

Sommaire

Edito

page 1

La norme NF EN ISO 16911-1

Représentativité des mesures

page 2

Position des points

Profils d'écoulement

page 3

Étalonnage - Métrologie

page 4

Incertitude de mesure

page 5

Détermination de débit-volume

par mesurages de la dilution

d'un traceur

- Détermination du débit-volume

par mesurages du temps de transit

d'un traceur

page 7

- Détermination du débit-volume à

partir des conditions du process de

l'installation

page 8

La norme NF EN ISO 16911-2

- sélection d'un AMS

- Installation d'un AMS

- opérations QAL2 et AST

page 8

Les formations 2014

page 10

Edito

Rarement méthode normalisée n'a été attendue avec autant d'impatience. En effet, si la communauté scientifique s'est longuement impliquée ces vingt dernières années pour, tour à tour, décrire et qualifier les meilleures pratiques pour le mesurage des concentrations en polluants gazeux et particulaires, il restait à proposer une ou plusieurs méthodes de mesurage de débit des effluents rejetés à l'atmosphère pour :

- dimensionner les installations d'extraction et de traitement des effluents gazeux issus des process industriels ou des installations de chauffage domestique,
- vérifier et optimiser le fonctionnement d'un process et quantifier l'impact d'une installation sur l'environnement et la santé,
- vérifier sa conformité aux valeurs limites d'émission de flux,
- réaliser des bilans massiques, procéder à des calculs pour les quotas d'émission de CO₂, calculer l'assiette fiscale de la Taxe Générale sur les Activités Polluantes (TGAP), établir des facteurs d'émission spécifiques utilisables dans l'inventaire national d'émission, etc...

Si tous les pays membres utilisent depuis bien longtemps la méthode de mesurage de vitesse et de débit des effluents gazeux par tube de Pitot, il y avait débat sur sa représentativité et l'incertitude sur les résultats obtenus. Il importait de proposer une validation de cette méthode et des alternatives dès lors que cette dernière ne pouvait être mise en œuvre, parce que l'on sortait de son champ d'application ou que

d'autres techniques d'essais ou de calcul pouvaient s'avérer plus adaptées et conduire à des résultats plus représentatifs et robustes.

La nouvelle norme EN ISO 16911 développée conjointement par le comité technique TC 146 de l'ISO et le comité technique TC 264 du CEN pour le mesurage des vitesses et débits propose :

- dans sa partie 1, une méthode de référence manuelle ainsi que quelques méthodes alternatives pour procéder aux contrôles périodiques.
- dans sa partie 2, une description des principes utilisables pour un suivi en continu afin de réaliser l'autosurveillance d'une installation ainsi que les directives nécessaires à la mise en application de la norme EN 14181.

Dans les deux parties les méthodes sont décrites et des critères minimaux pour les caractéristiques de performance ont été fixés de façon à garantir des mesures de qualité.

Jean Poulleau

Responsable de l'unité

«Sources et Emissions»

INERIS



Quelques recommandations

Afin d'améliorer vos mesures de vitesse avec un tube de Pitot

Ces recommandations sont issues de travaux réalisés en 2008 sur le pilote du CETIAT et de campagnes d'essais interlaboratoires.

LA NORME NF EN ISO 16911-1

La norme NF EN ISO 16911-1¹ décrit une méthode pour la détermination périodique de la vitesse et du débit-volume du gaz dans les conduits et les cheminées à l'émission de sources fixes.

Cette norme **devrait remplacer la norme ISO 10780 comme méthode de référence** pour la réalisation des contrôles réglementaires et pour l'étalonnage des systèmes automatiques d'autosurveillance du débit installés de manière permanente sur une cheminée.

Elle prescrit des mesurages point par point de la vitesse d'écoulement sur la section de mesure à l'aide d'un tube de Pitot ou d'un anémomètre à hélice, afin de déterminer le profil et la moyenne de la vitesse d'écoulement, et calculer les débits-volumes. Dans le cas où les conditions d'écoulement dans la section de mesure varient dans le temps, des mesurages de vitesse parallèles réalisés en un point fixe sont utilisés pour mesurer et corriger les résultats des variations temporelles de la vitesse du gaz.



Quelques recommandations

Représentativité des mesures

La cartographie de vitesse d'une section de mesure par tube de Pitot ou anémomètre à hélice étant souvent réalisée en quelques minutes, cette cartographie :

- peut ne pas être très représentative du fonctionnement de l'installation dans le cas fréquent où il est observé des variations temporelles de flux,
- peut être affectée elle-même par les variations de débit intervenues lors de la scrutation de la section de mesure,

Il est donc recommandé de disposer d'un second tube de Pitot ou d'un autre dispositif de mesure situé en un point fixe afin de faire la part des variations temporelles. Ce dispositif de mesure peut rester installé à demeure pendant toute la durée de la caractérisation des effluents gazeux.

L'influence des variations temporelles de période courte peut aussi être atténuée en augmentant en chaque point le nombre et la durée des mesurages pour intégrer les fluctuations de vitesse.

Selon la NF EN ISO 16911-1, la pression dynamique ou la vitesse locale moyenne est déterminée en chaque point sur au moins 1 minute, par mesurage en continu ou à partir de la moyenne d'au moins 3 valeurs instantanées

LA NORME NF EN ISO 16911-1

Le nombre et le positionnement des points de mesure sont définis sur la base du principe décrit dans la norme NF EN 15259¹ : l'ensemble de la section de mesure est découpée en surfaces d'aires égales. Il s'agit de réaliser un mesurage en un point de chacune de ces surfaces et de calculer la vitesse moyenne de l'écoulement dans la section de mesure en déterminant la moyenne arithmétique des résultats.

¹NF EN 15259 : Mesurage des émissions de sources fixes – Exigences relatives aux sections et aux sites de mesure et relatives à l'objectif, au plan et au rapport de mesure



Quelques recommandations

Position des points de mesurage

La norme NF EN ISO 16911-1 prévoit l'application de la règle tangentielle pour la détermination de l'emplacement des points de mesurage dans le cas d'un conduit circulaire. Cette méthode est préférable à la méthode générale pour déterminer la vitesse moyenne, car le point central dans le cas de la méthode générale fournit plutôt la vitesse maximale sur la surface centrale, que la vitesse moyenne.

En outre, dans le cas de conduits de grande dimension, la règle tangentielle qui ne prévoit donc pas de point de mesurage au centre du conduit, est plus facile d'application car elle permet d'utiliser des tubes de Pitot de dimension inférieure.

La méthode générale peut en revanche, être plus appropriée pour déterminer un profil de vitesse.

LA NORME NF EN ISO 16911-1

La norme NF EN ISO 16911-1 propose également en annexe des méthodes alternatives qui peuvent être utilisées pour l'étalonnage en routine des systèmes automatiques de surveillance du débit :

- deux utilisent un gaz traceur injecté à un débit maîtrisé en amont de la section de mesurage du conduit à caractériser et se basent sur la détermination de sa concentration dans le flux gazeux après mélange, ou sur la détermination de son temps de transit entre deux points,
- et une troisième méthode basée sur des calculs du flux à partir des paramètres mesurés caractérisant le régime de fonctionnement d'un procédé de combustion et ses émissions.

Il convient de noter que ces méthodes alternatives permettent de déterminer le débit-volume et d'en déduire la vitesse moyenne sur la section de mesurage, mais ne permettent pas de connaître le profil des vitesses contrairement aux mesurages au moyen de tubes de Pitot ou d'anémomètres à hélice. Elles ne peuvent être utilisées non plus pour déterminer le débit à appliquer pour assurer un prélèvement isocinétique des particules. Elles sont en revanche plus adaptées pour la détermination du débit-volume dans le cas où les longueurs droites en amont et en aval des sections de mesurage sont insuffisantes ou lorsque des obstacles dans le conduit induisent un écoulement non homogène.



Quelques recommandations

Profils d'écoulement

Le tracé du profil de vitesse sur un graphe permet de visualiser si le profil est développé, son degré de symétrie, et donc d'apprécier par exemple si le mesurage d'un AMS (système de mesurage automatique utilisé pour l'autosurveillance) en un point ou sur un axe est représentatif de la vitesse moyenne. Il permet aussi de détecter facilement une éventuelle erreur de mesurage d'une vitesse locale dans le cas d'un point qui paraît douteux ou aberrant sur le profil de vitesse.

Choix du matériel de mesurage

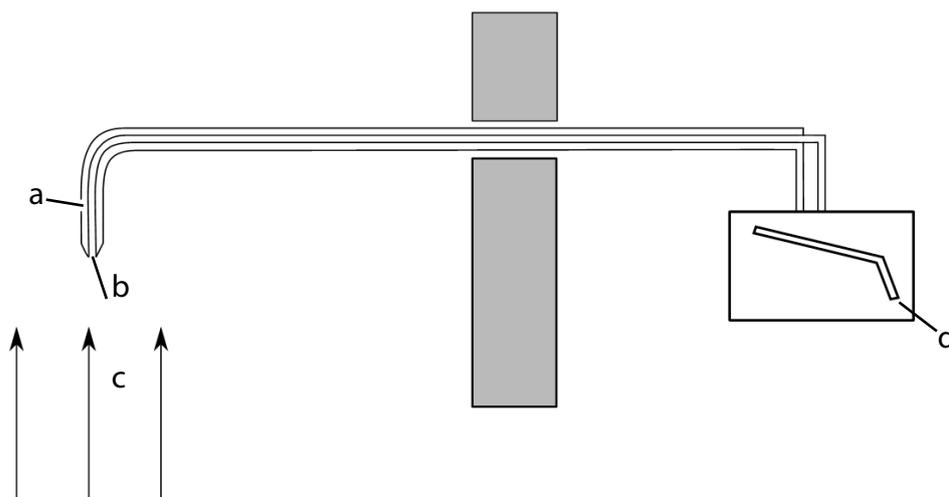
Les tubes de Pitot de type S sont plus adaptés que les tubes de Pitot de type L ou les anémomètres aux écoulements avec présence de vésicules ou de particules risquant d'obstruer les orifices du tube ou d'encrasser l'anémomètre. En outre ils sont plus faciles à insérer que les tubes de Pitot de type L, dans les conduits dont la paroi est épaisse ou lorsque les orifices de prélèvement sont de petite taille.

En l'absence de girations et de vésicules, le tube de Pitot de type L conduit en revanche à une meilleure répétabilité des mesures.

Pour les vitesses inférieures à 5 m/s ou des pressions différentielles inférieures à 5 Pa, la méthode par anémomètre à hélice est plus appropriée et devrait conduire à une incertitude de mesure plus faible que la méthode par tube de Pitot.

Mesurage de la vitesse et du débit-volume utilisant des techniques basées sur le mesurage de la pression dynamique

La pression dynamique en un point du plan de mesurage, à laquelle la vitesse locale du gaz est corrélée, est mesurée au moyen d'un tube de Pitot. La Figure ci-après présente une vue schématique d'un tube de Pitot de type L (le principe est le même pour tous les modèles de tubes de Pitot).



- a. pression statique
- b. point d'arrêt
- c. sens de l'écoulement
- d. mesurage de pression différentielle DP

Le tube de Pitot est muni de deux prises de pression au moins, l'une face à l'écoulement impactée directement par l'écoulement et mesurant la pression totale, égale à la pression dynamique + la pression statique au point d'arrêt (b), et l'autre ou plusieurs autres mesurant la pression statique (a). La prise de pression statique peut se composer d'un anneau d'orifices disposés autour du tube de Pitot comme dans le modèle en L, ou d'une prise de pression opposée au sens de l'écoulement comme dans un modèle de type S. Dans les tubes de Pitot 3d, des prises de pression séparées supplémentaires permettent de mesurer le vecteur vitesse/l'écoulement dans 3 dimensions. La pression à ces orifices est transmise dans le tube de la sonde Pitot à un capteur de pression différentielle. La différence de pression, correspondant à la pression dynamique, est mesurée entre les deux prises de pression. Le mesurage de la pression dynamique peut être effectué par un manomètre numérique ou par un manomètre à liquide à tube incliné.

Les dispositifs de mesurage : tube de Pitot et manomètre, doivent être étalonnés et avoir été soumis à une évaluation appropriée de leurs performances.



Quelques recommandations

Étalonnage - Métrologie

L'étalonnage périodique des tubes de Pitot de type L comme les tubes de Pitot de types S sont nécessaires afin de déterminer leur coefficient.

Les manomètres inclinés recommandés par la norme ISO 10780 ont une moins bonne résolution et souvent une incertitude d'étalonnage plus élevée que les micromanomètres.

Par ailleurs il convient de veiller à ce que la gamme et les points d'étalonnage du manomètre utilisé soient en adéquation avec les pressions dynamiques et statiques mesurées.

La masse volumique des gaz exprimée dans les conditions de température, pression et humidité du gaz, intervient avec un poids significatif dans le calcul de la vitesse ; il convient de la déterminer avec soin en mesurant les teneurs en O_2 , CO_2 et vapeur d'eau, ainsi que la température et la pression absolue dans le conduit (égale à la pression atmosphérique + la pression statique) sauf dans les installations de ventilations où la masse volumique de l'air peut être utilisée.

Incertitude de mesure

Les valeurs d'incertitudes obtenues lors des essais interlaboratoires sont plus élevées pour les pressions dynamiques et les vitesses que celles obtenues par une approche par calcul à partir des facteurs d'influence, ce qui montre l'importance de la mise en œuvre des mesurages et des paramètres liés aux caractéristiques de l'écoulement dont les contributions à l'incertitude globale ne sont pas quantifiables.

S'il n'est pas possible d'avoir une action sur les paramètres liés à l'écoulement (par exemple présence de gradients transversaux, de turbulences, inclinaison de l'écoulement par rapport à l'axe du conduit...), il convient de veiller à la mise en œuvre des mesurages et notamment :

- au choix d'un tube de Pitot dont la taille doit être adaptée à celle du conduit pour éviter un effet d'obstruction du tube de Pitot perturbant l'écoulement,
- à l'étanchéité autour du tube de Pitot au niveau de la trapped'accès du conduit en particulier en cas de forte dépression,
- à la position du tube de Pitot.

La pression atmosphérique joue un rôle important sur les valeurs de vitesse et débit et sur leur incertitude.

LA NORME NF EN ISO 16911-1

Détermination de la vitesse locale

La vitesse locale est calculée selon l'équation :

$$v_i = \sqrt{K \frac{2\overline{\Delta P}_i}{\rho}}$$

où:

v_i est la vitesse locale au point i de mesure en $m \cdot s^{-1}$

$\overline{\Delta P}_i$ est la pression dynamique moyenne mesurée au point i de la section de mesure en Pa

K est le coefficient du tube de Pitot

ρ est la masse volumique des effluents gazeux dans les conditions de température, de pression et d'humidité du gaz en kg/m^3

La pression dynamique moyenne $\overline{\Delta P}_i$ en un point i est égale à la moyenne arithmétique des m mesurages de la pression dynamique effectués au point i :

$$\overline{\Delta P}_i = \frac{1}{m} \times \sum_{j=1}^m \Delta P_j$$

$\overline{\Delta P}_i$ peut être déterminée directement à l'aide d'un manomètre numérique adapté qui fournit une indication moyenne de la pression dynamique sur la période de moyennage qui doit au moins couvrir 1 minute par point.

Détermination de la vitesse moyenne et du débit-volume

Les points de mesure choisis dans le plan de mesure doivent être représentatifs de surfaces d'aires égales. La vitesse moyenne passant par le plan de mesure est calculée à partir de la moyenne arithmétique des vitesses locales mesurées en chaque point. Le débit-volume est déterminé en multipliant la vitesse moyenne par l'aire du plan de mesure.

LA NORME NF EN ISO 16911-1

Mesurage de la vitesse et du débit-volume par anémomètre à hélice

Le principe de mesurage est basé sur la corrélation linéaire entre la vitesse de rotation d'une hélice et la vitesse d'écoulement.

Le principe d'une indépendance des conditions de matrice (température de gaz, pression, teneur en humidité) est supposé. Le dispositif doit être étalonné dans une soufflerie avant utilisation dans un conduit.

$$v = f \cdot u + c$$

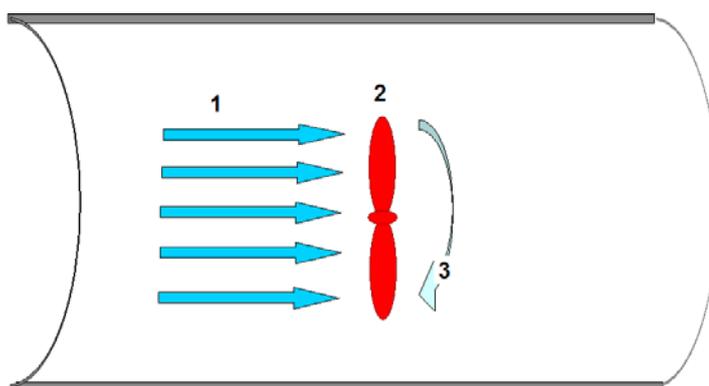
où

f, c valeurs spécifiques de l'anémomètre, déterminées par étalonnage

u vitesse de rotation

L'anémomètre à hélice est adapté au mesurage de faibles vitesses de gaz jusqu'à 0,5 m.s⁻¹. Il est possible de mesurer le sens de rotation pour que la direction de l'écoulement puisse être déterminée. En raison de la très faible masse de l'hélice, le temps de réaction de l'anémomètre est très court.

Comme dans le cas de l'utilisation d'un tube de Pitot, les vitesses locales sont déterminées par exploration de la section de mesurage en plusieurs points. La vitesse moyenne est égale à la moyenne arithmétique des vitesses locales et le débit-volume est calculé en multipliant la vitesse moyenne par l'aire de la section de mesurage.



Légende

1 flux v en m.s⁻¹

2 hélice

3 nombre de révolutions u en s⁻¹

Quelques indications sur l'incertude de mesure

La validation de la norme, a été conduite en soufflerie et sur deux installations industrielles.

L'évaluation des données de validation sur site selon l'EN ISO 20988 conduit à une incertitude élargie à 95 % de U_{0,95}(y) = 0,98 m/s dans la gamme de 17,8 m/s à 21,2 m/s soit environ 5%

Détermination du débit-volume par mesurages de la dilution d'un traceur

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.

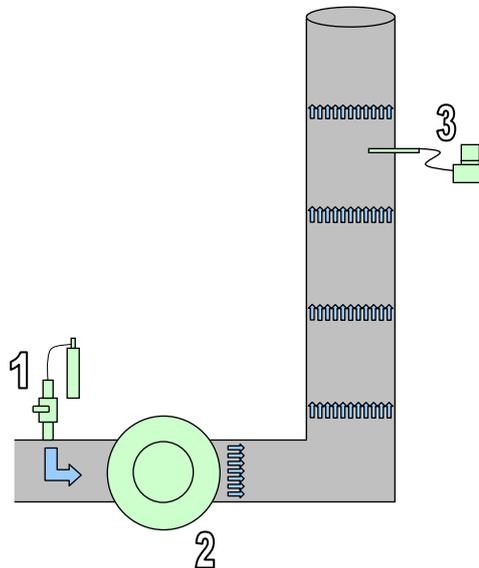


Figure : Principe de la dilution d'un gaz traceur

le débit volume 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 volume dans le conduit correspond au débit de dilution

Détermination du débit-volume par mesurages du temps de transit d'un traceur

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 ait été mélangée sur la section du conduit, son temps de transit entre deux points de mesure situés sur deux sections du conduit (peu importe qu'il soit rectiligne) 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.

La méthode implique de connaître avec précision le volume interne du conduit entre le point d'injection et le point de mesure.

LA NORME NF EN ISO 16911-1

Détermination du débit-volume à partir des conditions du process de l'installation

Le débit-volume peut être calculé pour certaines sources de combustion à partir du volume de gaz stœchiométrique déterminé sur la base du débit d'entrée du combustible et de la connaissance de la composition du combustible ou du pouvoir calorifique, et, si cela est nécessaire, de la concentration en oxygène au niveau du plan de mesurage, utilisée pour déterminer et tenir compte de tout air de dilution. Les débits d'entrée du combustible sont mesurés en utilisant des mesurages volumiques ou de masse traçables, et la concentration en oxygène est déterminée en appliquant la norme NF EN 14789. Si les mesurages du volume de combustible et de l'oxygène sont faits sur une base de gaz sec, cette approche détermine le débit-volume sur une base de gaz sec. La technique peut également fournir des mesures ramenées aux valeurs de référence de l'oxygène sans exiger de détermination de la teneur en oxygène dans le conduit.



LA NORME NF EN ISO 16911-2

afnor
ÉDITIONS

Cette seconde partie de l'EN ISO 16911 décrit les procédures d'assurance qualité qu'il convient de mettre en œuvre pour sélectionner, mettre en place, étalonner et assurer le suivi des systèmes automatiques de mesurage (AMS) utilisés en autosurveillance pour la détermination du débit-volume, afin de répondre aux exigences d'incertitude stipulée dans la Décision de la Commission du 18 juillet 2007 et établir des lignes directrices pour la surveillance et l'enregistrement des émissions de gaz à effet de serre conformément à la Directive 2003/87/CE.

LA NORME NF EN ISO 16911-2

La norme NF EN ISO 16911-2 suit autant que possible la structure de la norme NF EN 14181¹, avec la réserve que pour la surveillance du débit-volume, aucune VLE (valeur limite d'émission) ni l'incertitude maximale associée n'ont pas été fixées dans les Directives UE.

En ce qui concerne la sélection d'un AMS, celui-ci doit faire l'objet d'une certification selon la norme NF EN 15267², avec des tests réalisés en laboratoire et sur site, et doit respecter divers critères de performance. L'incertitude de mesure ne doit pas dépasser 2 %. Cet aspect est couvert par l'étape QAL1³ où le laboratoire réalisant les essais pour la certification doit valider les modalités de réalisation du contrôle QAL3⁴ et de test de la linéarité de l'AMS proposées par le fabricant.

En ce qui concerne l'installation d'un AMS, la position axiale de l'AMS sur le conduit ainsi que sa position au niveau du conduit pouvant avoir une influence significative sur ses performances, la norme conseille vivement de mener une pré-étude pour choisir un emplacement qui soit représentatif du débit-volume moyen sur la section de mesurage quel que soit le régime de fonctionnement de l'installation.

Les opérations QAL2⁵ et AST⁶ doivent être réalisées sur une période minimale de 5 heures, le nombre de comparaisons qui est de 9 pour le QAL2 et 4 pour l'AST, devant être augmenté à 15 pour le QAL2 et 5 pour l'AST dans le cas où aucune pré-étude n'a été réalisée. L'exigence de la norme NF EN 14181 d'effectuer l'étalonnage sur trois jours n'est pas applicable.

Une fonction d'étalonnage linéaire ou polynomiale peut être établie.

Le Groupe de Travail 23 du Comité technique 264 du CEN a organisé des essais en laboratoire (soufflerie de l'Institut für Luft-und Raumfahrt, (TUB) à l'université technique de Berlin), sur un site d'incinération de déchets à Copenhague et sur la centrale thermique de Wilhelmshaven, pour la validation des normes EN ISO 16911-1 et 2.

L'ensemble des méthodes de référence et divers Systèmes de mesure automatiques ont été testés et comparés.

Un rapport résumant ces travaux vous est proposé. Pour accéder au fichier PDF [«Cliquez ici»](#). Vous pourrez y trouver le programme des essais réalisés, les matériels testés, les résultats ainsi que les éventuels biais de mesure et l'incertitude de mesure.

¹ NF EN 14181 : Assurance qualité des AMS

² NF EN 15267 : Certification des systèmes de mesure automatisés

³ QAL1 : contrôle qualité consistant à vérifier l'aptitude à l'emploi d'un dispositif de mesure c'est-à-dire à vérifier que l'appareil respecte les critères de performances fixés et notamment celui portant sur l'incertitude de mesure

⁴ QAL3 : contrôle qualité consistant à surveiller la dérive d'un appareil au moyen de cartes de contrôle

⁵ QAL2 : contrôle qualité consistant à déterminer la fonction d'étalonnage de l'appareil par des mesurages comparatifs AMS / méthode de référence mise en œuvre par un laboratoire

⁶ AST : test de surveillance annuel



EXPERTS INERIS SPECIALISTES DU DOMAINE DES MESURES DE VITESSES / DEBITS

Unité " Sources et Emissions "

Jean POULLEAU
jean.poulleau@ineris.fr
Tél 03 44 55 65 35

Cécile RAVENTOS
cecile.raventos@ineris.fr
Tél 03 44 55 68 22



FORMATIONS

INERIS FORMATION développe des formations au profit des entreprises, des organismes institutionnels ou professionnels, des membres des CHSCT, des ONG, et des collectivités territoriales.

Dans le domaine des mesurages des polluants à l'atmosphère, il est proposé deux formations au catalogue :

« La mesure des émissions de polluants à l'atmosphère »

- Dispositions réglementaires,
- Que mesurer ? Concentrations, débits, flux et expression des résultats,
- Planification et organisation des campagnes de mesurage afin de disposer de résultats fiables et représentatifs,
- Principes de mesurages manuels et automatiques (vitesse/débit, composés particuliers et gazeux),
- Analyses extractives et in situ, conditionnement des échantillons,
- Dispositif français garantissant la qualité des mesurages : accréditation et agrément des laboratoires, assurance qualité des SRM (Standard Reference Methods : méthodes de références mises en œuvre par les organismes de contrôle) et des AMS (Automatic Measuring System : dispositifs de mesure automatiques utilisés en autosurveillance), certification des analyseurs, incertitude de mesure
- Elaboration des rapports d'essais,
- Evaluation des émissions diffuses,
- Caractérisation et impacts des émissions d'odeurs,
- Mesurages de COV totaux et spécifiques,
- Plan de gestion des solvants.

18-20 mars 2014 à Lyon (en partenariat avec le CPE)

17-19 juin 2014 à Paris

30 septembre - 2 octobre 2014 à Lyon

« La mesure et la maîtrise des émissions industrielles de COV »

- Qu'est-ce qu'un COV ? Emissions canalisées et diffuses
- Dispositions réglementaires relatives aux COV.
- Mesures des émissions canalisées
- Evaluation des émissions diffuses : méthodes d'évaluation par mesurages, modélisation,
- Plan de gestion des solvants.
- Remplir sa déclaration annuelle d'émissions de COV.
- Réduire sa consommation de solvants et les émissions de COV

11-12 mars 2014 à Paris

20-21 novembre 2014 à Lyon (en partenariat avec le CPE)

contact : stephanie.jameaux@ineris.fr