesure nécessitant un profil établi, on pourra prendre la référence de la norme EN 16911-2 préconisant une distance de **25 D_h** en amont et **5 D_h** en aval.



Figure 13 : Longueurs droites et profil des vitesses établi

Cependant, il convient de prendre un compte les informations fournies par le constructeur. Enfin, les résultats des cartographies des écoulements effectuées pour les pré-études des normes EN-16991-1 (mesurages QAL 2 pour le choix de l'emplacement de l'AMS pour le mesurage de débit et validation de la représentativité du point de mesurage) et EN-15259 (étude d'essai d'homogénéité pour l'ensemble des systèmes de mesurage des émissions de sources fixes) peuvent réduire ces longueurs droites.

e. Conditions d'utilisation et performances

Cette section caractérise le type de fluide ainsi que les gammes de mesures en vitesse et température pour lesquels un instrument est adapté.

i. Fluide chargé

On parle de fluide chargé lorsque des particules solides, caractérisées par leur taille et leur concentration, sont incluses dans l'écoulement gazeux.

ii. Condensation

La condensation d'un gaz est liée à la présence d'humidité qui s'est condensée sous forme d'eau liquide mais aussi à la présence de gouttelettes liquides pouvant être de nature différente (hydrocarbure par exemple).

La condensation peut venir interférer sur le mesurage soit en obstruant les prises de pression et piégeant les liquides (pour les tubes Pitot ou bien les organes déprimogènes), soit en faussant directement la mesure dans le cas du débitmètre massique thermique.

Il convient pour le biogaz de réaliser le mesurage le plus possible en aval des systèmes de filtration (fluide chargé) et de séchage (condensation).

iii. Milieu ATEX

La plupart des fournisseurs proposent des appareils ATEX en option. La certification ATEX concerne uniquement les capteurs (composés électroniques). Notons que dans les fiches descriptives, lorsqu'il est indiqué que la certification ATEX est absente, cela signifie que les fournisseurs identifiés ne proposent pas d'appareil certifié ATEX (et non pas une impossibilité de certification dans l'absolu).

iv. Fluide Corrosif

Un fluide peut contenir des composés corrosifs qui sont à même d'attaquer les surfaces lorsque la température est inférieure au **point de rosée acide**, c'est-à-dire lorsqu'ils se trouvent sous forme liquide.

Les solutions pour y remédier sont des alliages spécifiques (acier inox, hastelloy, etc.) qui viennent augmenter le coût de l'appareil.

f. Gammes de mesure

i. Température

Dans le cas du biogaz ou bien des émissions de polluants en cheminées, les conditions de température ne sont pas considérées comme extrêmes, la gamme de mesure en température n'est donc pas un élément crucial lors du choix de l'appareil.

ii. Vitesse

Pour des mesurages de vitesses sur biogaz ou bien sur cheminée, la valeur maximale de la vitesse mesurable n'est pas un critère de choix. En revanche, **la vitesse minimale** mesurable l'est.

Effectivement, pour les technologies nécessitant un capteur de pression différentielle – les tubes Pitot et les organes déprimogènes – une pression minimale (dépendante du capteur de pression utilisé) est requise pour obtenir une valeur. Cela correspond alors à une vitesse seuil en deçà de laquelle l'appareil affiche une vitesse nulle.

*De plus, pour les technologies nécessitant un capteur de pression différentielle, **des abaques sont fournis illustrant l'influence de la vitesse sur l'incertitude. Plus la vitesse est faible, plus la différence de pression mesurée par le capteur est faible et donc plus l'incertitude est élevée.***

*Dans le cas du biogaz, les vitesses d'écoulement sont parfois faibles (<10m/s) afin de limiter les risques de vagues du lit d'eau dans les conduits à l'horizontal. Ces vitesses n'étant pas toujours détectables par les appareils à pression différentielle, il convient alors de **rétrécir le diamètre de la conduite en amont du mesurage pour accélérer le fluide et être à même d'obtenir une vitesse mesurable.***

g. Fiabilité opérationnelle

La fiabilité opérationnelle caractérise la qualité de la mesure. Dans cette étude, deux critères ont été retenus : la résolution ainsi que la reproductibilité.

La résolution correspond à la plus petite variation mesurable par l'appareil de mesure (la plus petite graduation).

La reproductibilité est une mesure de l'accord entre deux systèmes de mesure identiques appliqués en parallèle lors d'essais sur site à un niveau de confiance de 95 % en utilisant l'écart-type de la différence des mesurages par paires (Cf. ANNEXE 1 concernant le calcul de la reproductibilité).

La précision ou bien la justesse n'est pas un critère retenu dans ce rapport puisqu'elle caractérise une erreur systématique qu'il est toujours possible de corriger en calibrant le système de mesure.

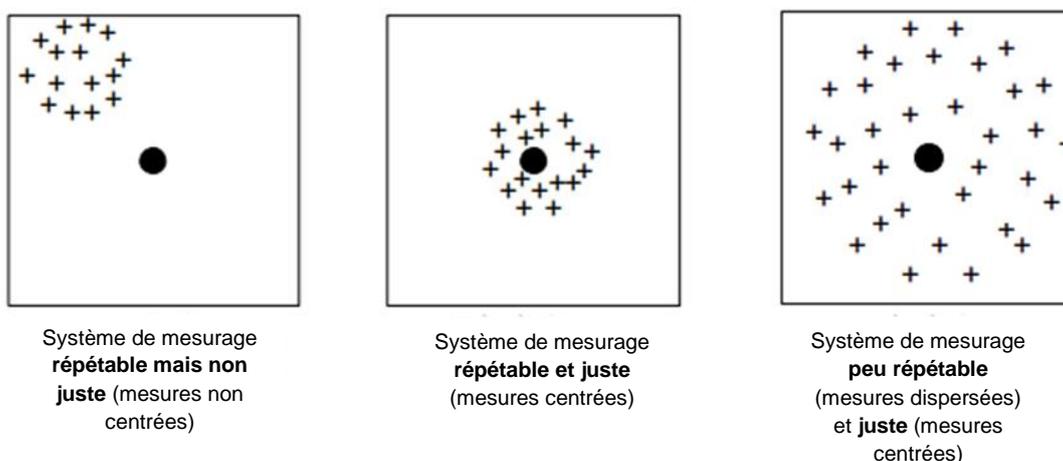


Figure 14 : Illustration des concepts de reproductibilité et de justesse (ou précision), source INRS

*Enfin, l'**incertitude** est un paramètre, associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs « qui pourraient raisonnablement » être attribuées au mesurande. Il est exprimé généralement en termes d'incertitude élargie notée U ou un intervalle de confiance IC égal à +/- U où il y a 95% de chance de trouver la valeur vraie. **De nombreux facteurs rentrent en compte dans son calcul : des paramètres internes de l'appareil (reproductibilité, précision) mais aussi les facteurs extérieurs (variation de la composition du gaz faussant l'étalonnage, variation du profil des vitesses faussant la représentativité du point de mesure etc.).***

*La norme **EN 16911** prévoit des seuils en termes d'incertitudes sur la mesure, ne prenant en compte que les caractéristiques de performance de l'appareil. Un appareil ne pourra être certifié **QAL 1** (cf. exemple de certification en ANNEXE 2) que lorsque cette incertitude est inférieure à 7,5%. (Cf. ANNEXE 2). Cette norme définit également les procédures d'assurance qualité des appareils de mesure sur site nécessaires aux vérifications **QAL 2** réalisées par un organisme certifié (ANNEXE 2).*

h. Facteurs d'influence – mesurages additionnels

Lors du passage du débit aux conditions vraies (m^3/h) aux conditions normales (Nm^3/h), il est indispensable de connaître la valeur de la pression et de la température. Bien souvent, comme présenté en [C.4](#), de nombreux appareils intègrent ces mesurages.

Il est important de souligner qu'il est souvent recommandé de placer le capteur de pression absolue en amont de la section de mesurage de vitesse / débit et le capteur de température en aval (exemple de recommandations pour le vélocimètre à ultrason¹⁵ : 2D-5D en aval et entre D/10 et D/3 dans la section).

De plus, certains appareils peuvent être sensibles aux variations de la masse volumique car cette dernière intervient directement dans le calcul du débit (valeur de ρ enregistrée lors de l'installation de l'appareil).

Le débitmètre massique thermique est sensible aux variations de la masse volumique.

Bien que la masse volumique intervienne directement dans les calculs de la vitesse dans le cas du tube Pitot et des organes déprimogènes, la sensibilité de la vitesse aux variations de la masse volumique du gaz est faible (Cf. ANNEXE 7). La valeur de masse volumique n'est donc pas modifiée lors de maintenance ou de réétalonnage dans la plupart des installations industrielles.

*De plus, dans le cas des fumées issues de l'incinération de déchets, **le processus de traitement en amont des fumées homogénéise sa composition (et donc sa masse volumique)** bien que le combustible puisse voir sa composition varier au cours du temps.*

*En revanche, la **composition du biogaz peut varier fortement : l'influence de la masse volumique sur la mesure du débit n'est pas à prendre à la légère.***

¹⁵ EN 17 089 : Mesurage du débit des fluides dans les conduites fermées – Compteurs à ultrasons pour gaz, Partie 1 : compteurs pour transactions commerciales et allocations

2. Fiches pratiques

Pour chacune des 10 technologies retenues, des fiches pratiques synthétisent :

- Son principe de fonctionnement
- Ses conditions d'installation et de mise en œuvre
- Ses avantages et inconvénients
- Ses domaines d'application
- Son taux de diffusion en milieu industriel
- Ses conditions d'utilisation et ses performances
- Sa fiabilité opérationnelle
- Ses coûts (maintenance, achat et étalonnage)
- Ses facteurs d'influence
- Quelques exemples de fournisseurs

NB : Les informations issues des retours d'expériences sont précédées du logo  et se trouvent en italique dans les fiches.

Le tube Pitot

VITESSE

DEBIT

MONO-POINT

MOYENNEUR

PONCTUELLE

CONTINUE

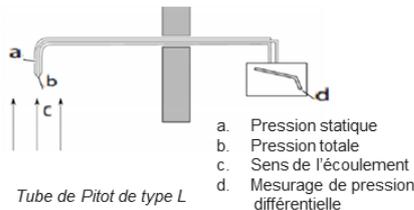


Principe de fonctionnement

Le principe de la sonde Pitot repose sur le théorème de Bernoulli.

Le tube est muni d'au moins deux prises de pression :

- l'une face à l'écoulement impactée directement par l'écoulement et mesurant la pression totale (b), somme de la pression statique P_s et de la pression dynamique P_d : $P_b = P_s + P_d$
- l'autre mesurant la pression statique (a) : $P_a = P_s$.



Tube de Pitot de type L

En mesurant la différence de pression entre ces deux points a et b, on a donc accès à la pression dynamique directement reliée à la vitesse de l'écoulement :

$$\Delta P = P_b - P_a = P_d = k \frac{1}{2} \rho v^2$$

$$\rightarrow v = \sqrt{\frac{2}{k\rho} \Delta P}$$

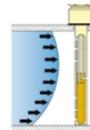
Où ρ est la masse volumique du fluide, v sa vitesse et k est un facteur lié à la géométrie (à calibrer en fonction du régime de l'écoulement, proche de 1)

Il existe des variations du tube de Pitot L, notamment le type S qui effectuent des mesurages mono-point et le tube moyennneur (aussi appelé annubar) qui est le plus utilisé dans l'industrie.



Tube de Pitot de type S

Les tubes S et L sont très adaptés pour des mesurages ponctuels de contrôle. Ils peuvent être employés à poste fixe en un point représentatif. Le tube S est plus adapté aux gaz chargés que le tube de type L.

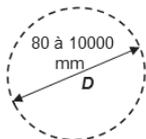


Tube de Pitot moyennneur

Le tube « moyennneur » est placé sur toute la longueur du diamètre de la section, il donne donc accès à la vitesse moyenne et non locale. Il est utilisé pour les petits diamètres.



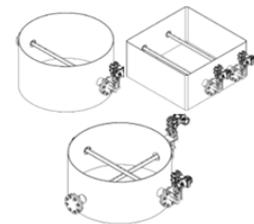
Conditions d'installation et mise en œuvre – Informations fournisseurs



Technologie nécessitant un régime établi (besoin de longueur droite)¹

Nombre et position des points de mesure (points de prise de pression) dans la conduite suivant les règles générales ou tangentielles pour les tubes mono-points utilisés pour réaliser des cartographies ou comme SRM (Cf. ANNEXES 2 et 3).

¹ – Ecoulement stable, symétrique et sans giration : profil des vitesses bien développé



Montage de tubes moyennneurs simples, croisés et sur section rectangulaire



Avantages

- Pas de pièces en mouvement
- Adapté aux grandes vitesses d'écoulement
- Pertes de charge résiduelles faibles
- Coût peu élevé



Inconvénients

- **Risque d'obstruction des orifices si gaz chargés ou condensation :**
 - La condensation peut apparaître lorsque la température extérieure est basse ou en aval d'un traitement humide des fumées (laveur)
- **Faibles vitesses non mesurables (< 5 m/s)**
- **Encombrement :**
 - Un unique point de piquage : limitation de la taille du diamètre si on désire que le tube soit traversant
 - Deux points de piquage de part et d'autre du diamètre : le tube peut se briser en cas de dilation ou vibrations liées à des vitesses élevées (>20 m/s)

Le tube Pitot



Domaines d'application

Les sondes de type S et L sont fréquemment utilisées dans les laboratoires de contrôle pour des mesurages périodiques sur des installations industrielles.

Les tubes « moyennés » sont largement utilisés en milieu industriel.



Taux de diffusion en milieu industriel

Mature et très répandu - débitmètre le plus utilisé

Certifié ISO 14181 - QAL 1



Conditions d'utilisation et performances

Type de fluide

Chargé Jusqu'à 150 mg/m³



Condensation



Vigilance requise lors de l'installation du tube : l'eau ne doit pas stagner dans le tube et obstruer les orifices de prise de pression - éviter d'installer le tube à l'horizontale sur une conduite verticale où le flux est descendant
Privilégier Pitot de type S en présence de vésicules (s'obstruent plus difficilement)



ATEX La certification ATEX est à prendre en compte sur le choix du capteur de pression. Pour les appareils tout intégrés la certification est souvent en option.

Corrosif



Contact direct - matériau adéquat (alliage Hastelloy, Inox par ex.)

Gamme de mesure

Température 850 °C



* Limite basse : point de rosée acide si composés corrosifs

Vitesse 3 m/s 80 m/s



Pression différentielle minimale de 5 Pa (3 à 5 m/s)
Il convient de prendre en compte les abaques des fournisseurs illustrant les valeurs des incertitudes en fonction de la vitesse. Plus la vitesse augmente, moins la mesure est incertaine.



Qualité du mesurage ++

Le tube Pitot moyenné réalise un mesurage sur un nombre limité de points (5 à 6 points max.). Il est également sensible à l'humidité du gaz. A basse vitesse, son incertitude de mesure est plus élevée.

Valeurs théoriques	Résolution	0,1 m/s
	Reproductibilité	de 1 à 2,7 %



Coût hors installation

1k€ - 7k€

Achat

- Augmentation de 20-25 % du prix pour un alliage spécifique - Coût supplémentaire du système d'acquisition et d'enregistrement

Maintenance

- Conditions nominales à 75% des conditions maximales
- Vérification du capteur de pression (étalonnage) et du tube (nettoyage, alignement face au flux notamment)
- Pas de vérification de la composition du gaz

Étalonnage

- Nettoyage périodique (à l'arrêt) ou rétro-soufflage journalier (en fonctionnement)
- Renouvellement du filtre à air du système de rétro-soufflage
- Vérification du capteur de pression



Facteurs d'influence – Mesurages additionnels

- Angle entre la vitesse et la sonde (influence < 3% pour une variation de 15°)
- Variation importante de pression hors étalonnage
- Composition du gaz (Cf. ANNEXE 7), température (influence < 2% pour une variation de 10 °C) et pression (< 2% pour 2 kPa) dans le cadre du calcul du débit normal à partir de la vitesse moyenne



Principaux fournisseurs

QAL 1 : ABB (Stack flow meter system), DURAG (D FL 100 Flow monitor), SKI (Accu flow), Dr Födish (FDM 09-02), Horriba (EM F5000), Environnement SA (StackFlow 200),
Autres : Rosemount (Annubar Averaging), Fuji Electric (5RD moyenné), ARMSTRONG (VeraBar)

Vélocimètre à ultrasons à temps de transit

VITESSE DEBIT
 MONO-POINT MOYENNEUR
 PONCTUELLE CONTINUE



Principe de fonctionnement

Le vélocimètre à ultrasons est constitué de deux transducteurs (source et récepteur) disposés de part et d'autre de la conduite. Le passage du signal sonore à travers le fluide en mouvement crée un déphasage du signal émis. Ainsi, le temps de parcours entre la source et le récepteur dépend de la vitesse du fluide. On mesure très souvent la différence de temps de parcours entre des signaux émis vers l'amont et vers l'aval afin d'être indépendant de la vitesse du signal émis.

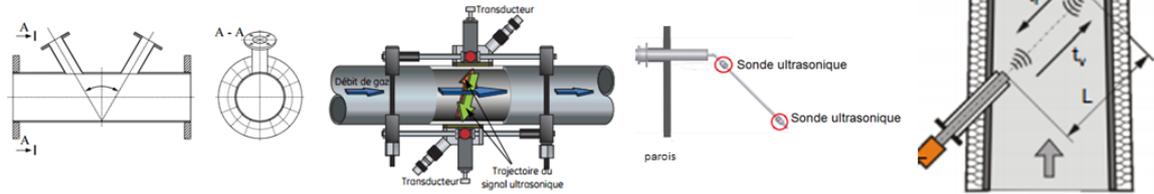
On mesure le temps de transit du signal dans le sens de l'écoulement : $t_v = \frac{L}{c + v \cos(a)}$

Où c est la vitesse du son dans le fluide : sa valeur peut être déduite à partir des temps de parcours $c = \frac{L}{2} \left(\frac{t_v + t_r}{t_v t_r} \right)$.

Puis à contre courant : $t_r = \frac{L}{c - v \cos(a)}$

On en déduit la vitesse moyenne v de l'écoulement : $v = \frac{L}{2 \cos(a)} \left(\frac{1}{t_v} - \frac{1}{t_r} \right)$

Le montage des sondes peut varier : les sondes peuvent être placées sur les parois l'une face à l'autre (voir ci-contre), d'un même côté du flux (ci-dessous), sur une même sonde (ci-dessous) ou encore à placer sur conduite (« solution clamp-on » portable ci-dessous) :



Sondes d'un même côté

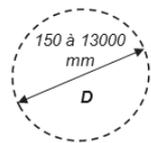
Solution portable « clamp-on », GE

Sondes ultrasonique avec 1 seul point d'insertion, PCME

A noter : la débitmétrie ultrasonique à effet Doppler n'est utilisée que pour des fluides en phase liquide ou contenant des bulles gazeuses (Cf. ANNEXE 6).

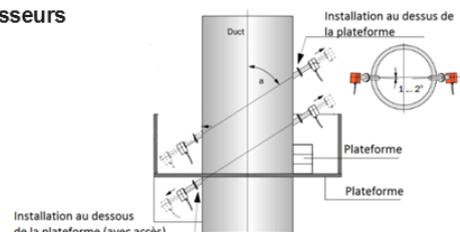


Conditions d'installation et mise en œuvre – Informations fournisseurs



Technologie nécessitant un régime établi (besoin de longueur droite)¹

Les deux sondes doivent être placées avec un angle compris entre 30 et 45° par rapport à la conduite.



Montage de sondes et interactions avec les plateformes

¹ – Ecoulement stable, symétrique et sans giration : profil des vitesses bien développé



Avantages

- **Peu intrusif :**
 - Durée de vie importante
 - Pertes de charge faibles
 - Robustesse
 - Pas d'interaction entre les particules et l'appareil de mesurage
- **Indépendant des caractéristiques du fluide (humidité, particules...)**
- **Adapté aux basses températures et condensation permise**
- **Adapté aux diamètres moyens comme aux diamètres très importants**
 - Pour les grands diamètres, le débitmètre à ultrasons est plus adapté que les éléments à insertion (tube Pitot ou débitmètre massique par exemple)
- **Durée de vie élevée (plus de 10 ans)**



Inconvénients

- **Encombrement important : deux sondes à placer diamétralement opposées avec un angle compris entre 30 et 45°**
- **Conditions d'installation influentes sur la qualité du résultat : positions des transducteurs, connaissance des caractéristiques de l'écoulement**
 - La mesure sur biogaz, dont les variations de composition et de température sont importantes, peuvent rendre l'étalonnage de l'appareil compliqué.
- **Nécessité de calculs de correction (calibrage des coefficients de corrélation)**
- **Coût élevé**

Vélocimètre à ultrasons à temps de transit



Domaines d'application

Les vélocimètres à ultrasons à temps de transit (ou temps de vol, de parcours) sont largement répandus dans l'industrie autant pour les liquides que pour les gaz. On peut toutefois noter qu'ils sont bien souvent utilisés dans les cas où des sondes Pitot ne peuvent être mises en place (vitesse ou température faible, humidité, profil inadéquat, grands diamètres...).



Taux de diffusion en milieu industriel



Mature et très répandu

Certifié ISO 14181 - QAL 1



Conditions d'utilisation et performances

Type de fluide	Chargé Jusqu'à 150 mg/m ³ ✓	Condensation ... Lorsque les sondes sont à la verticale dans le flux, un dépôt de condensation peut se former sur les sondes et biaiser le mesurage. ✓
	ATEX Certification disponible en option sur de nombreux appareils. ✓	Corrosif Contact direct – matériau adéquat – Titane ✓
Gamme de mesure	Température -40 °C — 450 °C Pas de limite basse	
	Vitesse 0 m/s — 50 m/s	



Qualité du mesurage +++

... Cette technique offre une mesure très satisfaisante de part sa technologie.

Valeurs théoriques	Résolution	0,1 m/s
	Reproductibilité	de 0,9 à 1,2 %



Coût hors installation 5 k€ 8-10k€ 20 k€



Il est possible de ne racheter que les sondes sans le transducteur (par exemple 4k€ pour la paire de sonde et 4k€ pour le transducteur)

- Dans le cas de fluide propre, cette méthode ne requiert pas de nettoyage ni de maintenance.
- Nettoyage périodique (à l'arrêt) ou rétro-soufflage journalier (en fonctionnement) pour les fluides plus chargés
- Renouvellement du filtre à air du système de rétro-soufflage
- Vérification du paramétrage au moins deux fois par an
- La variation importante de la composition du biogaz et de sa température rend l'étalonnage de l'appareil compliqué.



Facteurs d'influence – Mesurages additionnels

- Composition du gaz, température et pression dans le cadre du calcul du débit normal à partir de la vitesse moyenne.



Principaux fournisseurs

QAL 1 : Durag (D FL 200 flow monitor), PCME (Stack flow 400), Sick (Flowsic100)
Autres : Khrono (Optisonic X), Honzstch (débitmètre à ultrasons UA), Omega Engineering, GE (PT878GC), Fuji-Electric (PORTAFLOW-C), Sierra Instrument, Siemens, Panametrics (GEmeasurement)

Débitmètre massique thermique

VITESSE	DEBIT
MONO-POINT	MOYENNEUR
PONCTUELLE	CONTINUE



Principe de fonctionnement

Le capteur est composé de deux sondes thermiques : l'une est chauffée, l'autre non. La différence de température est maximale à débit nul. Lorsque le débit augmente, cette différence de température diminue par le refroidissement engendré par le passage de l'écoulement sur la sonde chauffée. Le débit massique est relié à cet effet de refroidissement et donc à la différence de température, notée ΔT . Cela met en jeu la chaleur spécifique du fluide C_p :

$$P_{th} = \dot{m} C_p \Delta T$$

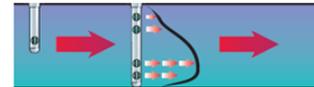
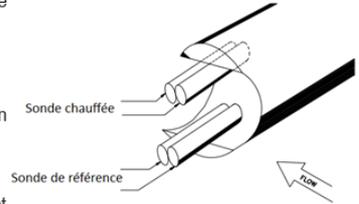
et où C_p est calculé à partir de la composition du fluide et des chaleurs spécifiques de chacun des composants.

Deux fonctionnements sont possibles :

- Soit la puissance P_{th} est imposée et on mesure l'écart de température entre la résistance et le fluide.
- Soit l'écart de température est imposé et on règle la puissance électrique, reliée à P_{th} , par l'intermédiaire d'un régulateur.

Avec cette méthode, on mesure directement le débit massique aux conditions normales et non pas la vitesse.

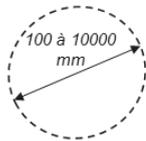
Afin d'avoir accès à une mesure moyenne il est préférable de réaliser un mesurage multipoint ou bien d'utiliser des sondes « moyennes » qui traversent l'ensemble de la section avec plusieurs prises de débit.



A noter : plusieurs termes peuvent être utilisés pour désigner cette technologie, on retrouvera fréquemment la désignation de fil chaud ou de mesure de débit par mesure de transfert thermique par convection.

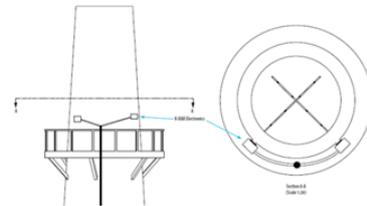


Conditions d'installation et mise en œuvre – Informations fournisseurs



Technologie nécessitant un régime établi (besoin de longueur droite)¹

Le nombre de sondes à installer dépend du diamètre et de la précision attendue (pour un diamètre d'un mètre on placera 2 à 3 thermocouples).



Montage des sondes

¹ – Ecoulement stable, symétrique et sans giration : profil des vitesses bien développé



Avantages

- **Maintenance faible :**
 - Pas de pièce en mouvement
 - Peu de nettoyage car les dépôts (sans obstruction néanmoins) n'influencent pas la mesure (il s'agit d'une différence de température)
- **Mesurage direct de débit massique**



Inconvénients

- **Filtration parfois recommandée pour les gaz (en cas d'obstruction des deux sondes)**
- **Pas d'humidité / condensation permise (tolérance de 2 à 3%)**
- **Fragilité de la sonde – peu de réparation possible**
- **Dépendance à la composition du gaz (variation permise jusqu'à 10%) : chaleur spécifique des gaz nécessaire aux calculs**
- **Coût plus élevé que les sondes Pitot**

Débitmètre massique thermique



Domaines d'application

Cette technologie est très utilisée pour les liquides ou bien pour des gaz (incinération-gaz sec, nucléaire, biogaz notamment). Elle se retrouve pour le mesurage d'air en entrée de four par exemple.



Taux de diffusion en milieu industriel



Mature - assez répandu

Certifié ISO 14181 - QAL 1



Conditions d'utilisation et performances

Type de fluide	Chargé	Condensation
	Jusqu'à 150 mg/m ³	
	⊘	⊗
	ATEX Certification en option pour de multiples appareils suivant les fournisseurs	Corrosif Contact direct – matériau adéquat
	✓	✓
Gamme de mesure	Température 0 à 450 °C	
	Vitesse 1 m/s à 45 m/s	



Qualité du mesurage

Cette technique conduit à une mesure moins satisfaisante, bien qu'elle ait une très bonne reproductibilité, du fait de sa sensibilité aux variations de la masse volumique et à l'humidité.

Valeurs théoriques	Résolution	0,1 m/s ¹
	Reproductibilité	de 0,2 à 1 %



Coût hors installation

5 - 10 k€

Achat
Maintenance
Etalonnage

• Nettoyage périodique pluriannuel

• Calibrage tous les 2 ans (ou lors de modification significative de la composition du gaz)



Facteurs d'influence – Mesurages additionnels

• Composition du gaz qui intervient dans les calculs des chaleurs spécifiques des gaz



Principaux fournisseurs

QAL 1: Fluid Component International (MT 91), Kurz international (K BAR 2000 B)
Autres : SCHMIDT Technology (SS 20.500), TESTO (Sonde à boule chaude), MKS instrument, E+E Elektronik, Alicat Scientific, Axetris

¹ Pour faciliter la comparaison des technologies, les fournisseurs de débitmètre massique thermique convertissent leurs données en m/s.

Organes déprimogènes

VITESSE

DEBIT

MONO-POINT

MOYENNEUR

PONCTUELLE

CONTINUE



Principe de fonctionnement

Le fluide s'écoule au travers d'un élément à section de passage réduite appelé organe déprimogène ou élément primaire. Le fluide est donc accéléré et par application du principe de Bernoulli, sa pression statique se trouve diminuée. La pression différentielle mesurée de part et d'autre de cet élément est proportionnelle au carré du débit volumique.

La différence de pression en amont et en aval de l'organe déprimogène ΔP est reliée au débit volumique selon la loi suivante :

$$Q_v = \alpha \beta^2 A_1 \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}$$

Où $\alpha \beta^2$ est appelé facteur de calibrage, il est répertorié dans des abaques en fonction des caractéristiques du flux, de l'écoulement. A_1 est l'aire de la section en amont. Des coefficients de vitesse ou de décharge sont répertoriés pour calculer par la suite α .

Deux types d'appareils peuvent être distingués :

- des diaphragmes ou plaques à orifice,
- des orifices profilés comprenant les V-cônes, les tuyères, les tubes de Venturi et les Venturi-tuyères dont les tuyères spécifiques ISA 1932 et ASME.

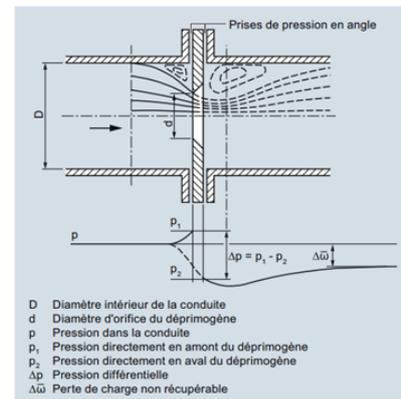
Les normes ISO 5167, 5168 définissent les spécifications de construction, les conditions d'utilisation (longueur droite, diamètres intérieurs, nombre de Reynolds, précisions, etc.) ainsi que les procédures de calcul pour obtenir les valeurs du débit volumique à partir des ces instruments.

Les paramètres de base de ces organes déprimogènes sont :

- Le rapport d'ouverture $\beta = \frac{d}{D}$ où d est le plus petit diamètre de l'étranglement et D le plus grand diamètre (celui de la conduite)
- Le nombre de Reynolds Re

D'autres types d'organes déprimogènes existent mais ils ne sont pas normalisés : débitmètre à cible, débitmètre à coude, élément déprimogène en V, diaphragme à orifice à entrée conique ou en quart de cercle, diaphragme ou plaque à orifice excentrique ou segmental.

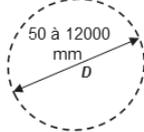
Principe de mesure par pression différentielle



Pertes de charges résiduelles Δw : pertes de pression par rapport à la pression en amont après 5 à 10 D derrière l'organe déprimogène.



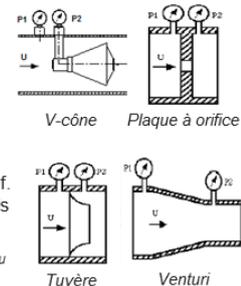
Conditions d'installation et mise en œuvre – Informations fournisseurs



Technologie nécessitant un régime établi (besoin de longueur droite)¹

Des diamètres d'utilisation ainsi que des nombres de Reynolds encadrent l'utilisation de chaque appareil (cf. ANNEXE 4). Les longueurs droites nécessaires varient en fonction des appareils : certains appareils « redressent » le flux.

¹ – Le besoin en longueur droite est défini pour chaque appareil en fonction des obstacles en amont et en aval et du niveau d'incertitudes attendu dans les normes EN 1567 et EN 1558 (Voir ANNEXE 4).



Avantages

- **Pas de pièces en mouvement** : très faible maintenance
- **Grande gamme de mesure (0,1 à 50 Nm³/h possible)**
- **Normalisation du procédé d'installation et de calcul** : abaques des incertitudes, des pertes de charge ainsi que des différentes longueurs droites
- **Innovation de la plaque multi-orifice « moyenneuse »** permettant son utilisation sur des sites où les longueurs droites sont réduites
- **Coût peu élevé**



Inconvénients

- **Fortes pertes de charge** : elles sont liées au paramètre β et répertoriées dans les normes EN 1567 et 1568 en fonction des conditions d'installation, des caractéristiques de l'écoulement et du fluide. Néanmoins, les pertes sont plus faibles pour les orifices profilés que pour les plaques et diaphragmes. (cf. ANNEXE 4)

Organes déprimogènes



Domaines d'application

Ces technologies sont principalement installées dans le secteur de l'Oil & Gas. Elles peuvent être rencontrées pour des mesurages sur cheminées (sur la cheminée de la chaudronnerie Five Nordon à Nancy par exemple) ou de biogaz (mesurages effectués par plaque à orifices sur le réseau des puits de captage du biogaz directement au niveau des déchets – étant en bout de réseau les pertes de charges ne sont pas un souci). Cependant les importantes pertes de charge associées peuvent limiter ses applications. Les organes déprimogènes peuvent également être utilisés pour les mesurages sur écoulements bi-phasiques.



Taux de diffusion en milieu industriel



Mature et très répandu
Normé via EN 1567 et API 2530 (USA)
NON Certifié EN 14181 - QAL 1



Conditions d'utilisation et performances

Type de fluide

Chargé Vigilance lors de l'utilisation de plaque à orifices – risque d'obstruction



Condensation Vigilance requise lors de l'installation : l'eau ne doit pas stagner



ATEX La certification ATEX est à prendre en compte sur le choix du capteur de pression. Pour les appareils tout intégrés la certification est souvent en option.



Corrosif Contact direct – matériau adéquat (alliage Hastelloy, Inox, Titane, PVC par ex.)



Gamme de mesure

Température 280 °C

Vitesse Généralement, mesure maximale de débit moins étendue qu'avec des tubes Pitot – dépend largement des fournisseurs.



Qualité du mesurage +++

Cette technique offre une mesure très satisfaisante et parfaitement encadrée par les normes.

Valeurs théoriques	Résolution	0,1 m/s
	Reproductibilité	0,1 % et capteur de pression utilisé



Coût hors installation 2 k€



Achat

- Augmentation du prix pour un alliage spécifique – Coût supplémentaire du système d'acquisition et d'enregistrement

Maintenance

- Très peu de maintenance
- Nettoyage pluriannuel (en fonction de l'encrassement)

Étalonnage

- Lorsque toutes les contraintes de la norme sont respectées, il n'y a pas d'étalonnage de l'organe déprimogène
- Étalonnage régulier du capteur de pression



Facteurs d'influence – Mesurages additionnels

- Capteur de pression utilisé
- Composition du gaz (voir ANNEXE 7), température et pression dans le cadre du calcul du débit normal à partir de la vitesse moyenne



Principaux fournisseurs

ARMSTRONG (Accelabar), DELTAFLUID (Organes déprimogènes variés), Rosemount (Plaque multi-orifice), ABB, Khrono, Siemens, Endress + Hauser

Organes déprimogènes

Micro-Venturi

VITESSE

DEBIT

MONO-POINT

MOYENNEUR

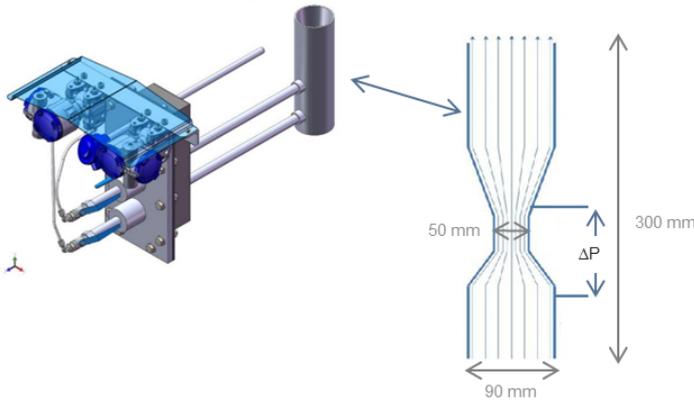
PONCTUELLE

CONTINUE



Principe de fonctionnement

Le principe de mesurage est similaire au tube Venturi (cf. Fiche Organes déprimogènes). L'unique différence se trouve dans l'insertion de l'élément primaire – le tube Venturi – dans l'écoulement. Effectivement, le tube s'insère dans le flux de telle sorte qu'une seule partie du flux le traverse.



Micro Venturi avec élément du piquage
(capteur de pression différentielle, de température et de pression absolue)

Une partie du flux passe à travers le tube Venturi : une différence de pression apparaît entre l'amont et l'aval de l'étranglement. Cette pression différentielle mesurée de part et d'autre de cet élément est proportionnelle au carré du débit volumique :

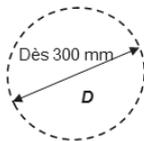
$$Q_v = K \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}$$

Où K est un facteur de calibrage.

Contrairement aux autres organes déprimogènes, le micro-venturi n'est pas normé. Aucune norme ne décrit ses conditions d'utilisations ou longueurs droites.



Conditions d'installation et mise en œuvre – Informations fournisseurs



Technologie nécessitant un régime établi (besoin de longueur droite)¹



Micro-Venturi installé sur une cheminée

¹ – Ecoulement stable, symétrique et sans giration : profil des vitesses bien développé



Avantages

- Pas de pièces en mouvement : très faible maintenance
- Un unique point de piquage
- Coût peu élevé



Inconvénients

- Pertes de charge
- Encombrement du flux en comparaison aux autres appareils à insertion dans le flux (tubes Pitot, au débitmètre massique notamment) :
 - Diamètre 90 mm
 - Longueur 300 mm
- Nécessite d'installer le dispositif en un point représentatif de la section de mesurage (difficile si ce point varie avec la charge)
- Absence de normalisation contrairement aux organes déprimogènes standards

Organes déprimogènes Micro-Venturi



Domaines d'application

Cette technologie encore très récente a été spécialement conçue pour la surveillance environnementale : installations de combustion, incinération, chauffage urbain notamment.



Taux de diffusion en milieu industriel



Peu répandu
En cours de certification QAL 1



Conditions d'utilisation et performances

Type de fluide	Chargé Jusqu'à 100 mg/m ³ 	Condensation
	ATEX La certification ATEX est à prendre en compte sur le choix du capteur de pression. Pour les appareils tout intégrés, la certification est souvent en option.	Corrosif Contact direct – matériau adéquat
Gamme de mesure	Température 300 °C	<i>Des matériaux adéquats comme l'acier réfractaires peuvent augmenter la température limite d'utilisation.</i>
	Vitesse 3 m/s	La vitesse minimale est liée à la différence minimale de pression que le capteur de pression peut détecter.



Qualité du mesurage ++

Cette technique offre une mesure satisfaisante.

Valeurs théoriques	Résolution	0,1 m/s
	Reproductibilité	En fonction du capteur de pression utilisé



Coût hors installation 1k€ à 2k€



- Achat**
 - Augmentation du prix pour un alliage spécifique – Coût supplémentaire pour le capteur de pression : prévoir 300€
- Maintenance**
 - Pas de maintenance ni de nettoyage à prévoir pour l'organe déprimogène
 - Contrôle du capteur en fonction des préconisations constructeur
- Étalonnage**
 - Seul le capteur de pression est à étalonner.



Facteurs d'influence – Mesurages additionnels

- Capteur de pression utilisé
- Composition du gaz, température et pression dans le cadre du calcul du débit normal à partir de la vitesse moyenne



Principaux fournisseurs

En cours de certification : Fuji Electric (en partenariat avec le fabriquant ER industries)
Autres : OTI industrie

Vélocimètre à corrélation Laser

VITESSE

DEBIT

MONO-POINT

MOYENNEUR

PONCTUELLE

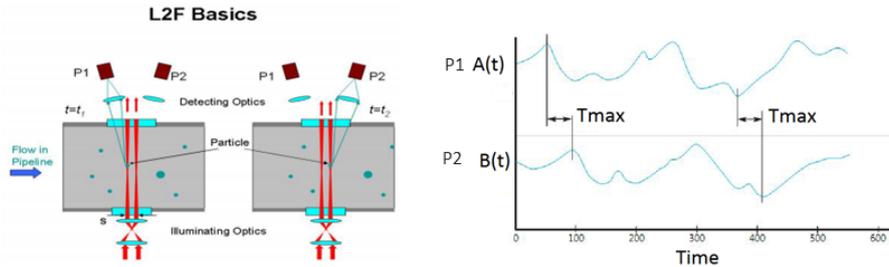
CONTINUE



Principe de fonctionnement

Ce capteur est constitué de deux faisceaux laser focalisés sur deux photodiodes.

Lorsque des particules microscopiques présentes dans le gaz passent à travers les rayons laser, elles créent des perturbations (en dispersant les rayons lumineux) et envoient ainsi un signal caractéristique avec les deux rayons. Grâce à un algorithme de corrélation entre les deux signaux issus des deux laser, un temps de parcours est calculé entre les deux rayons pour la particule. Il en est ainsi déduit la vitesse moyenne de l'écoulement.

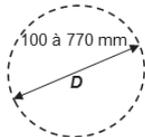


Cela reste une mesure locale puisqu'il s'agit d'une sonde contenant ces deux faisceaux laser que l'on vient insérer dans l'écoulement (les deux faisceaux ne font que quelques cm de longueur et sont espacés d'1 mm).

A noter : plusieurs termes peuvent être utilisés pour désigner cette technologie, on retrouvera fréquemment la désignation de Laser time of flight, Laser à barrière optique, à temps de parcours/vol ou encore Laser 2F.



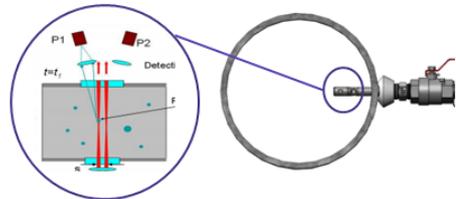
Conditions d'installation et mise en œuvre – Informations fournisseurs



Placement de la sonde dans le flux à ¼ du diamètre



Technologie nécessitant un régime établi (besoin de longueur droite)¹



Sonde insérée dans l'écoulement

¹ – Ecoulement stable, symétrique et sans giration : profil des vitesses bien développé



Avantages – retours fournisseur

- Grande gamme de mesure de vitesse 1500:1 : possibilité de mesurer des vitesses allant de 0,1 m/s à 150 m/s
- Facilité d'installation (simple piquage)
- Pas d'influence de la composition du gaz (contrairement au thermique massique et au tube Pitot) pour le calcul de la vitesse uniquement



Inconvénients – retours fournisseur

- Nécessité de travailler avec des particules (même très petites): le mesurage est plus difficile sur des gaz purs ou très propres
- Présence d'un miroir en bout de sonde : la présence de condensation sur celui-ci affecte la mesure, il est également le facteur limitant sur la température (déformations et décollement sous l'effet de la chaleur)
- Coût très élevé

Vélocimètre à corrélation Laser

Domaines d'application – Informations fournisseur

Cette technologie est utilisée dans l'industrie de l'Oil & Gas (pour des mesurages de torchères notamment / flare and vent gas), et peut être utilisée pour du mesurage de biogaz, de H₂S, de CO₂.

Taux de diffusion en milieu industriel

Technologie encore peu répandue industriellement – un seul fournisseur
NON Certifié ISO 14181 - QAL 1

Conditions d'utilisation et performances

Type de fluide	Chargé Encrassement miroir ⚠	Condensation ⚠	Biais de la mesure si condensation sur le miroir
	ATEX Certifié ✔	Corrosif ✔	Contact direct – matériau adéquat
Gamme de mesure	Température -40 °C 100 °C 0,1 m/s 150 m/s	Pas de haute température possible	
	Vitesse	Très large gamme de mesure en comparaison aux autres technologies proposées	

Qualité du mesurage ++

Grande précision sur une large gamme de mesure, mais sensible à l'encrassement et l'humidité.

Valeurs théoriques

Résolution	0,1 m/s
Reproductibilité	de 1 %

Coût hors installation

30 k€

Achat

Maintenance

- Nettoyage périodique du miroir de la sonde (en fonction de l'humidité et de la propreté du gaz) – une fois par mois par exemple

Étalonnage

- Pas d'étalonnage à prévoir

Facteurs d'influence – Mesurages additionnels

Composition du gaz, température et pression dans le cadre du calcul du débit normal à partir de la vitesse moyenne

Principaux fournisseurs

PhotonControl (Focus © Optical Gas flow meter)

Vélocimètre par scintillation LED

VITESSE

DEBIT

MONO-POINT

MOYENNEUR

PONCTUELLE

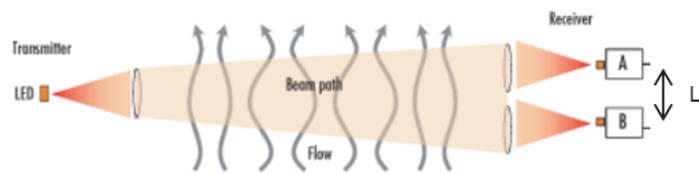
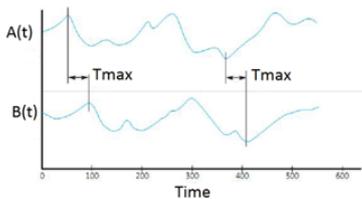
CONTINUE



Principe de fonctionnement

Ce capteur est composé d'une source LED de lumière visible qui traverse la conduite et de deux détecteurs. Un rayon lumineux LED est envoyé sur deux photodiodes dont l'espacement est connu.

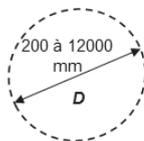
La méthode de détection est basée sur la scintillation de la lumière (phénomène semblable à la phosphorescence ou à la fluorescence) en réponse aux variations de la densité du gaz qui sont dues aux changements de température et à la turbulence de l'écoulement. La scintillation produit un schéma caractéristique sur le premier faisceau qui est ensuite retrouvé sur le deuxième. On réalise alors un calcul de corrélation afin d'avoir accès au temps de vol entre les deux détecteurs, donnant alors accès à la vitesse de l'écoulement.



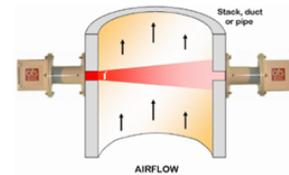
On en déduit la vitesse : $v = \frac{L}{T_{max}}$



Conditions d'installation et mise en œuvre – Informations fournisseurs



Technologie ne nécessitant pas de longueur droite¹



Montage des sondes

¹ – En pratique, le fournisseur recommande 2D de longueur droite en amont et 1D en aval.



Avantages

- **Non intrusif et sans contact (placé derrière une vitre) :**
 - Durée de vie importante
 - Pas de perte de charge
 - Robustesse
 - Pas d'interaction entre les particules et l'appareil de mesurage
- **Mesure représentative de l'écoulement (mesurage sur toute la section)**
- **Technologie ne nécessitant pas de longueur droite**



Inconvénients

- **Besoin d'un fluide suffisamment transparent (opacité inférieure à 95%)**
- **Alignement optique nécessaire**
- **Sensibilité aux vibrations de la conduite**
- **Non certifié EN 14181 – QAL 1**
- **Coût élevé**

Vélocimètre par scintillation LED



Domaines d'application

Cette technologie a été conçue pour les mesurages de vitesses d'air en laboratoire (soufflerie) il y a une trentaine d'années puis elle a été adaptée au milieu industriel où elle commence à s'implanter dans les usines d'aluminium (au niveau de l'électrolyse, appelée « pot ») à Dunkerque chez Rio Tinto Alcan par exemple. Approuvée par l'agence de protection de l'environnement américaine, son usage s'est diversifié aux mesurages de vitesses de gaz industriels (gaz de torchère, etc.). Plusieurs modèles existent en fonction des différentes applications possibles.



Taux de diffusion en milieu industriel



Mature mais un unique fabricant – technologie encore méconnue
NON Certifié ISO 14181- QAL 1 mais approuvé par l'agence de protection de l'environnement américaine (Méthode 14)



Conditions d'utilisation et performances

Type de fluide	Chargé	Condensation
	Jusqu'à 100 mg/m ³ ✓	✓
	ATEX Certification non proposée par le seul fournisseur ✗	Corrosif ✓
Gamme de mesure	Température: 0,1 m/s à 850 °C	
	Vitesse: 0,1 m/s à 50 m/s	



Qualité du mesurage ++

Cette technique offre une mesure satisfaisante.

Valeurs théoriques	Résolution	0,1 m/s
	Reproductibilité	1%



Coût hors installation ☹️



Achat
Maintenance
Etalonnage

- Nettoyage annuel des vitres
- Pas de nécessité d'installer un système de rétro-soufflage
- Maintenance préventive tous les 2 ans



Facteurs d'influence – Mesurages additionnels

Composition du gaz, température et pression dans le cadre du calcul du débit normal à partir de la vitesse moyenne



Principaux fournisseurs

Un seul fournisseur : OSI (OFS 2000-W)

Vélocimètre par corrélation infrarouge

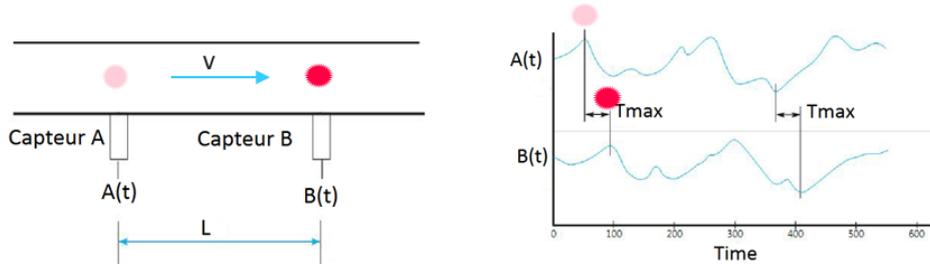
VITESSE	DEBIT
MONO-POINT	MOYENNEUR
PONCTUELLE	CONTINUE



Principe de fonctionnement

La méthode utilisée est semblable par principe à la technique de mesure du débit par l'injection de colorant chimique ou de traceurs radioactifs, où la vitesse est dérivée du temps de transport du traceur entre deux points de mesure dont la distance est connue.

Au lieu d'un traceur artificiel ajouté, la turbulence naturelle du flux de gaz est utilisée comme traceur. Cette turbulence de l'écoulement provoque des fluctuations du rayonnement infrarouge émis par le gaz. Cette variable est contrôlée en continu par deux capteurs infrarouges montés généralement avec 1m de séparation dans le sens du flux gazeux. Une électronique de corrélation est utilisée pour comparer en permanence les deux signaux de capteurs afin de déterminer le délai de transport entre eux imposé par la vitesse du gaz.

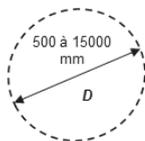


On en déduit la vitesse :
$$v = \frac{L}{T_{max}}$$

Il n'y a pas d'interaction entre les sondes et le flux puisqu'elles sont protégées par une vitre.



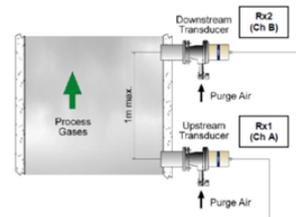
Conditions d'installation et mise en œuvre – Informations fournisseurs



Les deux sondes doivent être séparées de 50 cm à 1 m.



Technologie ne nécessitant pas de longueur droite¹



Montage des sondes

¹ – En pratique, le fournisseur recommande 1 D de longueur droite en amont et en aval.



Avantages – retours fournisseur

- **Non intrusif et sans contact :**
 - Durée de vie importante
 - Pas de perte de charge
 - Robustesse
 - Pas d'interaction entre les particules et l'appareil de mesure
- **Technologie ne nécessitant pas de longueur droite**
- **Coût modéré**



Inconvénients – retours fournisseur

- **Pas de condensation permise sur les vitres protégeant les sondes**
- **Limite en termes de température ambiante (max. 50°C)**
- **Certification uniquement sur 3-50 m/s**
- **Calibrage et paramétrage nécessaires fréquents (dérivation : 0,1 m/s par mois)**

Vélocimètre par corrélation infrarouge



Domaines d'application

Cette technologie a été spécifiquement développée pour des mesurages de vitesse des gaz de combustion. L'instrument a été installé pour des mesurages d'effluents en cimenterie (cimenterie Cemex en Espagne) mais également en aciérie.



Taux de diffusion en milieu industriel



Mature mais un unique fabricant – technologie encore méconnue

Certifié ISO 14181- QAL 1



Conditions d'utilisation et performances

Type de fluide

Chargé Jusqu'à 100 mg/m³



Condensation



La condensation sur les vitres peut fausser le mesurage.

ATEX Certification non proposée par le seul fournisseur



Corrosif



Gamme de mesure

Température



Une limite basse de température existe pour obtenir un rayonnement infrarouge suffisant.

Vitesse



Qualité du mesurage ++

Cette technique offre une mesure satisfaisante mais sensible à la condensation.

Valeurs théoriques

Résolution	0,1 m/s
Reproductibilité	1,8%



Coût hors installation ...



Achat

Maintenance

Etalonnage

- Nettoyage périodique (à l'arrêt) ou rétro-soufflage (en fonctionnement)

- Renouvellement du filtre à air du système de rétro-soufflage

- Tous les 3 ans minimum (vérification du paramétrage, dérivation : 0,1 m/s par mois)

- Envoi de l'appareil au Royaume-Uni pour réparation (un seul fournisseur basé au Royaume-Uni)



Facteurs d'influence – Mesurages additionnels

- Composition du gaz, température et pression dans le cadre du calcul du débit normal à partir de la vitesse moyenne



Principaux fournisseurs

QAL 1 : Codel international (VCEM 5100 flow monitor)

Vélocimètre à effet Vortex

VITESSE

DEBIT

MONO-POINT

MOYENNEUR

PONCTUELLE

CONTINUE



Principe de fonctionnement

Le vélocimètre à effet Vortex est basé sur la génération de tourbillons lors du passage d'un obstacle. Effectivement, lorsque le fluide arrive sur un corps non profilé, il se divise en créant de petits tourbillons (appelés vortex alternés) qui créent des zones de pression variables détectées par un capteur. La fréquence de génération de ces vortex est directement liée à la vitesse du fluide.

Ces décollements peuvent être enregistrés par une grande variété de capteurs :

- Capteurs de pression
- Thermistors
- Capteurs à ultrason placés juste derrière l'objet créant les fluctuations

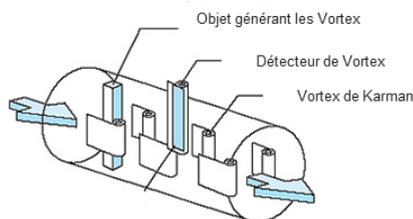


Schéma du dispositif Vortex et illustration des Vortex

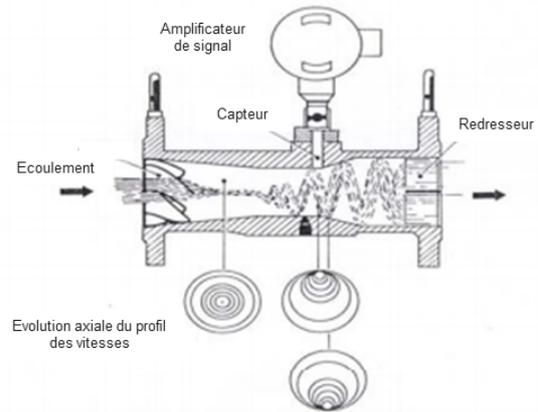
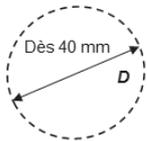


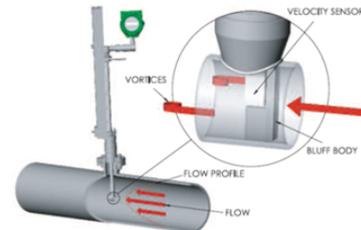
Schéma du dispositif Vortex et évolution axiale du profil des vitesses



Conditions d'installation et mise en œuvre – Informations fournisseurs



Technologie nécessitant un régime établi (besoin de longueur droite)¹



¹ – Ecoulement stable, symétrique et sans giration : profil des vitesses bien développé



Avantages

- Pas de pièces en mouvement
- Maintenance très faible : peu de nettoyage nécessaire car les dépôts n'influencent pas la mesure
- Reproductibilité importante



Inconvénients

- Plage de vitesse limitée : exige une vitesse minimum pour que l'écoulement soit turbulent
- Pertes de charge
- Sensibilité de la mesure aux vibrations de la conduites (induites par un surpresseur par exemple)
- Réétalonnage en usine obligatoire – pas de réparation sur site (onéreux – 3000 €)
- Coûts élevés

Vélocimètre à effet Vortex



Domaines d'application

Les vélocimètres à effet Vortex sont adaptés pour les fluides sous forme liquide, gazeuse et plus particulièrement les mesurages de débit de vapeur. Ils peuvent être utilisés pour les mesurages de fumées, d'alimentation en biogaz, en milieu industriel.



Taux de diffusion en milieu industriel



Mature – assez répandu

NON Certifié ISO 14181 - QAL 1



Conditions d'utilisation et performances

Type de fluide	Chargé	✓	Certification fournisseurs optionnelle selon les	Condensation	✓
	ATEX	✓		Corrosif	✓
Gamme de mesure	Température			La limitation n'est pas tant la vitesse que le régime de l'écoulement – dépendant de la vitesse et du diamètre.	
	Vitesse				



Qualité du mesurage ++

Cette technique offre une mesure satisfaisante.

Valeurs théoriques	Résolution	0,1 m/s
	Reproductibilité	0,2%



Coût hors installation ...



Etalonnage Maintenance Achat

- Nettoyage de la sonde
- Calibrage tous les 18 à 24 mois (renvoi du matériel en usine)



Facteurs d'influence – Mesurages additionnels

- Capteur d'enregistrement des tourbillons utilisé
- Composition du gaz, température et pression dans le cadre du calcul du débit normal à partir de la vitesse moyenne



Principaux fournisseurs

Vortek, Hontzsch, Endress + Hauser, Sierra instrument, Siemens, Khrono, ABB

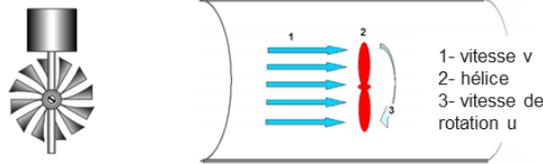
Vélocimètre à turbine à insertion Anémomètre à hélices

VITESSE	DEBIT
MONO-POINT	MOYENNEUR
PONCTUELLE	CONTINUE



Principe de fonctionnement

Un rotor à ailettes dont l'axe coïncide avec celui du débit circulant dans la turbine est mis en rotation par l'action du fluide. Le passage des pales devant un capteur crée un signal dont la fréquence est directement proportionnelle au débit. La vitesse mesurée est une vitesse ponctuelle.



$$v = f u + c$$

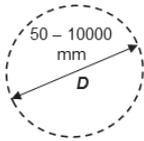
Où f et c sont des valeurs spécifiques de l'anémomètre déterminées par étalonnage, u la vitesse de rotation de l'hélice et v la vitesse de l'écoulement.

Schémas de turbines à insertion

On trouve généralement le terme **d'anémomètre à hélices** pour désigner cette technologie.



Conditions d'installation et mise en œuvre – Informations fournisseurs



Technologie nécessitant un régime établi (besoin de longueur droite)¹



Anémomètre à hélice et son transmetteur

Nombre et position des points de mesure (points de prise de pression) dans la conduite suivant les règles générales ou tangentielles pour les tubes mono-points utilisés pour réaliser des cartographies ou comme SRM (Cf. ANNEXES 2 et 3).

Dans le cas de faible diamètre, il est possible d'utiliser des anémomètres qui s'insèrent dans toute la largeur de la section : aucune longueur droite n'est alors nécessaire.



Anémomètre à hélice sur toute la section – Mesure moyenne

¹ – Ecoulement stable, symétrique et sans giration : profil des vitesses bien développé



Avantages

- Facilité de mesure
- Mobilité de l'appareil



Inconvénients

- Pièces en mouvement : maintenance importante (risque de grippage)
- Sensibilité aux chocs
- Détérioration en cas de survitesse et en cas de changement de phase du fluide
- Nécessité de fluides propres (filtrage en amont à 150 μm)

Vélocimètre à turbine à insertion Anémomètre à hélices



Domaines d'application

Les turbines à hélices sont plus fréquemment utilisées dans les laboratoires ou pour des mesurages ponctuels de contrôle sur des infrastructures industrielles.
Elles sont plus rarement utilisées pour des mesurages continus en milieu industriel (pour des gaz de combustion).



Taux de diffusion en milieu industriel



Mature et répandu pour les mesurages de contrôle
NON Certifié ISO 14181 - QAL 1 mais certifié SRM (EN 16 911-1)



Conditions d'utilisation et performances

Type de fluide	Chargé Filtrage en amont à 150 µm	Condensation
	 ATEX Certification optionnelle selon les fournisseurs	 Corrosif <i>Contact direct – matériau adéquat</i> <i>Attention les ailettes peuvent être fines et sensibles à la corrosion</i>
Gamme de mesure	Température	450 °C
	Vitesse	0,5 m/s → 50 m/s

Seuil de vitesse basse



Qualité du mesurage ++

Cette technique offre une mesure moins satisfaisante s'il y a risque d'encrassement de l'instrument notamment.

Valeurs théoriques	Résolution	0,1 m/s
	Reproductibilité	0,05%



Coût hors installation ...



Achat
Maintenance
Etalonnage

- Nettoyage périodique des filtres
- Usure mécanique des pièces mobiles
- Renouvellement du filtre à air du système de rétro-soufflage
- Etalonnage en soufflerie au préalable



Facteurs d'influence – Mesurages additionnels

- Angle entre la vitesse et la sonde
- Composition du gaz, température et pression dans le cadre du calcul du débit normal à partir de la vitesse moyenne



Principaux fournisseurs

Testo, Honzstch, Spirax sarco, Vortek instrument, Omega engineering

F. Conclusions et comparaison des technologies

Ce rapport, via les rappels théoriques et pratiques et les fiches descriptives des techniques, vise à mettre en lumière différents points de vigilance et les bonnes pratiques permettant à tout opérateur d'obtenir un mesurage le plus fiable possible du débit ou de la vitesse des gaz de combustion ou des gaz de process dans les installations de traitement des déchets et de biogaz. Ce rapport a également pour objectif de faciliter le choix d'un appareil de mesurage adapté, dans un contexte où les informations fournisseurs ne sont pas toujours faciles à interpréter.

10 techniques de mesurage ont été identifiées et sont décrites dans ce rapport, permettant chacune de répondre à des besoins spécifiques, pour des prix de l'appareil variant de quelques milliers d'euros à 30 k€.

Les techniques les plus répandues sont le tube Pitot, le débitmètre à ultrasons et également le débitmètre massique thermique. Des méthodes telles que la corrélation laser, infra-rouge ou encore à scintillation LED sont encore méconnues mais commercialisées depuis plusieurs années. Il est intéressant de noter que peu de nouvelles techniques sont actuellement en développement, les innovations se concentrant majoritairement sur l'optimisation de méthodes déjà existantes.

Pour l'ensemble des techniques, il est essentiel d'avoir conscience de l'influence de la température, de la pression, ou encore de la composition du gaz sur le mesurage du débit. De plus, l'emplacement du mesurage doit respecter plusieurs critères afin d'obtenir une mesure avec la plus faible incertitude possible. On notera donc les recommandations en termes de longueurs droites permettant de réaliser un mesurage sur un profil des vitesses stable et symétrique pour la plupart des techniques : 25D en amont et 5D en aval. Seules deux techniques permettent de s'affranchir de ces longueurs droites car ne nécessitant pas de régime établi : la vélocimétrie à scintillation LED et la vélocimétrie à corrélation Infrarouge.

En outre, pour les mesurages ponctuels sur une section droite (tube Pitot S ou L, débitmètre massique thermique ou encore anémomètre à hélice), il est important de réaliser le mesurage en un point représentatif de la vitesse (en un point où la valeur de la vitesse est égale à la vitesse moyenne débitante sur la section). En présence d'un régime turbulent – ce qui est a priori toujours le cas dans le cadre de cette étude –, ce point se situe à une distance du bord du conduit égale à 12% du diamètre. Ces éléments ainsi que les propriétés de fiabilité inhérentes à l'appareil permettent l'accès à une valeur de vitesse/débit la plus fiable possible.

Enfin, le choix d'un appareil de mesurage par rapport à un autre pourra se faire en fonction des paramètres du fluide (vitesse minimale, humidité ou présence de particules par exemple), de la certification QAL1 ou ATEX, ou encore du diamètre de la conduite. Le tableau suivant permet la comparaison des 10 techniques identifiées en fonction de ces différents critères.

Tableau de comparaison des techniques de mesure de vitesses et de débits gazeux

	Tube de Pitot	Vélocimètre à ultrasons	Débitmètre massique thermique	Vélocimètre à effet Vortex	Organes déprimogènes	Micro - Venturi	Vélocimètre à scintillation LED	Vélocimètre à corrélation I.R.	Vélocimètre à corrélation Laser	Anémomètre à hélices
Mesure Continue (C) ou Ponctuelle (P)	C ou P	C	C ou P	C	C	C	C	C	C	C ou P
Méthode de référence / Certification QAL1	QAL1 SRM*	QAL1	QAL1	✘	✘	✘	✘	QAL1	✘	SRM*
Tolère l'humidité	≈	✓	✘	✓	≈	✓	✓	✘	≈	✘
Tolère les fluides chargés en particules	≈	✓	≈	✓	≈	≈	✓	✓	≈	≈
Contraintes particulières de température	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	40°C minimum	100°C maximum	NA
ATEX	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✘	✘	✓	✓
Longueurs droites requises	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	NON	NON	OUI	OUI
Diamètre le plus adapté	Petit à moyen	Moyen à grand	Petit à moyen	Petit à moyen	Petit à grand	Moyen à grand	Moyen à grand	Moyen à grand	Petit à moyen	Petit à moyen
Compatible avec mesures basse vitesse (< 5 m/s)	✘	✓	≈	✓	✘	✘	✓	≈	✓	≈
Pertes de charges induites	Faibles à moyenne	Aucune	Aucune	Faibles à moyenne	Importantes	Faibles à moyenne	Aucune	Aucune	Aucune	Faibles à moyenne
Qualité de la mesure pour de l'autosurveillance	++	+++	+	++	+++	++	++	++	++	+
Mesure mono-point (M-P) ou moyennée (MOY)	M-P ou MOY	MOY	M-P ou MOY	M-P	MOY	M-P	MOY	MOY	M-P	M-P ou MOY
Coût	1 - 7 k€	5 - 20 k€	5 - 10 k€	20 k€	2 k€	2 k€	20 k€	5 k€	30 k€	3 - 20 k€

* SRM = Méthode de référence normalisée selon l'EN 16911

ATEX

✓ Proposée en option
✘ Non proposée par les fournisseurs identifiés

Température

NA : température limitée uniquement par les matériaux utilisés

Diamètre

Petit : < 100 mm
Moyen : qqs centaines de mm
Grand : > 2 m

Qualité de la mesure

+ : Mesure peu satisfaisante
++ : Mesure satisfaisante
+++ : Mesure très satisfaisante

ANNEXES

1. Reproductibilité

La reproductibilité est déterminée au moyen de deux AMS (*Automatic Monitoring Systems*) identiques fonctionnant en parallèle. Elle fait partie des caractéristiques de performance d'un AMS permettant de décrire la tolérance de production spécifique à cet AMS.

La reproductibilité est calculée à partir des signaux de sortie moyennés toutes les demi-heures (valeurs brutes exprimées sous la forme de valeurs analogiques ou numériques) pendant l'essai sur site d'une durée de trois mois.

À la fin de l'essai sur site, la reproductibilité doit être calculée sur la base de toutes les paires de valeurs valides, c'est-à-dire les signaux mesurés concentrés de l'AMS, recueillis pendant la totalité de la période de l'essai sur site sur les deux AMS, conformément à l'équation (10) en utilisant l'écart-type de la différence des mesurages par paires tel qu'indiqué par l'équation (11) et avec une confiance statistique de 95 % pour la distribution t (bilatéral) :

$$R_f = t_{n-1; 0,95} \times s_D \quad (10)$$

$$s_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{1,i} - x_{2,i})^2}{2n}} \quad (11)$$

où :

R_f est la reproductibilité en conditions sur site ;

$t_{n-1; 0,95}$ est le facteur de Student t bilatéral à un niveau de confiance de 95 % avec un nombre de degrés de liberté $n-1$;

s_D est l'écart-type obtenu à partir de mesurages par paires ;

$x_{1,i}$ est le i^{e} signal mesuré du premier système de mesure ;

$x_{2,i}$ est le i^{e} signal mesuré du deuxième système de mesure ;

n est le nombre de mesurages parallèles.

Note : La notion de reproductibilité combine les écarts de mesure entre deux systèmes de mesure et leur répétabilité.

2. Contexte normatif

Les modalités de surveillance des rejets atmosphériques par des AMS (*Automatic Monitoring Systems*, systèmes automatiques de mesure, nommés aussi en Grande-Bretagne CEMS : *Continuous Emissions Monitoring Systems*) sont encadrées par la réglementation. Afin de connaître les quantités de polluants rejetés dans l'atmosphère, il est nécessaire de connaître la composition chimique des fumées mais aussi son débit. Le mesurage de débit a été standardisé avec l'entrée en vigueur de la norme EN 16911. La norme EN 15 259 fixe les exigences relatives aux sections et aux sites de mesure et relatives à l'objectif, au plan et au rapport de mesure. Les normes EN 15 267 et EN 14 181 décrivent quant à elles respectivement le processus de certification des AMS et les procédures d'assurance qualité à mettre en œuvre pour l'obtention de mesures de qualité.

a. Norme EN 15 259 : Emissions de sources fixes — Exigences relatives aux sections et aux sites de mesure et relatives à l'objectif, au plan et au rapport de mesure

Dans cette norme, on retrouve les prescriptions pour le choix des sections de mesure et notamment les exigences de longueurs droites évoquées dans les parties C et D de ce rapport. La norme décrit également les dispositions à prendre pour la préparation de campagnes de mesure, sa réalisation et le reportage des résultats.

b. EN 16911 : Emission de sources fixes – Détermination manuelle et automatique de la vitesse et du débit-volume d'écoulements dans les conduits

i. EN 16911-1

Cette section de la norme décrit les SRM (méthode de référence normalisée) utilisées par les organismes de contrôle et d'étalonnage des AMS. **Cela ne concerne pas l'industriel réalisant le mesurage de vitesse ou débit sur ses installations mais l'organisme qui intervient lors des étalonnages et des vérifications.**

Les objectifs de mesure des SRM comprennent :

1. Le mesurage de la vitesse en un point donné du conduit ; il peut être nécessaire dans le cadre d'une autre méthode de mesure, par exemple pour assurer un échantillonnage isocinétique des particules ;
2. Le mesurage du profil de vitesse dans un plan donné du conduit ;
3. La détermination des girations ;
4. L'étalonnage d'un AMS mesurant le débit ; cet étalonnage peut se faire par le débit-volume ou la vitesse ;
5. La détermination périodique du débit-volume passant par un plan de mesure.

Les méthodes de référence normalisées (SRM) pour atteindre ces objectifs sont les suivantes :

- Le tube Pitot (remplace la norme ISO 10 780 sur les bonnes pratiques de mesures de vitesse à l'aide d'un tube Pitot) ;
- L'anémomètre à hélice ;
- Méthode par traçage ;
- Méthode de calcul de débit par consommation d'énergie.

L'organisme peut s'aider du tableau suivant pour effectuer son choix parmi ces techniques :

But du mesurage	Techniques adaptées pour effectuer le mesurage
Mesurage de la vitesse en un point donné	Mesurage en plusieurs points : - dispositifs de mesurage de la pression différentielle - anémomètre à hélice
Détermination des girations au niveau du plan de mesurage	Dispositif de mesurage de la pression différentielle capable de déterminer la direction de la vitesse - Pitot de type S - Pitot 3D ou 2D
Mesurage périodique de la vitesse moyenne dans le conduit	Mesurages de la vitesse en plusieurs points par quadrillage du plan de mesurage Technique de dilution d'un traceur Technique du temps de transit d'un traceur Méthode de calcul basée sur la consommation d'énergie
Étalonnage d'un AMS mesurant la vitesse ou le débit-volume moyen	Mesurages de la vitesse en plusieurs points par quadrillage du plan de mesurage Technique de dilution d'un traceur Technique du temps de transit d'un traceur

Tableau 7 : Choix d'un SRM, source : EN 16 911-1

Dans cette section, on trouve également des critères de performance que doivent respecter les SRM utilisés par les organismes de contrôle. Ne concernant que l'organisme de contrôle, ces critères ne sont pas détaillés dans cette étude.

ii. EN 16911-2

Cette section spécifie les conditions et les critères de choix, de montage, de mise en service et d'étalonnage des systèmes automatiques de mesurages ou AMS conformément aux niveaux d'assurance qualité QAL 1, 2 et 3 évoqués dans la norme EN 14181. **Cette partie concerne donc directement l'industriel puisqu'il s'agit des performances que son appareil doit respecter.**

Les caractéristiques de performance pertinentes de l'AMS doivent être documentées par le fabricant et/ou son représentant européen par des essais d'aptitude à l'emploi. **Un certificat QAL 1 est alors délivré lorsque l'AMS respecte les critères suivants :**

Caractéristique de performance	Critères de performance
Temps de réponse	≤ 60 s
Écart-type de répétabilité au point de référence inférieur	$\leq 2,0$ % ^a
Écart-type de répétabilité au point de référence supérieur	$\leq 2,0$ % ^a
Ecart de linéarité	$\leq 3,0$ % ^a
Décalage du point de référence inférieur pour une variation de température ambiante de 20 °C dans l'intervalle spécifié	$\leq 5,0$ % ^a
Décalage du point de référence supérieur pour une variation de température ambiante de 20 °C dans l'intervalle spécifié	$\leq 5,0$ % ^a
Influence de la tension à + 15 % et à - 10 % de la tension nominale d'alimentation électrique	$\leq 2,0$ % ^a
Influence des vibrations	$\leq 2,0$ % ^a
Contrôle QAL3	Positif ^b
Contrôle de linéarité	Positif ^b
^a Valeur en pourcentage de la limite supérieure de la gamme de certification.	
^b Le laboratoire d'essai doit évaluer la possibilité de mettre en œuvre le mode opératoire d'essai comme décrit ci-dessous dans le présent paragraphe.	

Tableau 8 : Critères de performance de l'AMS pour des essais en laboratoire, source : INERIS

L'AMS doit également respecter des critères de performance sur site :

Caractéristique de performance	Critères de performance
Coefficient de détermination de la fonction d'étalonnage, R ²	$\geq 0,90$
Temps de réponse	≤ 60 s
Période de fonctionnement sans surveillance (intervalle de maintenance)	≥ 8 jours
Dérive du point de référence inférieur dans l'intervalle de maintenance	$\leq 2\%$ ^a
Dérive du point de référence supérieur dans l'intervalle de maintenance	$\leq 4\%$ ^a
Disponibilité	≥ 95 %
Reproductibilité, R _f	$\leq 3,3$ %
^a Valeur en pourcentage de la limite supérieure de la gamme de certification.	

Tableau 9 : Critères de performance de l'AMS sur site source : INERIS

Note : A partir des caractéristiques de performance de l'AMS, l'exploitant peut vérifier que l'incertitude de l'AMS calculée dans les conditions du site est inférieure à l'exigence réglementaire.

L'AMS doit faire l'objet d'un étalonnage par comparaison avec une méthode de référence par un organisme de contrôle. Son bon fonctionnement est préalablement contrôlé et la conformité à l'incertitude réglementaire est vérifiée (**QAL 2**).

Enfin, au plus tard le lendemain de l'opération QAL 2 l'exploitant doit faire en sorte de lancer l'opération **QAL 3** de contrôle de dérive de l'AMS selon une fréquence correspondant au moins à l'intervalle de maintenance défini lors de sa certification.

c. Norme EN 14 181 : Emission de sources fixes – Assurances qualité des systèmes automatiques de mesurage (AMS) – Suivi des dispositifs utilisés en auto surveillance

Cette norme définit 4 niveaux d'assurance qualité :

- **QAL 1** : Certification réalisée par un organisme indépendant selon l'EN 15267 pour vérifier l'aptitude de l'AMS à satisfaire les exigences en termes d'incertitudes. A partir des caractéristiques de performance de l'AMS, l'exploitant peut vérifier que l'incertitude de l'appareil calculée dans les conditions du site est inférieure à l'exigence réglementaire,
- **QAL 2** : Opération pilotée par un organisme de contrôle. Vérification du bon fonctionnement de l'AMS et des dispositions prises par l'exploitant pour son bon fonctionnement et sa maintenance. Etalonnage par rapport à une méthode de référence (SRM), test de variabilité pour vérifier la conformité à l'incertitude requise par la réglementation et détermination du domaine de validité de la fonction d'étalonnage
- **QAL 3** : Evaluation de la dérive et de la fidélité de fonctionnement réalisée par l'exploitant,
- **AST** : Surveillance annuelle par un organisme de contrôle pour évaluer que la fonction étalonnage et que la variabilité de l'instrument reste conforme.

	Protocole	Description	Entité en charge	Périodicité
	QAL 1 Evaluation de l'aptitude de la méthode de mesurage	Examen de conformité de l'AMS vis-à-vis de la norme EN 16911	Certification réalisée par un organisme accrédité à la demande d'un fournisseur.	A la demande du fournisseur ou à l'installation d'un nouvel AMS.
	QAL 2 Etalonnage des AMS	Vérification du bon fonctionnement de l'appareil . Validation et étalonnage des analyseurs par comparaison aux SRM. Evaluation du respect des exigences d'incertitude.	Tests réalisés par un organisme accrédité	La périodicité varie en fonction de l'installation et de la modification des gaz (par exemple tous les 3 à 5 ans).
	QAL 3 Suivi de la qualité des mesurages	Vérification du bon fonctionnement.	Tests réalisés par les exploitants qui doivent présenter leurs résultats pour validations aux laboratoires accrédités lors des AST.	Périodicité selon la certification QAL 1 de l'appareil.
Echec de l'AST	AST Test de surveillance annuel	Vérification du bon fonctionnement et de l'étalonnage de l'appareil et validation de la conformité de l'AMS avec une SRM.	Tests réalisés par un organisme accrédité.	Annuelle.

Figure 15 : Protocoles d'assurance qualité de la norme EN 14181

d. Exemple de fiche certification QAL 1 – Vélocimètre à ultrasons PCME

Umwelt Bundesamt		Certificate: 0000050627 / 25 April 2016		TÜVRheinland® Precisely Right.	
Calculation of overall uncertainty according to EN 14181 and EN 15267-3					
Measuring system					
Manufacturer		PCME Ltd.			
AMS designation		STACKFLOW 200			
Serial number of units under test		TÜV 1 TÜV 2 / TÜV 3 TÜV 4			
Measuring principle		Differential pressure			
Test report		936/21228880/A			
Test laboratory		TÜV Rheinland			
Date of report		2015-10-12			
Measured component		Velocity			
Certification range		2 - 30 m/s			
Calculation of the combined standard uncertainty					
Tested parameter				u²	
Standard deviation from paired measurements under field conditions *	u _D	0.252 m/s		0.064 (m/s) ²	
Lack of fit	u _{lof}	-0.173 m/s		0.030 (m/s) ²	
Zero drift from field test	u _{d,z}	0.121 m/s		0.015 (m/s) ²	
Span drift from field test	u _{d,s}	0.156 m/s		0.024 (m/s) ²	
Influence of ambient temperature at span	u _t	0.070 m/s		0.005 (m/s) ²	
Influence of supply voltage	u _v	0.023 m/s		0.001 (m/s) ²	
Uncertainty of reference material at 70% of certification range	u _m	0.242 m/s		0.059 (m/s) ²	
* The larger value is used : "Repeatability standard deviation at set point" or "Standard deviation from paired measurements under field conditions"					
Combined standard uncertainty (u _c)		$u_c = \sqrt{\sum (u_{max,i})^2}$		0.44 m/s	
Total expanded uncertainty		U = u _c * k = u _c * 1.96		0.87 m/s	
Relative total expanded uncertainty		U in % of the range 30 m/s		2.9	
Requirement of 2010/75/EU		U in % of the range 30 m/s		10.0 **	
Requirement of EN 15267-3		U in % of the range 30 m/s		7.5	
** The EU-directive 2010/75/EU on industrial emissions provides no requirements for this component. A value of 10.0 % was used for this.					

Figure 16 : Fiche certification QAL 1, Ultrasons PCME

3. Tube Pitot et anémomètre à hélices – Nombre et positions des points de mesurage

Lorsque le tube Pitot ou l'anémomètre à hélice est utilisé comme méthode de référence – SRM – ou bien pour réaliser une cartographie du profil des vitesses, le nombre et la position des points de mesurages sont documentés (Norme ISO 10 780 puis remplacée par la norme EN 16911-1).

Deux règles peuvent s'appliquer : les règles générales ou bien les règles tangentielles.

Diamètre D du conduit (m)	Nombre minimum de points par diamètre	Distance relative des points par rapport à la paroi (en % D)
$0,3 < D < 0,7$	3	11,3 50,0 88,7
$0,7 < D < 1,0$	5	5,9 21,1 50,0 78,9 94,1
$1,0 < D < 2,0$	7	4,0 13,3 26,0 50,0 74,0 86,7 96,0
$2,0 > D$	9	3,0 9,8 17,8 29,0 50,0 71,0 82,2 90,2 97,0

Tableau 1 : Exploration des conduits circulaires selon la norme ISO 10780 dans le cas de l'application de la règle générale

Diamètre D du conduit (m)	Nombre minimum de points par diamètre	Distance relative des points par rapport à la paroi (en % D)
$0,3 < D < 0,7$	2	14,6 85,4
$0,7 < D < 1,0$	4	6,7 25,0 75,0 93,3
$1,0 < D < 2,0$	6	4,4 14,6 29,6 70,4 85,4 95,6
$2,0 > D$	8	3,3 10,5 19,4 32,3 67,7 80,6 89,5 96,7

Tableau 2 : Exploration des conduits circulaires selon la norme ISO 10780 dans le cas de l'application de la règle tangentielle

Figure 17 : Exploration des conduits circulaires selon la norme ISO 10780 dans le cas de l'application de la règle générale ou tangentielle

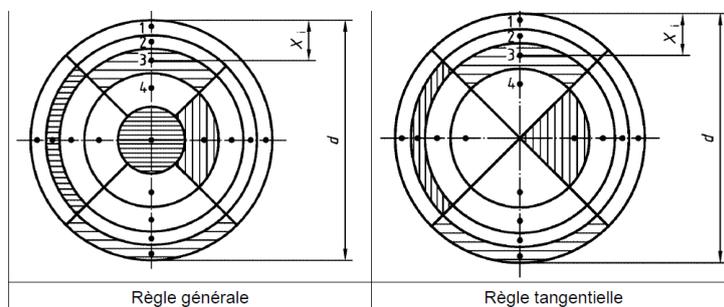


Figure 18 : Position des points dans la section de mesurage, cas circulaire

Des règles existent également pour les sections rectangulaires :

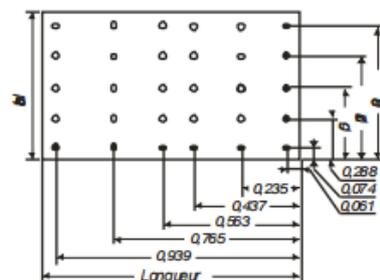


Figure 19 : Position des points dans la section de mesurage, cas rectangulaire

4. Informations relatives aux Organes Déprimogènes

a. Contexte normatif des organes déprimogènes

Les normes EN 1567 et 1558 encadrent le mesurage de vitesse à l'aide d'organes déprimogènes. Elles décrivent la géométrie (coefficient β), les diamètres des conduites, les nombres de Reynold, etc.

	DN LIMITES UTILISATION	$\beta = d/D$	NOMBRE DE REYNOLDS *	PERTE DE CHARGE RESIDUELLE	LONGUEURS DROITES * AMONT - AVAL	PRECISION " P "
PLAQUE A ORIFICE A BORD DROIT	$50 \leq DN \leq 1000$	$0.1 \leq \beta \leq 0.75$	$ReD \geq 5000$	70 - 80 % of ΔP	22D - 6D	$1\% < P < 2\%$
PLAQUE A ORIFICE SEGMENTAIRE	$100 \leq DN \leq 350$	$0.3 \leq \beta \leq 0.8$	$ReD \geq 10000$	70 - 80 % of ΔP	22D - 6D	$1\% < P < 2\%$
PLAQUE A ORIFICE QUART DE CERCLE	$25 \leq DN \leq 750$	$0.25 \leq \beta \leq 0.6$	$250 \leq ReD \leq 3300$	70 - 80 % of ΔP	22D - 6D	$1\% < P < 2\%$
PLAQUE A ORIFICE MULTI-TROUS	$50 \leq DN \leq 1000$	$0.1 \leq \beta \leq 0.75$	$ReD \geq 5000$	70 - 80 % of ΔP	2D - 2D	$1\% < P < 2\%$
PLAQUE A ORIFICE A ENTREE CONIQUE	$25 \leq DN \leq 750$	$0.1 \leq \beta \leq 0.316$	$25 \leq ReD \leq 60000$	70 - 80 % of ΔP	22D - 6D	$1\% < P < 2\%$
PLAQUE A ORIFICE EXCENTRIQUE	$100 \leq DN \leq 350$	$0.3 \leq \beta \leq 0.8$	$ReD \geq 10000$	70 - 80 % of ΔP	22D - 6D	$1\% < P < 2\%$
TUYERE ISA 1932	$50 \leq DN \leq 500$	$0.3 \leq \beta \leq 0.8$	$2 \times 10^4 \leq ReD \leq 10^7$	60 - 80 % of ΔP	14D - 6D	$1\% < P < 2\%$
TUYERE LONG RAYON	$50 \leq DN \leq 630$	$0.2 \leq \beta \leq 0.8$	$10^4 \leq ReD \leq 10^7$	60 - 80 % of ΔP	14D - 6D	$1\% < P < 2\%$
VENTURI CHAUDRONNE	$200 \leq DN \leq 1200$	$0.4 \leq \beta \leq 0.7$	$2 \times 10^5 \leq ReD \leq 2 \times 10^6$	5 - 20 % of ΔP	9D - 4D (depuis col)	$1\% < P < 2\%$
VENTURI USINE	$50 \leq DN \leq 250$	$0.4 \leq \beta \leq 0.75$	$2 \times 10^5 \leq ReD \leq 2 \times 10^6$	5 - 20 % of ΔP	9D - 4D (depuis col)	$1\% < P < 2\%$
VENTURI TUYERE	$65 \leq DN \leq 500$	$0.316 \leq \beta \leq 0.775$	$1.5 \times 10^5 \leq ReD \leq 2 \times 10^6$	5 - 20 % of ΔP	9D - 4D (depuis col)	$1\% < P < 2\%$
SECTION DE MESURE	$15 \leq DN \leq 50$	$0.1 \leq \beta \leq 0.7$	$ReD \geq 5000$	70 - 80 % of ΔP	18D - 8D	$1\% < P < 2\%$
INSTRUMENT A HAUTE PRECISION	$20 \leq DN \leq 200$	En accord avec Élément Primaire			18D - 8D	$P < 1\%$
TUBE DE PITOT	$DN \leq 100$		$ReD \geq 1.2 \times 10^4$	2 - 3 % of ΔP	8D - 6D	$P < 1\%$

* ReD est basé sur $\beta = 0.5$

* Les longueurs droites sont basées sur $\beta = 0.5$

* Obstacle : simple coude à 90°

Figure 20 : Critères issus des normes EN 1567 pour les organes déprimogènes, source : Deltafluid

De plus, cette norme décrit les longueurs droites en amont et en aval pour chacun des organes déprimogènes à respecter pour obtenir la précision souhaitée. Ci-dessous un exemple de tabulation de longueurs droites préconisées pour un tube Venturi de la société *Deltafluid* :

Valeurs exprimées en multiple de D

Rapport des $\frac{\phi}{D}$	EN AMONT DU PLAN DE LA PRISE DE PRESSION AMONT DU VENTURI										EN AVANT DU PLAN DE PRISE DE PRESSION AU COL						
	Coude ou té simple à 90°	Deux coudes ou plus à 90° dans le même plan		Deux coudes ou plus à 90° dans des plans différents		Réduction de 1,33D à D sur une longueur de 2,3D	Evasement de 0,67D à D sur une longueur de 2,5D	Réduction de 3D à D sur une longueur de 3,5D	Evasement de 0,75D à D sur une longueur de D	Robinet sphérique ou robinet à opercule grand ouvert	Logement de thermomètre de $\phi < 0,13 D$	Accessoires des colonnes 2 à 10					
β	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	11						
0,30	8	3	8	3	8	3	4	4	2,5	2,5	2,5	4	4				
0,40	8	3	8	3	8	3	4	4	2,5	2,5	2,5	4	4				
0,50	9	3	10	3	10	3	4	5	4	5,5	2,5	2,5	3,5	2,5	4	4	
0,60	10	3	10	3	10	3	4	6	4	8,5	2,5	3,5	2,5	4,5	2,5	4	4
0,70	14	3	19	3	19	3	4	7	5	10,5	2,5	5,5	3,5	5,5	3,5	4	4
0,75	16	8	22	8	22	8	4	7	6	11,5	3,5	6,5	4,5	5,5	3,5	4	4

Nota:
 Les longueurs droites minimales nécessaires sont des longueurs entre divers accessoires situés en amont ou en aval de l'élément primaire et l'élément primaire lui-même.
 Toutes les longueurs droites amont doivent être mesurées à partir du plan de la prise de pression amont du tube de venturi.
 Toutes les longueurs droites aval doivent être mesurées à partir du plan de la prise de pression au col du tube de venturi.
 Les valeurs de gauche dans les colonnes sont des valeurs pour une incertitude supplémentaire nulle (cf standard ISO 5167.4).
 Les valeurs de droite dans les colonnes sont des valeurs pour une incertitude supplémentaire de 0,5% (cf standard ISO 5167.4).

Figure 21 : Longueurs droites amont – aval d'un Venturi normé, source : Deltafluid

b. Pertes de charges tabulées des organes déprimogènes

Les pertes de charges résiduelles induites par l'utilisation d'organes déprimogènes sont tabulées en fonction du type d'appareil utilisé :

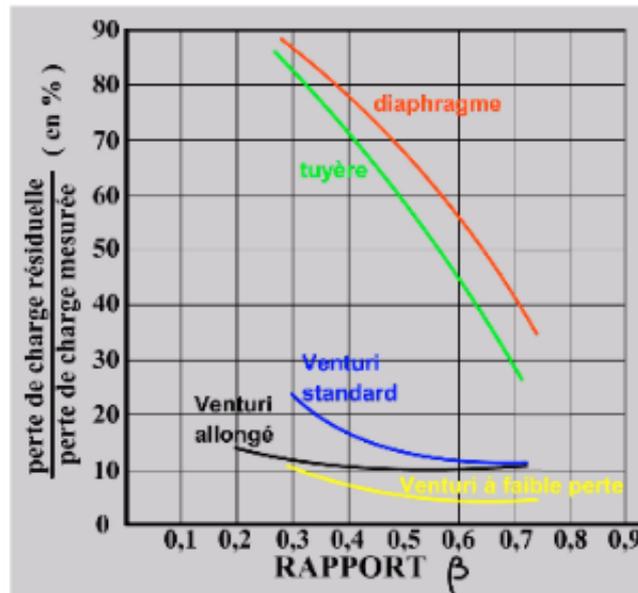


Figure 22 : Pertes de charges résiduelles en fonction de β pour divers types d'organes déprimogènes

5. Exemples de variations des longueurs droites en fonction du type d'obstacle

Il est conseillé de respecter 25 D de longueur droite en amont de la section de mesure et 5 D en aval. Cependant, ces distances peuvent être réduites en fonction du type d'obstacle (coude, rétrécissement, vanne, etc.). Certains fournisseurs proposent des guides, comme par exemple ci-dessous le tableau issu de la fiche technique du tube Pitot moyenné 5RD de la marque Fuji Electrics :

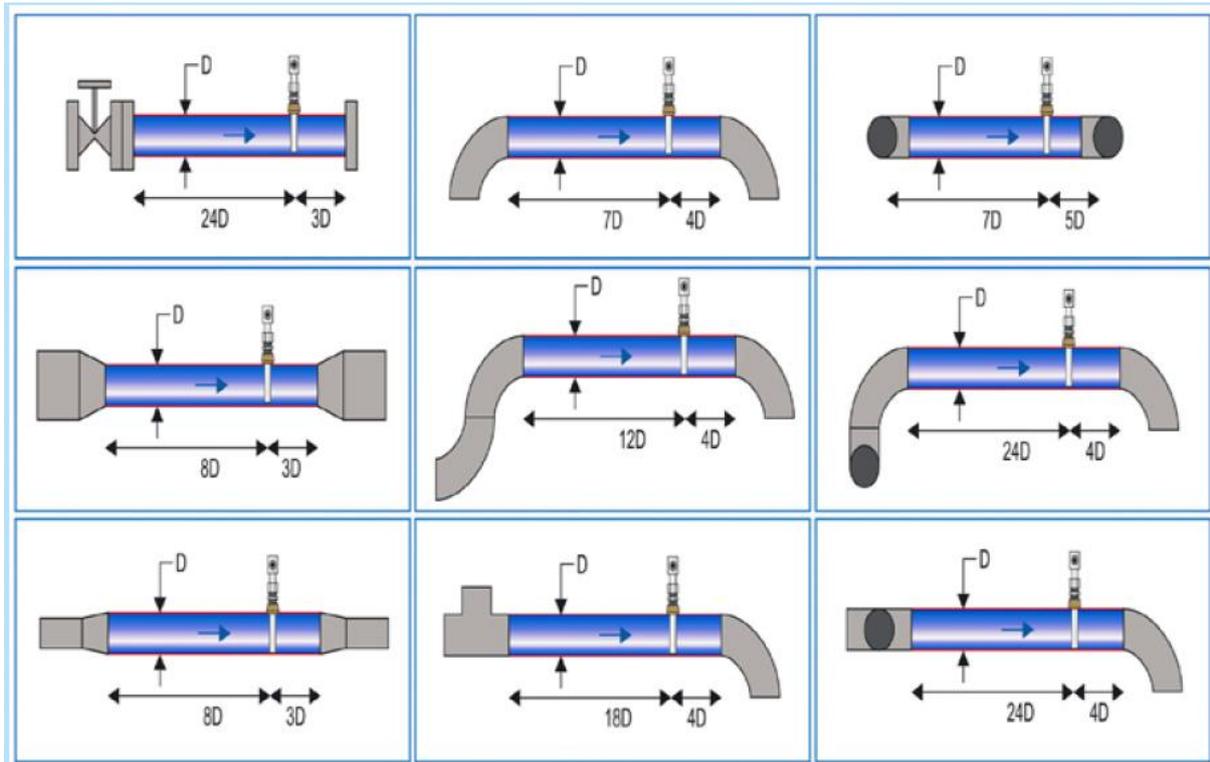


Figure 23 : Exemple de variation de longueur droite pour un tube Pitot moyenné Fuji Electric 5RD, source : Fuji Electric

6. Revue des technologies non-retenues

Compteurs volumétriques ou débitmètres à déplacement positif

VITESSE	DEBIT
MONO-POINT	MOYENNEUR
PONCTUELLE	CONTINUE



Principe de fonctionnement

Des chambres de volume défini, se remplissent et se vident alternativement du fluide à mesurer. L'écoulement provoque la mise en rotation d'un axe dont on compte les tours.

Le nombre de tours du mécanisme est proportionnel au volume écoulé.

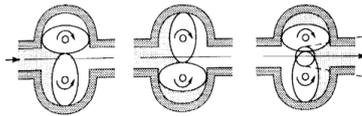
Les compteurs peuvent être:

- à pistons alternatifs ou rotatifs
- à engrenages
- à doubles roues
- à disques
- à membrane
- à palettes
- à vis

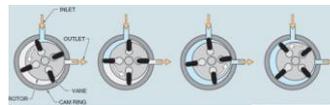
Ils induisent une perte de charge non négligeable (5-10 mbar). De plus un espace important est à prévoir (instrument encombrant et ayant une masse importante).



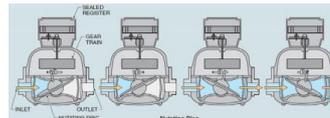
Compteurs à double roues



Compteurs à engrenages



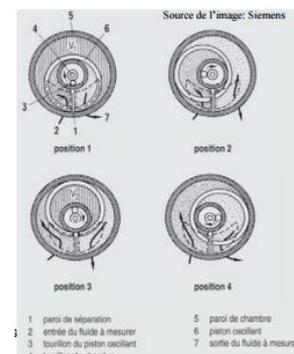
Compteurs à palettes



Compteurs à disques oscillants



Compteurs à vis



Compteurs à pistons rotatifs



Domaines d'application

Lorsqu'elle est employée avec des gaz, cette méthode est utilisée sur des gaz purs et propres, il s'agit souvent de mesurer les faibles débits d'alimentation des chaudières domestiques.

S'agissant d'une mesure par insertion (contrairement au piquage), les diamètres sont limités jusqu'à 600 mm pour la plupart des modèles.

En outre, les mesures de polluants ou bien de biogaz humides et chargés ne peuvent pas être envisagées car les particules et l'humidité ne sont pas compatibles avec les pièces en mouvement (pistons, palettes ou encore engrenages) de ces débitmètres.

Leur prix varie de 500 à 2000 €, un ajout est à prévoir pour les revêtements spéciaux.



Taux de diffusion en milieu industriel



Mature mais uniquement pour fluides propres (filtrés en amont)

Son utilisation a tendance à décliner en milieu industriel au profit de solutions sans pièces en mouvement (ultrason, Coriolis, massique thermique notamment).

Utilisation d'un traceur – Temps de séjour

VITESSE	DEBIT
MONO-POINT	MOYENNEUR
PONCTUELLE	CONTINUE



Principe de fonctionnement

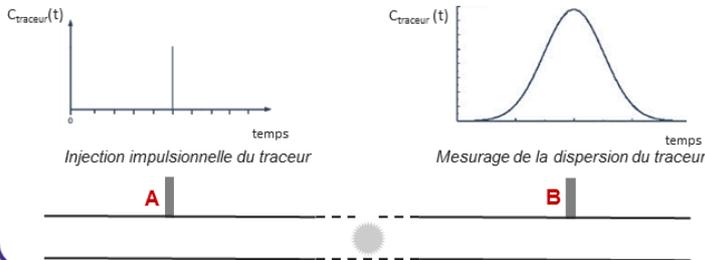
Un faible volume du gaz traceur est injecté rapidement dans l'écoulement de gaz du conduit pour produire une « bouffée » de gaz traceur. Après que la bouffée du traceur a été mélangée sur la section du conduit, son temps de transit entre deux points de mesure situés sur deux sections du conduit est mesuré. Le débit-volume est calculé en divisant le volume du conduit entre les deux sections de mesure par le temps de transit. Le débit déterminé en utilisant cette technique est représentatif de la zone du conduit définie par les emplacements des points de mesure de la bouffée, et ceux-ci sont choisis pour qu'ils soient représentatifs du plan de mesure.

Deux méthodes d'injection peuvent être utilisées :
 - l'injection impulsionnelle ou « bouffée »
 - l'interruption brusque

Le temps de transit peut être mesuré en utilisant la méthode de Distribution des Temps de Séjour. Entre l'injection A du traceur impulsionnelle (ou d'interruption brusque) et le point de mesure B du traceur mélangé, le traceur s'est dispersé. On utilise donc la DTS, qui prend en compte cette dispersion, pour avoir accès à un temps de séjour moyen.

Pour cela, on définit $E(t)$, caractérisant cette dispersion comme suit: $E(t) = \frac{C_{traceur}(t)}{\int_0^{\infty} C_{traceur}(t) dt}$

Puis on calcule la valeur moyenne de cette dispersion - le temps moyen de séjour (temps de transit) : $t = \int_0^{\infty} t E(t) dt$



On peut donc déterminer les vitesses avec :

$$t = \frac{V_{volume}}{Q}$$

Où V_{volume} est le volume entre l'injection du gaz traceur et sa détection, Q est le débit volumique des effluents gazeux traversant ce volume.

Ces calculs restent valables pour des interruptions brusques comme pour des injections impulsionnelles.



Conditions d'installation et mise en œuvre

On utilise pour ces mesures des gaz étalons en fonction de la composition du fluide et des dispositifs de détection à disposition.



Domaines d'application

Ces méthodes sont utilisées pour des étalonnages ou bien des mesures périodiques de la vitesse moyenne dans un conduit. Aucune solution de mesure continue basée sur ce principe n'a été identifiée à ce jour.



Taux de diffusion en milieu industriel



Mature mais non adapté aux mesures continues

Utilisation d'un traceur – Dilution

VITESSE	DEBIT
MONO-POINT	MOYENNEUR
PONCTUELLE	CONTINUE

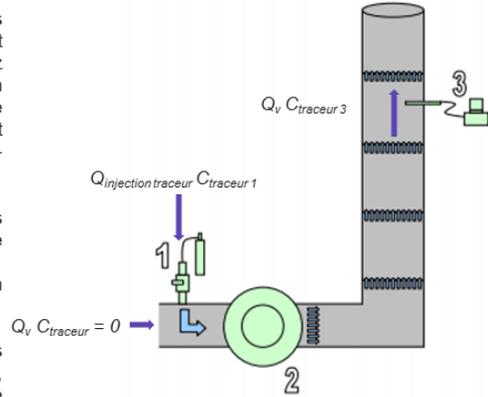


Principe de fonctionnement

La méthode repose sur l'injection d'un gaz traceur qui n'est pas habituellement présent dans la matrice à caractériser. Le gaz traceur est injecté à un débit et une concentration constants et connus (1). Le gaz traceur est mélangé sur la section du conduit, le mélange étant amélioré en présence d'obstacles comme les ventilateurs ou les coudes qui créent une turbulence supplémentaire (2). La concentration en gaz traceur dilué est mesurée en aval du point d'injection pour pouvoir déterminer le débit-volume (3), sous réserve que :

- le gaz traceur est bien mélangé au gaz dans le conduit.
- il n'y a aucune perte de gaz traceur par exemple par adsorption sur les parois du conduit ou par le dispositif de traitement des gaz de l'installation.
- Il n'y a aucun gaz traceur présent dans le gaz du conduit avant injection ou la concentration de fond peut être mesurée exactement.

Le débit volumique est déduit du débit d'injection du gaz traceur et des concentrations en gaz traceur injecté et en gaz traceur au point de mesure, après dilution par le gaz dans le conduit. Le débit volumique dans le conduit correspond au débit de dilution :



$$Q_v = \frac{Q_{\text{injection traceur}} C_{\text{traceur } 1}}{C_{\text{traceur } 3}}$$

Où $Q_{\text{injection traceur}}$ est le débit d'injection du traceur en 1, $C_{\text{traceur } 1}$ la concentration lors de l'injection du traceur en 1 (en ppm), $C_{\text{traceur } 3}$ la concentration mesurée du traceur en 3 (en ppm) et enfin Q_v , le débit volumique du fluide dans la conduite (fumées et gaz traceur).



Conditions d'installation et mise en œuvre

On utilise pour ces mesures des gaz étalons en fonction de la composition du fluide et des dispositifs de détection à disposition.



Domaines d'application

Ces méthodes sont utilisées pour des étalonnages ou bien des mesures périodiques de la vitesse moyenne dans un conduit. Aucune solution de mesure continue basée sur ce principe n'a été identifiée à ce jour.



Taux de diffusion en milieu industriel



Mature mais non adapté aux mesures continues

PIV

Particle Image Velocimetry

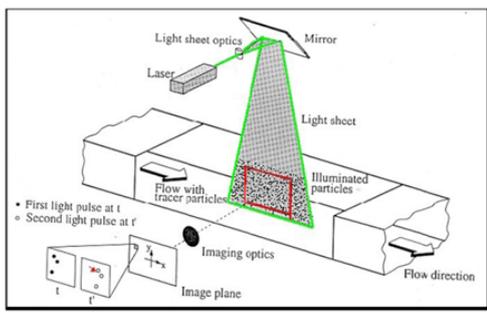
VITESSE	DEBIT
MONO-POINT	MOYENNEUR
PONCTUELLE	CONTINUE



Principe de fonctionnement

La vélocimétrie par images de particules PIV est une technique d'imagerie visant une mesure du champ de vitesse dans un écoulement. Pour obtenir une bonne résolution de mesure, une forte concentration de traceur est utilisée. De ce fait, l'épaisseur du volume de mesure est réduite à une mince nappe de lumière servant d'éclairage des particules s'y déplaçant. Dans son principe, la PIV consiste à prendre, au moyen d'une caméra, des images de ces particules à des instants rapprochés et à mesurer aux nœuds d'un maillage du plan de la nappe de lumière (positionnée selon la direction principale de l'écoulement) leur déplacement. La vitesse se déduit alors du déplacement connaissant le délai entre deux enregistrements.

Concrètement, les impulsions émises par une source traversent un dispositif optique. C'est une lentille cylindrique qui diverge le faisceau réalisant un plan de lumière. Les particules présentes dans ce plan sont donc éclairées périodiquement et celles qui ont servi à l'ensemencement diffusent la lumière reçue. Dès lors, on peut choisir une zone du plan de lumière qu'on appelle fenêtre d'analyse ou fenêtre d'interrogation et qui va être surveillée par la lentille du système de prise de vue. Régulièrement captée (à des intervalles de temps correspondant à la fréquence de la caméra CCD ou du capteur), cette zone est ainsi projetée sur un support d'enregistrement, en principe numérique, pour pouvoir traiter ces informations et dresser différentes cartes.



Principe général de la méthode
Principe de la PIV



Domaines d'application

La vélocimétrie à image de particules est réservée aux usages scientifiques de laboratoire puisqu'elle nécessite des composants d'optique, de mécanique, de traitement du signal, d'analyse des données de qualité qui en font un appareil très coûteux, encombrant et difficile à mettre en œuvre industriellement. Elle n'est donc pas adaptée à la mesure de vitesse de flux de polluants en milieu industriel.



Maturité en milieu industriel



Technologie mature mais uniquement pour la mesure en laboratoire

Vélocimètre Laser Doppler

VITESSE

DEBIT

MONO-POINT

MOYENNEUR

PONCTUELLE

CONTINUE



Principe de fonctionnement

Le principe de la vélocimétrie Laser Doppler est basé sur le décalage de fréquence :

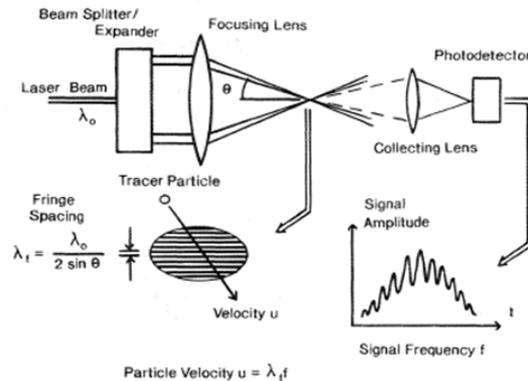
- entre la fréquence de la lumière reçue par une particule de traceur qui est émise par une source lumineuse monochromatique
- et la fréquence de la lumière diffusée par cette même particule en mouvement.

Cet effet est plus connu sous le nom d'effet Doppler. La différence de ces deux fréquences, appelée fréquence de Doppler, est proportionnelle à la vitesse de l'écoulement. Il s'agit du principe de la méthode couramment nommée la LDV (ou LDA, Laser doppler vélocimétrie ou anémométrie).

Plusieurs variantes reposant sur ce principe existent :

- Vélocimétrie à franges
- DGV (vélocimétrie doppler globale).

La technique de vélocimétrie à franges est en réalité la méthode la plus utilisée puisqu'elle permet de mesurer le vecteur vitesse instantanée de chaque particule. Son principe consiste à faire interférer deux faisceaux laser à l'endroit de l'écoulement où l'on désire faire la mesure. A l'intersection entre les deux faisceaux se crée un réseau de franges d'Young. Lorsque les particules ensemencées dans l'écoulement traversent le volume de mesure formé par les faisceaux, elles scintillent et la lumière est reçue par un photomultiplicateur (dont le flux est modulé par l'interférence) à la fréquence Doppler.



La vélocimétrie Doppler globale ou DGV utilise la même méthode, c'est-à-dire un écoulement ensemencé de particules illuminé par un plan laser. Cependant, cette méthode donne accès aux vecteurs vitesses et pas seulement à leur valeur.



Domaines d'application

Cette technologie a été développée dans les années 70 mais son usage est limité aux laboratoires. Effectivement, le volume occupé par un vélocimètre laser opérationnel (en dehors de l'écoulement), la mise en œuvre du (ou des) laser et sa consommation, rendent la technique assez difficile à utiliser, d'autant plus qu'il faut maîtriser un ensemble de problèmes : optique, mécanique, traitement du signal, analyse des données, ensemencement et finalement mécanique des fluides. Le coût d'un appareillage opérationnel est relativement élevé car il faut rassembler des composants de qualité.

Elle n'est donc pas adaptée à la mesure de débit de polluants gazeux en milieu industriel.



Maturité en milieu industriel



Technologie mature mais uniquement pour la mesure en laboratoire

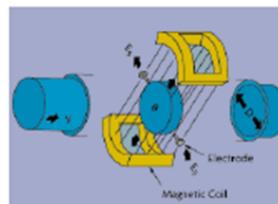
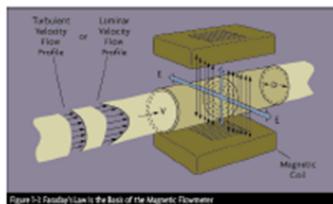
Vélocimètres électromagnétiques

VITESSE	DEBIT
MONO-POINT	MOYENNEUR
PONCTUELLE	CONTINUE



Principe de fonctionnement

Le déplacement d'un fluide conducteur tel que l'aluminium liquide, dans un tube soumis à l'influence d'un champ magnétique généré par un aimant permanent engendre des courants de Foucault (courants induits) dans le fluide. Ces courants induisent à leur tour une force électromagnétique, la force de Lorentz, par interaction avec le champ magnétique créé par l'aimant. Cette force de Lorentz s'oppose au mouvement du fluide ; une force de même intensité, mais de sens opposé, s'applique à l'aimant permanent. Cette force est proportionnelle à la vitesse moyenne et à la conductivité électrique du fluide. En mesurant cette force, il est possible de déterminer la vitesse d'écoulement du fluide.



Principe du débitmètre électromagnétique - force de Lorentz

Les débitmètres à RMN (*Résonance magnétique nucléaire*) – par marquage de spins ou encodage de phase – représentent une méthode très précise pour mesurer un flux par IRM. Cette méthode n'est utilisée que pour des usages scientifiques ou médicaux.



Domaines d'application

La débitmétrie électromagnétique à force de Lorentz est utilisée pour des fluides conducteurs (d'une conductivité minimale de 5 à 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Il peut s'agir d'eaux conductrices, de boues de produits chimiques ou encore de liquides conducteurs. **Les fumées – il en est de même pour le biogaz ou les gaz de process –, étant peu ou pas conductrices, cette technique ne peut donc pas être utilisée pour les mesurages de débit de polluants gazeux.**



Maturité en milieu industriel



Mature mais applications très spécifiques

Méthode de calcul de débit par consommation d'énergie

VITESSE

DEBIT

MONO-POINT

MOYENNEUR

PONCTUELLE

CONTINUE



Principe de fonctionnement

Pour la plupart des sources de combustion, le débit-volume peut être calculé à partir du volume stœchiométrique de gaz de combustion, déterminé à partir de la composition du combustible et du débit en énergie thermique entrant. Les méthodes de calcul possibles sont décrites dans l'EN 12952-15 qui contient des méthodes directes et indirectes. Dans une méthode directe, le débit de combustible est mesuré et l'apport thermique est calculé à partir du pouvoir calorifique du combustible et du débit de combustible. L'utilisation d'une méthode indirecte inclut le mesurage de l'énergie produite et du rendement thermique de l'installation.



- (1) – Débit de combustible :
- Débit massique m_f [kg/s]
 - Pouvoir calorifique inférieur $H(N)$ [MJ/kg]
- (2) – Combustion :
- Dégagement de chaleur du procédé [MW] : $Q_{(N)f} = m_f \times H_{(N)}$
 - Emission des gaz : facteur de combustible S [m³/MJ] (dépendant de la composition du combustible- tabulé pour les combustibles courants)
- (3) – Production énergétique P [MW] : $P = \eta \times Q_{(N)f}$ où η est le rendement thermique de l'installation
- (4) – Débit des gaz de combustion [m³] : $V = S \times Q_{(N)f}$



Conditions d'installation et mise en œuvre

Paramètre	Critère	Méthode de détermination
<i>Apport d'énergie – lié à la consommation de combustible (1)</i>		
Débit du combustible	≤ 1,5 % de la valeur	Débitmètre massique ou volumique avec certificat d'étalonnage traçable
Pouvoir calorifique inférieur	≤ 0,5 % de la valeur	Détermination par un laboratoire accrédité ISO 17025 ou au moyen d'un instrument étalonné
<i>Apport d'énergie – liée à la production énergétique (3)</i>		
Courant électrique	≤ 0,5 % de la valeur	Compteur électrique
Rendement thermique net	≤ 5,0 % de la valeur	Bilan thermique vérifié par des essais de performance et/ou la consommation de combustible et la production énergétique annuelles
<i>Facteur de combustible (2)</i>		
Gaz	≤ 1,0 % de la valeur	Détermination à partir de la composition du combustible, du PCI ou d'un facteur de combustible constant défini
Liquide	≤ 1,5 % de la valeur	
Solide	≤ 7,5 % de la valeur	



Domaines d'application

Cette méthode est utilisée dans les centrales d'énergie (combustible homogène : gaz naturel, charbon...) mais elle n'est pas adaptée pour l'incinération de déchets (combustible non-homogène).

Cette méthode n'est pas une mesure mais une méthode de calcul du débit.

Le débitmètre à flotteur ou rotamètre

VITESSE

DEBIT

MONO-POINT

MOYENNEUR

PONCTUELLE

CONTINUE



Principe de fonctionnement

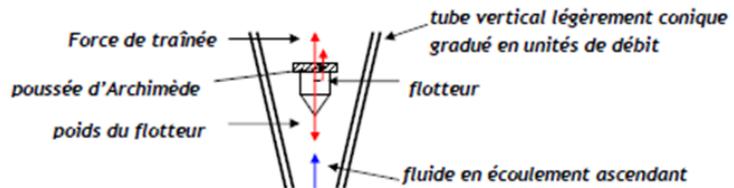
Le flotteur s'équilibre en fonction du débit dans le tube tronconique de manière à équilibrer les différentes forces auxquelles il est soumis :

- le poids apparent du flotteur
- la force hydraulique subie par le flotteur (poussée d'Archimède et force de trainée).

Le tube dans lequel le flotteur est gradué en unité de débit : à l'équilibre, une simple lecture de la graduation permet d'obtenir la valeur du débit.



Rotamètres



Principe du débitmètre à flotteur

Le terme de V-cône peut être employé pour désigner cette technologie.



Domaines d'application

Cette méthode est plutôt utilisée à l'échelle pilote, elle est destinée au réglage grossier d'un débit. Elle ne correspond donc pas aux exigences de la mesure de débit de polluants en milieu industriel.



Taux de diffusion en milieu industriel



Mature pour une utilisation à l'échelle pilote ou pour du réglage grossier

Débitmètre à effet Coriolis

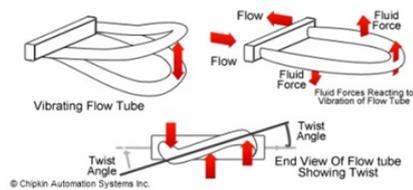
VITESSE DEBIT
MONO-POINT MOYENNEUR
PONCTUELLE CONTINUE



Principe de fonctionnement

Le débitmètre à effet Coriolis est un débitmètre massique. Il effectue une mesure directe et intégrale de masse. La mesure du débit repose sur l'information de deux capteurs électrodynamiques disposés de part et d'autre d'un tube mis en oscillation par vibration. Ces capteurs mesurent la vitesse de déplacement du tube de mesure.

Un déséquilibre entre l'entrée et la sortie du tube de mesure est observé. Il se traduit par un déphasage en temps détecté par deux bobines. Le déphasage entre les deux capteurs de mesure est proportionnel au débit massique du fluide circulant dans le tube. Il existe des débitmètres avec des tubes droits et avec des tubes courbés. La forme du tube n'a pas d'influence particulière sur la mesure.



Principe de la débitmétrie à effet Coriolis

Ainsi, le débitmètre Coriolis donne directement accès à un débit massique ce qui lui permet d'avoir des incertitudes de mesures très faibles, en outre, aucune pièce n'interagit directement avec le fluide ce qui réduit considérablement la maintenance.

Cependant, cette appareil fonctionne uniquement pour des liquides ou bien des gaz sous pression et ayant une certaine masse volumique : chaque appareil possède un couple pression – masse volumique en deçà duquel il ne fonctionne pas (typiquement 1,5 kg/m³ et 1,5 bar). De plus, il peut provoquer des pertes de charge importante. Enfin, c'est l'un des débitmètres les plus chers avec des prix pouvant aller de 5 k€ pour les diamètres les plus faibles (15 mm) jusqu'à 50 k€ pour les diamètres les plus élevés (200 mm). Des diamètres encore plus importants existent : ils sont réservés à des usages très spécifiques, comme dans la transaction de gaz naturel à l'échelle nationale, ses prix pouvant alors atteindre la centaine de milliers d'Euros.



Domaines d'application

Cette technologie est utilisée pour les applications où la précision est le premier critère retenu (car il s'agit d'un appareil très onéreux) : transactions commerciales (gaz naturel), optimisation de process de produits coûteux (où la moindre économie de matière est intéressante).

Elle n'est pas adaptée aux mesures de polluants d'effluents gazeux car la pression et la masse volumique de ces derniers ne sont pas suffisantes pour pouvoir utiliser l'effet Coriolis.



Taux de diffusion en milieu industriel



7. Influence de la composition du fluide sur le mesurage de la vitesse avec un tube Pitot

Le graphique ci-dessus illustre l'influence¹⁶ de la composition du gaz, et donc de la masse volumique ρ , sur la vitesse mesurée par un tube Pitot (l'allure du graphique est similaire dans le cas des autres organes déprimogènes).

L'influence de la composition du gaz est considérée comme ne nécessitant pas de recalibrage lorsque sa variation n'excède pas 10%.

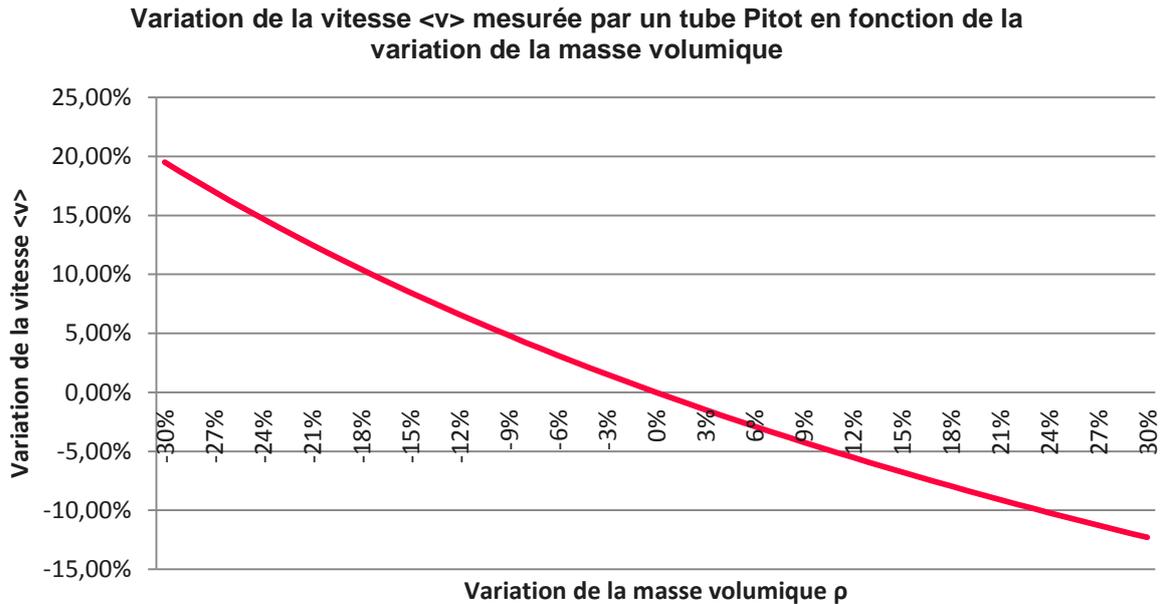


Figure 24 : Variation de la vitesse <v> mesurée par un tube Pitot en fonction de la masse volumique

¹⁶ La relation suivante est utilisée : $v = \sqrt{\frac{2}{k\rho} \Delta P}$.

Table des figures et des tableaux

Figure 1 : Méthodologie employée pour l'étude	7
Figure 2: Principales sources bibliographiques.....	8
Figure 3 : Planning de l'étude.....	9
Figure 4 : Evolution de la masse volumique en fonction de la température pour un gaz uniquement composé d'air	11
Figure 5 : Evolution du débit massique en fonction la température pour un écoulement composé d'air uniquement, ayant pour vitesse moyenne 10 m/s, dans une conduite circulaire de diamètre 1 mètre. 13	
Figure 6 : Evolution du débit massique en fonction la valeur de la masse volumique pour un écoulement ayant pour vitesse moyenne 10 m/s, dans une conduite circulaire de diamètre 1 mètre. 14	
Figure 7 : Profil de vitesse en écoulement laminaire	15
Figure 8 : Profil des vitesses en écoulement turbulent	15
Figure 9 : Longueur d'établissement d'un régime établi.....	16
Figure 10 : Evolution du profil des vitesses après un coude à 90°C, source : Photocontrol, Optical gas flow meter	16
Figure 11 : Longueurs droites et profil des vitesses établi	17
Figure 12 : Illustration du calcul des pertes de charge sur un écoulement.....	21
Figure 13 : Longueurs droites et profil des vitesses établi	30
Figure 14 : Illustration des concepts de reproductibilité et de justesse (ou précision), source INRS ...	32
Figure 15 : Protocoles d'assurance qualité de la norme EN 14181	61
Figure 16 : Fiche certification QAL 1, Ultrason PCME	62
Figure 17 : Exploration des conduits circulaires selon la norme ISO 10780 dans le cas des de l'application de la règle générale ou tangentielle	63
Figure 18 : Position des points dans la section de mesurage, cas circulaire.....	63
Figure 19 : Position des points dans la section de mesurage, cas rectangulaire	63
Figure 20 : Critères issus des normes EN 1567 pour les organes déprimogènes, source : Deltafluid. 64	
Figure 21 : Longueurs droites amont – aval d'un Venturi normé, source : Deltafluid	65
Figure 22 : Pertes de charges résiduelles en fonction de β pour divers type d'organe déprimogène ..	65
Figure 23 : Exemple de variation de longueur droite pour un tube Pitot moyenné Fuji Electric 5RD, source : Fujielectric.....	66
Figure 24 : Variation de la vitesse $\langle v \rangle$ mesurée par un tube Pitot en fonction de la masse volumique 76	
Tableau 1: Typologie des capteurs de pression.....	22
Tableau 2 : Typologie des capteurs de pression.....	23
Tableau 3 : Exemples d'appareil de mesurages de vitesse / débit avec sondes de température intégrées	24
Tableau 4 : Principales méthodes de mesurage des composés gazeux atmosphériques courants	25
Tableau 5 : Technologies non retenues	27
Tableau 6 : Technologies retenues	28
Tableau 7 : Choix d'un SRM, source : EN 16 911-1	59
Tableau 8 : Critères de performance de l'AMS pour des essais en laboratoire, source : INERIS.....	60
Tableau 9 : Critères de performance de l'AMS sur site source : INERIS.....	60