

SYNTHESE / EXTENDED ABSTRACT
FRANÇAIS / ENGLISH

**MESURAGE DE VITESSES ET DEBITS GAZEUX EN VUE DE
DETERMINER DES FLUX DE POLLUANTS CANALISES
REVUE CRITIQUE ET RETOURS D'EXPERIENCES**

***GAS FLOW RATE AND VELOCITY MEASUREMENT FOR THE
ASSESSMENT OF CHANNELED FLOWS OF POLLUTANTS
CRITICAL REVIEW AND FEEDBACK***

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

RESUME

Le présent document constitue la synthèse 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 dans le rapport final :

- ✓ **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

vitesses, débit, vélocimètre, débitmètre, Pitot, ultrason à temps de transit, massique, thermique, organes déprimogènes, micro-venturi, corrélation laser, scintillation LED, corrélation infrarouge, effet vortex, anémomètre à hélices, compteurs volumétriques, utilisation d'un traceur (temps de transit et dilution), laser doppler, électromagnétique, rotamètre, effet coriolis, débitmètre à oscillation.

SUMMARY

The present document is the abstract 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 in the final report:

- ✓ **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.

Contexte de l'étude

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 alors 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.).

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 par les techniques mises en œuvre par les industriels que comme grandeur intermédiaire de calcul du débit¹.

Cependant, 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 d'un nouveau référentiel européen 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.

Objectifs et périmètre de l'étude

Le rapport présente un état de l'art des **méthodes de mesurage des paramètres de vitesse et débit** permettant de remonter aux flux gazeux, et ce en complément des méthodes de mesurage des teneurs en polluants.

Il est accompagné d'un fichier Excel à destination des opérateurs, présentant la liste des fournisseurs identifiés et une feuille de calcul des principaux paramètres de flux tels que le nombre de Reynolds.

Cette étude a pour objectif d'offrir un guide pour les industriels souhaitant réaliser des mesurages des flux de polluants, de biogaz et enfin de gaz de process plus généralement (hors vapeur).

1. Le mesurage de la vitesse est en revanche nécessaire dans le cadre de mesurage de polluants particulaires par des organismes de contrôle

2. The velocity is also necessary for the measurement of particulate pollutants by inspection bodies

Background of the study

*In the industry, a better knowledge of the emissions of pollutants is based on the **quantification of gaseous pollutants and particles'flows** and not only on the determination of the pollutants concentration.*

*These daily, weekly or annual determinations require a coupling between various data: at least **the concentration of pollutants in the flue gases, and the velocity and/or flow rate of the gases**. For flue gas measurement, velocity and/or flow rate are measured at the chimneys downstream the treatment process, at the same level than the gas analyzers.*

*These measurement issues are also relevant for **process gases in incinerators and biogas plants**. Measurements can be carried out in several points in the network: at the waste level in biogas production wells, in the transportation grid, or just upstream the combustion equipment.*

*This measurement answers to **operational needs** (calculation of efficiency, process control) or **regulation needs** (for commercial transactions, or due to prefectural or national decrees). In most cases, the value that is necessary is the volumetric flow rate, and not the velocity, whereas a large majority of measurement equipment measures a velocity (which must therefore be converted to flow rate)².*

However, in specific cases where measurements are realized at a single point with non-steady and non-symmetrical flow, results can be inaccurate and could lead to reliability issues. Other specific conditions such as measurements realized with fluids charged with particles could generate unreliable results if good practices are not implemented. Both suppliers and experts agree that the measurements can be inaccurate in such difficult cases where good practices are not applied.

*Moreover, **the publication of new European standards – EN 16911 parts 1 and 2** – opened the discussion on flow rate measurement as this standard describes several reference and quality insurance methods for industrial self-monitoring. This standard is recent and will start to be applied by the controlling agencies in 2017.*

Objectives and scope of the study

*The report presents a review of **techniques for flow rate and velocity measurement for gas flow**, in complementary with the measurement methods for pollutants concentration.*

An Excel file has also been created for the operators, presenting the list of identified suppliers, and a calculation sheet for the main flow parameters like the Reynolds number.

The objective of this study is to guide the industrials which want to make reliable velocity and flow rate measurements for flue gases, biogas or process gases in general (except steam). It does not compile all the data from the technical leaflets of suppliers, but it aims at underlying the main watch-points and good practices for these types of measurement.

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.

L'étude couvre 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 (impliquant des exigences en termes d'assurance qualité pour les appareils utilisés - certification QAL1).
- 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.

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

Sont rappelés dans le rapport les principes fondamentaux de la mécanique des fluides utilisés dans le mesurage de vitesses et de débits, et sont mis en avant l'influence des différents paramètres physiques entre eux, notamment sur le calcul du débit.

Par exemple, à partir du rappel de l'équation d'état des gaz parfaits $P <v> = nRT$, il vient que 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 : $\rho(P,T) = \rho^0 \left(\frac{P(T)}{P^0} \right) \left(\frac{T^0}{T} \right)$

L'effet de la pression et de la température sur la valeur de ρ est ainsi non négligeable, comme illustré ci-dessous :



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.

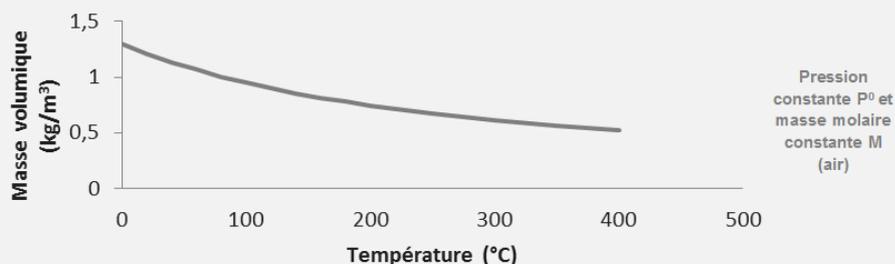


Figure 1 : Evolution de la masse volumique en fonction de la température pour un gaz uniquement composé d'air

The study covers the techniques for:

- The measurement of flow rate for flue gases (chimneys) in order to estimate the stack emissions and potentially comply with regulations. Actually, in the next few years, the European regulation may define limit values in terms of flow and not in terms of concentration only, which will impose on a certain number of installations the continuous control of flow rate for flue gases. For incinerators or large combustion plants, the standard EN 14181 would also apply for the measurement of velocity/flow rate (implying quality insurance requirements for the equipment – QAL1 certification).
- The measurement of flow rate for process gases in incinerators and biogas plants, in order to ensure a proper regulation of the processes.

Theoretical and operational reminders on flow rate and velocity measurement of canalized flows

The fundamental principles of fluid mechanics related to flow rate measurement are recalled. The influence of different physical parameters between them, especially with flow rate, is also underlined.

For instance, from the ideal gas law $P <v> = nRT$, the density of a mix of gases under real conditions $\rho(P,T)$ is obtained by:

- Having access to the gas composition (components and their volumetric fractions), in order to calculate the density of the fluid under normal conditions ρ^0
- Measuring the temperature T and the pressure P in the flow
- Then using: $\rho(P,T) = \rho^0 \left(\frac{P(T)}{P^0} \right) \left(\frac{T^0}{T} \right)$

It is worth noting that **the influence of the pressure and the temperature on the density ρ cannot be considered to be negligible**, as demonstrated below:

Ensuite, **pour calculer le débit volumique Q_v** , il est nécessaire de :

- 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 : $Q_v = \langle v \rangle A$

Le **nombre de Reynolds** est défini comme suit :

$$Re = \frac{D_h \langle v \rangle (P,T)}{\mu(P,T)} \rho(P,T)$$

Où μ désigne la viscosité dynamique du fluide s'exprimant en PI (Poiseuille ou Pa.s), ρ sa masse volumique (en kg/m^3). Il **permet de définir deux régimes principaux d'écoulement** dans une section :

Le régime laminaire, si $Re < 2100$

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 de Pitot par exemple.

Le régime turbulent, si $Re > 10^4$

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

Then, **to calculate the volumetric flow rate Q_v** , it is necessary to:

- Determine the Reynolds number and measure with the most relevant technique and at a representative point the velocity, so as to assess the mean output velocity $\langle v \rangle$
- Determine the cross-sectional area A
- Use: $Q_v = \langle v \rangle A$

The **Reynolds number** is defined as follows:

$$Re = \frac{D_h \langle v \rangle (P,T)}{\mu(P,T)} \rho(P,T)$$

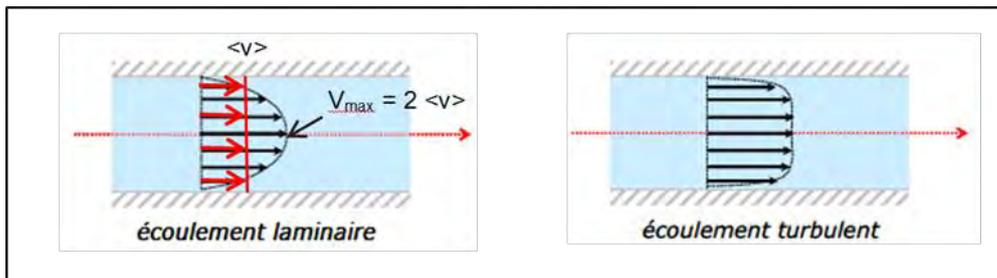
Where μ represents the dynamic viscosity expressed in PI (Poiseuille or Pa.s) and ρ its density (in kg/m^3). It **allows defining two major flow regimes**:

The laminar regime, if $Re < 2100$

In front of this type of flow, it is important to underline that the velocity profile has the particular feature of having the maximum velocity (at the center of the section) corresponding to twice the mean output velocity (used for the flow rate calculation). This characteristic induces frequent mistakes with punctual measurement techniques such as mono-point Pitot tubes.

The turbulent regime, if $Re > 10^4$

This type of flow has a quite flat velocity profile. This regime induces less measurement mistakes since the velocity is near uniform with a value very close to the mean output velocity (except close to the walls with the boundary-layer phenomenon).



Lors du mesurage de la vitesse, **il est donc 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.

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.

Pour les instruments de mesure ayant besoin d'un profil stable et développé, il est nécessaire d'avoir une certaine longueur droite en amont ainsi qu'en aval de l'appareil. On pourra prendre la référence de la norme EN 16911-2 préconisant une distance de 25 D en amont et 5 D en aval (D le diamètre de la conduite).

During the velocity measurement, **it is therefore crucial to know the flow regime in order to adapt the right location of the sensor for a correct measurement of the mean output velocity and so of the flow rate**. Yet, for biogas or stack flue gases in waste treatment facilities, the flow regime seems to be always turbulent regarding the typical flow parameters.

In case of a turbulent regime with a steady and developed velocity profile, the point of the profile with a velocity value corresponding to the mean output velocity is located at **12%** of the hydraulic diameter from the boundary pipe.

For measurement instrument requiring a steady profile, the EN 16911-2 recommends a straight length of 25 D upstream the device and 5 D downstream (D the pipe diameter).



Cependant, il convient de prendre en compte les informations fournies par le constructeur. Enfin, les résultats des cartographies des écoulements effectuées pour les pré-études des normes EN-16911-1 (mesures QAL 2 pour le choix de l'emplacement de l'AMS pour le mesurage 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 (coude, vanne, etc.).

Finalement, il est courant 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 :

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

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%).

Enfin, si cela est nécessaire, pour calculer le débit massique \dot{m} , on utilise les deux paramètres Q_v et $\rho(P,T)$:

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

En conclusion, il est bon d'avoir en tête les facteurs influant sur la détermination du débit pour assurer la meilleure fiabilité possible des mesures. De nombreux appareils de mesurage possèdent leur propre système de mesurage de température et de pression absolue, et calculent automatiquement le débit volumique aux conditions normales Q_v^0 .

L'analyse de la composition du gaz est également nécessaire pour obtenir la masse volumique, valeur requise pour certains appareils comme les tubes Pitot, ou encore pour le calcul du débit massique. Une variation significative de la composition du gaz peut fausser les mesures.

Identification des techniques

Parmi les 18 techniques identifiées, 8 ont été considérées comme non pertinentes dans le cadre de cette étude, pour différentes raisons détaillées 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 du rapport final.

- Utilisation possible uniquement sur des gaz propres (pour les compteurs volumétriques par exemple)
- Utilisation pour des étalonnages de process et non des mesurages continus (méthodes par utilisation d'un traceur)
- Utilisation uniquement pour des mesurages en laboratoire, à cause des difficultés de mise en œuvre sur site industriel et des coûts élevés (pour les techniques de Particle Image Velocimetry et Vélocimétrie Laser Doppler)
- Usage pour des fluides spéciaux comme des fluides électromagnétiques (vélocimètres électromagnétiques) ou des gaz à haute pression (débitmètres à effet Coriolis utilisés pour les transactions de gaz naturel)
- Usage uniquement pour des réglages grossiers de débits et non des mesurages précis (rotamètres).

Nevertheless, the supplier information should be taken into account. Moreover, the results of the velocity profile cartographies performed for the pre-studies of the standard EN 16 911-1 (QAL 2 measurements for the choice of the Automatic Measurement System for the flow rate measurement and the validation of the representativeness of the measurement point) and the EN 15259 (homogeneity measurement experiences for all the stationary air emission measurement systems) can reduce these straight lengths.

Finally, the straight lengths can also vary according to the type of elements upstream (elbow, valve, etc.).

Besides, in many industrial sites, in order to be comparable, the volumetric flow rate is expressed under normal conditions but also on dry gas and at reference oxygen content (11%). The following relation is used:

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

Where Q_v is the volumetric flow rate under true conditions, P^0 and T^0 the pressure and temperature values under normal conditions, $\%H_2O$ the humidity content of the gas, $\%O_2$ the oxygen content under real conditions and $\%O_{2\ ref}$ the reference oxygen content (expressed in volumetric percentage and often taken as 11%).

Finally, if it is required, to calculate the mass flow rate \dot{m} , the two parameters Q_v et $\rho(P,T)$ are used:

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

In conclusion, it is worth knowing the influence of the different parameters on the determination of the flow rate. Many velocity and flow rate measurement equipment have their own temperature and pressure measurement devices, offering a complete integrated solution.

The analysis of the gas composition is also necessary to get the gas density, required for some equipment like Pitot tubes, or for the calculation of the mass flow rate. A high variation of the composition of the gas may impact the value of the velocity and flow rate.

Identification of the technologies

Among the 18 identified techniques, 8 have been considered irrelevant in the scope of the study for different reasons explained below. Nevertheless, a short ID-card has been drafted for each in the final report, presenting the principle and the domains of applications.

- *Technique only suitable for clean gases (displacement meters)*
- *Non-continuous methods only for process calibration (use of markers)*
- *Laboratory use only, due to big implementation challenges and high costs (for Particle Image Velocimetry or Doppler Velocimetry)*
- *Technique only suitable for specific gases like electromagnetic ones (for electromagnetic velocimeters) or high pressure flows (Coriolis effect flowmeters for commercial transactions of natural gas)*
- *Inaccurate methods for coarse adjustment (rotameter).*

Revue et comparaison des technologies

Les 10 techniques de mesurage de vitesses et de débits retenues sont ainsi :

Technologies identifiées

Tube de 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

Il est 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.

Une fiche description a été faite pour chacune de ces techniques, détaillant :

- 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 performances,
- La qualité du mesurage,
- Les coûts hors installation,
- Les facteurs d'influence,
- Et les principaux fournisseurs.

Enfin, une comparaison de ces différentes techniques a été réalisée et est présentée dans le tableau ci-après.

En effet, 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), des contraintes de mise en œuvre (longueur droite requise, diamètre du conduit, zone ATEX, etc.), et de l'objet des mesurages (besoin d'une certification QAL1 ou d'une méthode de référence).

C'est bien l'objectif de ce rapport de faciliter le choix d'un appareil de mesurage adapté, dans un contexte où les informations fournisseurs ne sont pas toujours faciles à interpréter.

Review and comparison of the technologies

The 10 selected techniques for flow rate and velocity measurement are:

Selected technologies

Pitot tube

Ultrasound velocimeter

Thermal mass flowmeter

Differential pressure (Venturi / orifices)

Micro - Venturi

Laser correlation velocimeter

LED scintillation velocimeter

Infrared correlation velocimeter

Vortex effect velocimeter

Anemometer

It is interesting to note that the bibliographical research, and especially the patents analysis, did not reveal any new method. The identified innovations were about the optimization of the current techniques.

An ID-card has been drafted for each technique, detailing:

- Its principle,
- Its conditions of implementation and installation,
- The benefits and drawbacks,
- The main fields of application,
- The diffusion rate in the industry,
- The operating conditions,
- The operational reliability,
- The main costs,
- The influencing factors,
- And a non-exhaustive list of suppliers.

Finally, a comparison of the different techniques has been carried out and is presented in the table below.

The choice of the relevant measurement equipment has to be made according to the flow parameters (minimum speed, humidity, particles for instance), to the implementation requirements (need for strength length, pipe inner diameter, ATEX zone, etc.), and the purpose of the measurement (QAL1 certification or standard reference method).

It is indeed the objective of this report to guide the operators in the choice of their measurement equipment, in a context where the data from the suppliers is not always easy to understand.

Tableau de comparaison des techniques de mesurage 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

<p>ATEX ✓ Proposée en option ✗ Non proposée par les fournisseurs identifiés</p>	<p>Température NA : température limitée uniquement par les matériaux utilisés</p>	<p>Diamètre Petit : < 100 mm Moyen : qqs centaines de mm Grand : > 2 m</p>	<p>Qualité de la mesure + : Mesure peu satisfaisante ++ : Mesure satisfaisante +++ : Mesure très satisfaisante</p>
--	---	--	--

Comparison table of the selected techniques for gas flow rate and velocity measurement

	Pilot Tube	Ultrasound velocimeter	Thermal mass flowmeter	Vortex effect velocimeter	Differential pressure (Venturi / orifices)	Micro - Venturi	LED scintillation velocimeter	Infrared correlation velocimeter	Laser correlation velocimeter	Anemometer
Continuous (C) or ponctual (P) measurement	C or P	C	C or P	C	C	C	C	C	C	C or P
Reference method / Certification QAL1	QAL1 SRM*	QAL1	QAL1	✘	✘	✘	✘	QAL1	✘	SRM*
Tolerate humidity	≈	✓	✘	✓	≈	✓	✓	✘	≈	✘
Tolerate particle-charged fluid	≈	✓	≈	✓	≈	≈	✓	✓	≈	≈
Temperature constraints	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	over 40°C	below 100°C	NA
ATEX	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✘	✘	✓	✓
Required straight lenght	YES	YES	YES	YES	YES	YES	NO	NO	YES	YES
More suitable diameter	Small to medium	Medium to large	Small to medium	Small to medium	Small to large	Medium to large	Medium to large	Medium to large	Small to medium	Small to medium
Compatible with slow rate measurement (< 5 m/s)	✘	✓	≈	✓	✘	✘	✓	≈	✓	≈
Induced pressure losses	Weak to average	No	No	Weak to average	Important	Weak to average	No	No	No	Weak to average
Measurement quality for self-monitoring	++	+++	+	++	+++	++	++	++	++	+
Single-Point (SP) or averaged (AV) measurement	SP or AV	AV	SP or AV	SP	AV	SP	AV	AV	SP	SP or AV
Cost	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 = Standard Reference Method according to EN 16911

<p>ATEX ✓ Offered as an option ✘ Not offered by the identified suppliers</p>	<p>Temperature NA: Temperature limited only by the used material</p>	<p>Diameter Small: < 100 mm Medium: a few hundreds of mm Large: > 2 m</p>	<p>Measurement quality +: Less than satisfactory measurement ++: Satisfactory measurement +++: Highly satisfactory measurement</p>
---	--	---	--