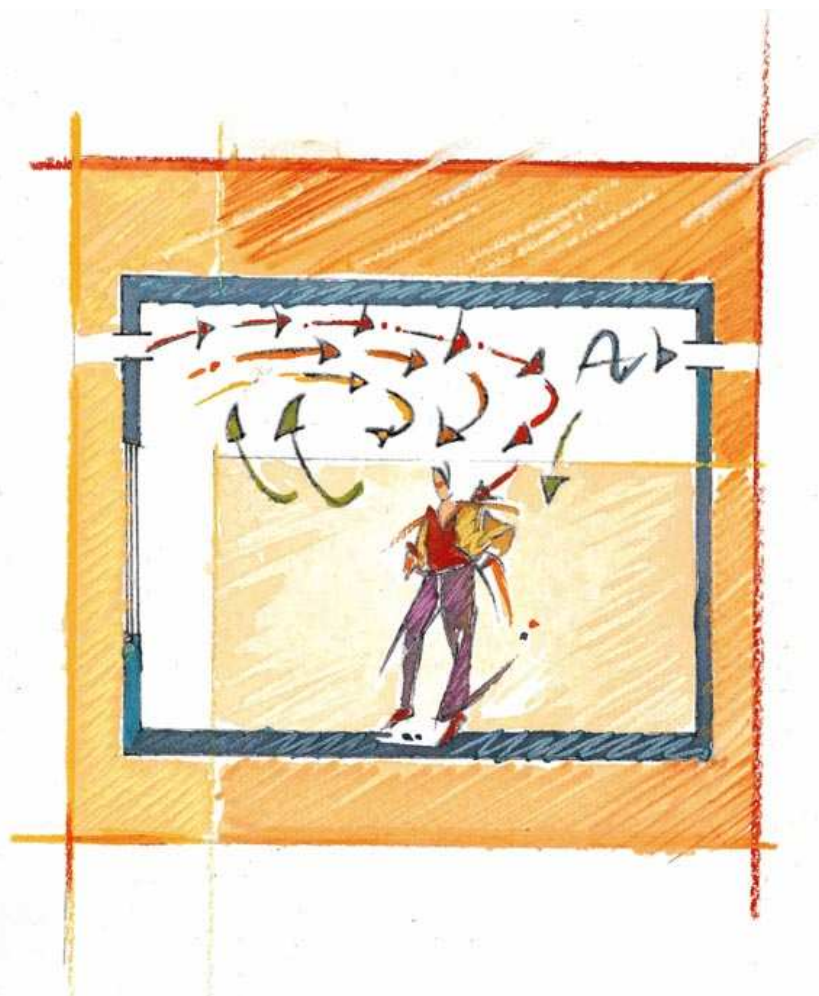


GUIDE DES BONNES PRATIQUES DES MESURES DE DÉBIT D'AIR SUR SITE POUR LES INSTALLATIONS DE VENTILATION



Avec le soutien financier de



direction générale de la compétitivité
de l'industrie et des services

Version provisoire

Le projet ayant permis la réalisation de ce Guide est piloté par un Comité dont les membres sont: ADEME, ALDES, CETIAT, CIAT, COSTIC, DGCIS, DIRECCTE, UNICLIMA

PRÉAMBULE

La réglementation thermique 2012, qui est entrée en vigueur en octobre 2011, impose que toutes les constructions neuves présentent une consommation d'énergie de plus en plus faible. Dans ces conditions, la maîtrise des débits d'air de ventilation dans les bâtiments devient déterminante. Un retour d'expérience montre que la mesure d'un débit de ventilation peut conduire à surestimer celui-ci de 20 à 50 % en cas de mauvaise mise en œuvre des méthodes de mesure, entraînant ainsi des risques

Un débit d'air de ventilation mal estimé entraîne une surconsommation énergétique ou une mauvaise qualité de l'air

de mauvaise qualité de l'air intérieur. Inversement, une mesure qui sous-estimerait le débit d'air inciterait à régler ce dernier à une valeur plus élevée que nécessaire et engendrerait une surconsommation énergétique inutile. C'est pourquoi la mesure des débits d'air sur site est un paramètre critique pour la réception des installations de ventilation.

L'enjeu du projet, concrétisé par ce guide et porté par le Centre Technique des Industries Aérauliques et Thermiques (CETIAT) en partenariat avec les sociétés ALDES et CIAT, est de sensibiliser les entreprises du génie climatique, et plus particulièrement les artisans installateurs et organismes de contrôle, à l'impact des conditions d'utilisation du matériel de mesure de débit d'air et de les guider dans le choix d'instruments de mesure adaptés.

La méthodologie à mettre en place pour réaliser ces mesures est très différente selon que l'on cherche à réaliser une mesure d'un faible débit d'air sur pour une bouche de petite dimension, ou sur un grand diffuseur d'air de type tertiaire ou industriel (qui peut présenter une géométrie très différente d'un modèle à l'autre). Les méthodes relatives aux mesures de débit en conduit sont basées sur des mesures de profils de vitesse. Les méthodes proposées peuvent varier en fonction du nombre de points de mesure et de leur position afin d'optimiser le rapport temps passé/exactitude.

Les données recueillies sont rassemblées dans ce guide des bonnes pratiques de mesure débit d'air pour les installations aérauliques. Cette première version n'inclut pas les données concernant le désenfumage mécanique qui seront insérées ultérieurement.

Les partenaires de ce projet ont reçu le soutien de DGCIS (Direction Générale de la Compétitivité, de l'Industrie et des Services) pour l'élaboration de ce guide.

REMERCIEMENTS

Ce guide a été réalisé avec la collaboration de :

Isabelle CARÉ (CETIAT)

Pierre CHAFFOIS (ALDES)

Pierre HENRY (CIAT)

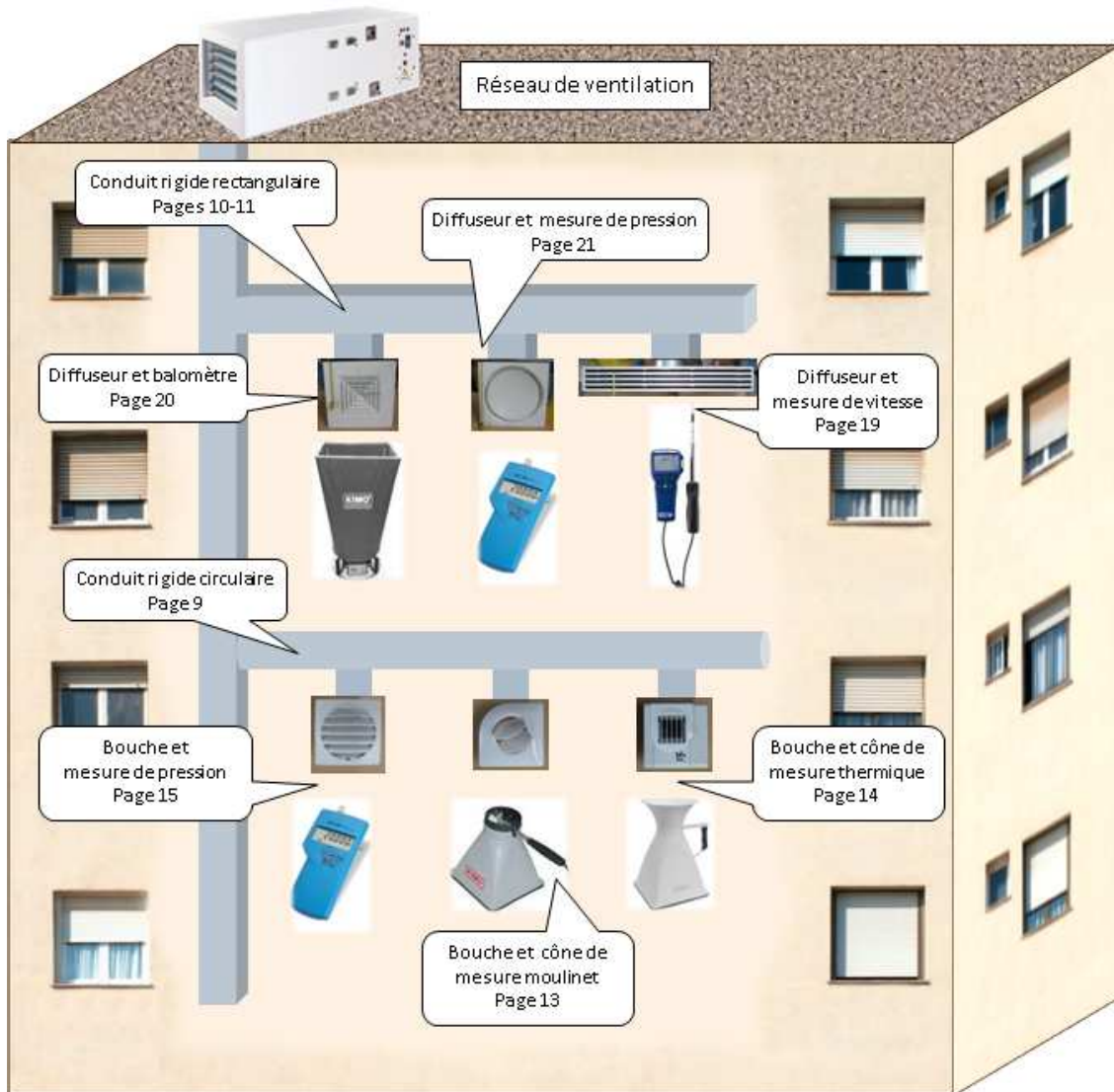
Les photos d'illustration ont été aimablement fournies par ALDES, CIAT, KIMO, TESTO, TH Industrie.

Nous remercions particulièrement pour leur participation financière la Commission Technique Mesures du CETIAT et la DGCIS.

SOMMAIRE

PRÉAMBULE.....	3
REMERCIEMENTS.....	3
SOMMAIRE	4
SÉLECTION D'UNE MÉTHODE DE MESURE ADAPTÉE	5
1 LA MESURE DE DÉBIT EN CONDUIT RIGIDE.....	7
1.1 Cas d'un conduit circulaire.....	9
1.2 Cas d'un conduit rectangulaire de facteur de forme inférieur à 4.....	10
1.3 Cas d'un conduit rectangulaire de facteur de forme supérieur à 4.....	11
2 LA MESURE DE DÉBIT AU NIVEAU D'UNE BOUCHE.....	12
2.1 Utilisation d'un cône de mesure équipé d'un moulinet.....	13
2.2 Utilisation d'un cône de mesure équipé d'un anémomètre thermique.....	14
2.3 Mesure de pression.....	15
2.4 Synthèse.....	15
3 LA MESURE DE DÉBIT AU NIVEAU D'UN DIFFUSEUR	18
3.1 Mesure de vitesse	19
3.2 Utilisation d'un balomètre.....	20
3.3 Mesure de pression.....	21
3.4 Synthèse.....	22
ANNEXE 1 LES MÉTHODES DE MESURE DE DÉBIT PAR EXPLORATION DU CHAMP DES VITESSES.....	25
1 MÉTHODE DE RÉFÉRENCE : NF X 10-112 [1]	26
2 RÉCEPTION DES INSTALLATIONS DE VENTILATION : NF EN 12599 [2]	28
3 VENTILATION DANS LES BÂTIMENTS : MESURES DE DÉBIT D'AIR SUR SITE - MÉTHODES : PR NF EN 16211 [3]	30
4 MÉTHODES NON NORMALISÉES.....	32
ANNEXE 2 QUELQUES RAPPELS AÉRAULIQUES.....	33
1 MASSE VOLUMIQUE DE L'AIR	33
2 DÉBIT MASSIQUE / DÉBIT VOLUMIQUE.....	35
3 CALCUL DU DIAMÈTRE HYDRAULIQUE D'UNE CONDUITE, DH.....	36
ANNEXE 3 LES MOYENS DE MESURAGE	37
1 LA MESURE DE PRESSION.....	37
2 LA MESURE DE VITESSE	39
3 LA MESURE DIRECTE DE DÉBIT.....	43
ANNEXE 4 DÉFINITION ET CONCEPTION D'UN CADRE DE DÉPORT	45
BIBLIOGRAPHIE.....	47

SÉLECTION D'UNE MÉTHODE DE MESURE ADAPTÉE



Version provisoire

1 LA MESURE DE DÉBIT EN CONDUIT RIGIDE

Pour mesurer un débit dans une conduite fermée, la technique la plus communément utilisée est la mesure par exploration de champ de vitesses. Le principe de cette technique consiste à diviser une section de la conduite en surfaces élémentaires, à mesurer la vitesse dans chacune de ces surfaces et à réaliser une moyenne arithmétique de ces vitesses afin de déterminer la vitesse moyenne dans la section. Le débit est ensuite calculé en multipliant cette vitesse moyenne par la section de la conduite étudiée.



Les vitesses dans la conduite sont mesurées à l'aide d'un anémomètre¹ de faible dimension tel qu'un anémomètre thermique ou un tube de Pitot associé à un manomètre².

La détermination du débit circulant dans un conduit à partir d'une exploration de champ de vitesses nécessite un grand nombre de points de mesure de vitesse répartis selon un schéma d'exploration précis afin d'obtenir un niveau d'exactitude suffisant.

Plusieurs normes [NF X 10-112 [1], NF EN 12599 [2], Pr NF EN 16211³ [3]] présentent des schémas d'exploration définis en fonction du type de conduit (circulaire, rectangulaire), du profil de vitesses attendu dans le conduit, de la facilité de mise en œuvre et de l'exactitude attendue. En pratique, des méthodes non normalisées sont également employées.

L'Annexe 1 présente dans le détail les particularités de chacune des méthodes envisagées dans ce guide.

Pour chacun des schémas d'exploration étudiés, les configurations suivantes sont considérées :

- Schéma complet décrit dans la norme citée
- Schéma incomplet de la norme mais correspondant à une situation couramment rencontrée sur site (généralement 1 direction d'exploration au lieu de 2)

Pour les conduits circulaires et les conduits rectangulaires de différents facteurs de forme, ce chapitre présente l'erreur de mesure attendue sur le débit en fonction du schéma d'exploration des vitesses et de la distance aux perturbations amont. Les perturbations considérées sont un coude simple, deux

¹ Le principe de fonctionnement et les précautions d'emploi des différents types d'anémomètres sont présentés en Annexe 3, §2

² L'utilisation d'un anémomètre de type "petit moulinet" doit être considérée avec beaucoup de précautions du fait de l'effet d'obstruction important généré par l'anémomètre dans la conduite et de la gamme de vitesse

³ Ce projet de norme devrait être publié début 2013

coudes coplanaires, deux coudes non coplanaires. Ces perturbations sont très courantes dans un circuit aéraulique et sont considérées comme très perturbantes pour l'écoulement.

L'étude de l'impact des singularités sur le profil de vitesses dans les différents conduits a été menée par simulation numérique à l'aide d'un code de calcul de mécanique des fluides dont les résultats ont été validés par comparaison à des résultats expérimentaux.

Les tableaux ci-après présentent, en fonction de la géométrie du conduit (circulaire, rectangulaire de facteur de forme⁴ inférieur ou supérieur à 4) et du schéma d'exploration de points envisagé, l'incertitude de mesure attendue, incluant celle du dispositif de mesure ainsi que l'erreur due à la méthode de mesure (i.e. au schéma d'exploration).

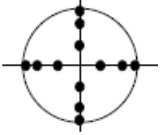

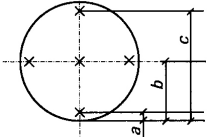
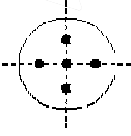
On considère ici que le dispositif de mesure de vitesse est adapté au besoin, suivi métrologiquement et que son incertitude de mesure est de 5% de la vitesse mesurée au maximum.

Afin de ne pas dégrader la qualité de la mesure de manière excessive, il est également nécessaire, lors des opérations de mesurage, de veiller aux points suivants :

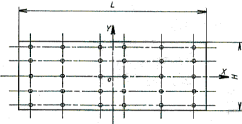
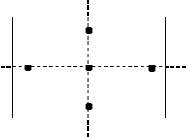
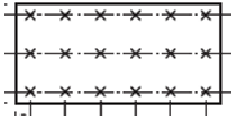
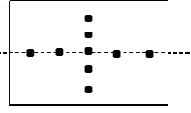
- **S'assurer que la sonde de vitesse est bien perpendiculaire à l'axe de la conduite lorsqu'elle est insérée et respecter sa position par rapport au sens de l'écoulement et au schéma d'exploration du champ de vitesses considéré**
- **En chaque point de mesure, calculer une valeur moyenne de la vitesse en effectuant plusieurs relevés ou utiliser la fonction moyenne de l'instrument s'il en possède une**
- **Déterminer le diamètre intérieur de la conduite pour pouvoir positionner les points de mesure de vitesse**
- **Ne pas oublier de reboucher les trous dans la conduite après la réalisation des mesures**

⁴ Le facteur de forme est défini comme le rapport entre la longueur du conduit rectangulaire et sa largeur

1.1 CAS D'UN CONDUIT CIRCULAIRE

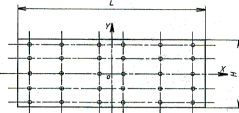
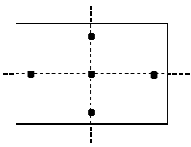
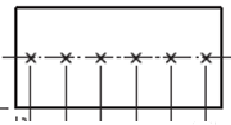
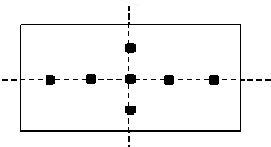
Schéma d'exploration des points (cf Annexe 1)	Nombre de diamètres explorés	Incertitude de mesure attendue (%)			
		L/D : Distance aux singularités amont			
		1	4	10	45
NF X 10-112 [1] 	2	11	11	8	7
	1	28	12	12	7
NF EN 12599 [2] 	2	13	7	8	7
	1	30	11	10	6
Pr NF EN 16211 [3] 	2	11	8	8	7
	1	29	12	11	8
Méthode non normalisée 	2	16	15	13	13
	1	31	20	14	14

1.2 CAS D'UN CONDUIT RECTANGULAIRE DE FACTEUR DE FORME⁵ INFÉRIEUR À 4

Schéma d'exploration des points (cf Annexe 1)	Nombre de côtés explorés	Incertitude de mesure attendue (%)			
		L/D : Distance aux singularités amont			
		1	5	10	45
NF X 10-112 [1] 	2	32	10	8	6
	1	67	44	14	13
NF EN 12599 [2] 	2	21	16	15	13
	1	55	43	31	24
Pr NF EN 16211 [3] 	2	35	10	8	7
	1	48	33	14	13
Méthode non normalisée 	2	30	19	21	15
	1	68	67	30	22

⁵ Le facteur de forme est défini par le rapport de la plus grande largeur sur la hauteur

1.3 CAS D'UN CONDUIT RECTANGULAIRE DE FACTEUR DE FORME⁶ SUPÉRIEUR À 4

Schéma d'exploration des points (cf Annexe 1)	Nombre de côtés explorés	Incertitude de mesure attendue (%)			
		L/D : Distance aux singularités amont			
		1	5	10	45
NF X 10-112 [1] 	2	67	9	9	7
	1	69	15	12	12
NF EN 12599 [2] 	2	66	13	13	10
	1	68	22	16	14
Pr NF EN 16211 [3] 	1	69	20	11	10
Méthode non normalisée 	1	69	20	12	12

⁶ Le facteur de forme est défini par le rapport de la plus grande largeur sur la hauteur

2 LA MESURE DE DÉBIT AU NIVEAU D'UNE BOUCHE

Une bouche est un terminal permettant l'insufflation ou l'extraction de l'air ; elle peut être ,fixe ou réglable, omnidirectionnelle ou unidirectionnelle.

Elle est de petite taille (au maximum de l'ordre de 200 mmx200 mm) et est souvent installée dans l'habitat bien qu'elle puisse également se rencontrer dans le tertiaire.



Le débit d'air est inférieur à 200 m³/h. L'écoulement d'air, à proximité de la bouche peut être peu ou fortement perturbé par la géométrie de celle-ci.

Les mesures de débit d'air au niveau de ce type de bouche sont réalisées directement à l'aide d'un cône de mesure équipé d'un moulinet ou d'un anémomètre thermique. Elles peuvent également être obtenues, pour les bouches fixes et sous certaines conditions pour les bouches autoréglables, à l'aide de mesures de pression.

2.1 UTILISATION D'UN CÔNE DE MESURE ÉQUIPÉ D'UN MOULINET

Afin de mesurer le débit traversant une bouche aéraulique, un cône de mesure est souvent utilisé. Le cône canalise l'air vers une section aéraulique connue dans laquelle l'élément de mesure de vitesse est positionné. Ce dernier est un anémomètre de type moulinet positionné à l'extrémité du cône de mesure, opposée à la bouche. Le système de mesure entraîne une perte de charge supplémentaire sur le réseau qui peut, si la pression disponible est faible, entraîner une variation du débit et modifier sa répartition dans les différentes branches du réseau aéraulique.



Pour le principe de fonctionnement et les conseils d'utilisation des anémomètres à moulinet, voir en Annexe 3, §2.

Méthode bien adaptée pour :



- Bouches fixes et variables
- Mesure en extraction
- Toute directivité de flux d'air
- Débit d'air supérieur à 50 m³/h

Précautions à prendre :



- Pour les mesures en insufflation, particulièrement dans le cas d'un flux d'air très dévié, éloigner le cône de mesure de la bouche par ajout d'un cadre de déport (cf "Pour aller plus loin et améliorer la méthode de mesure")
- Si la pression disponible sur le réseau est faible, prendre en compte la variation de débit induite

A éviter dans le cas de :



- Débit inférieur à 50 m³/h

Pour aller plus loin et améliorer la méthode de mesure* :



- Déporter la mesure par rapport à la bouche (cf Annexe 4 pour la conception d'un cadre de déport)
- Centrer le cône par rapport à la bouche dans la mesure du possible
- Veiller à l'étanchéité du montage du cône sur la paroi

*: Si ces précautions ne sont pas respectées, l'incertitude de mesure due à la méthode risque d'être augmentée.

2.2 UTILISATION D'UN CÔNE DE MESURE ÉQUIPÉ D'UN ANÉMOMÈTRE THERMIQUE

Afin de mesurer le débit traversant d'une bouche aéraulique, un cône de mesure est souvent utilisé. Le cône canalise l'air vers une section aéraulique connue dans laquelle l'élément de mesure de vitesse est positionné. Ce dernier est un anémomètre de type thermique positionné au centre de l'étranglement du cône. Bien que moins importante que pour les cônes équipés d'un anémomètre à moulinet, le système de mesure entraîne une perte de charge supplémentaire sur le réseau qui peut, si la pression disponible est très faible, entraîner une variation du débit et modifier sa répartition dans les différentes branches du réseau aéraulique.



Pour le principe de fonctionnement et les conseils d'utilisation des anémomètres thermiques, voir en Annexe 3 §2.

Méthode bien adaptée pour :



- Bouches fixes et variables
- Mesure en extraction
- Flux d'air peu dévié lors de la traversée de la bouche
- Quel que soit le débit d'air (dans le respect de l'étendue de mesure de l'anémomètre)

Précautions à prendre :



- Pour les mesures en insufflation, particulièrement dans le cas d'un flux d'air très dévié, éloigner le cône de mesure de la bouche par ajout d'un cadre de déport (cf "Pour aller plus loin et améliorer la méthode de mesure")
- Positionner correctement l'anémomètre au centre de l'étranglement du cône, conformément aux spécifications du constructeur

A éviter dans le cas de :



- Bouche dont le flux d'air est très dévié lors de la traversée

Pour aller plus loin et améliorer la méthode de mesure* :



- Déporter la mesure par rapport à la bouche (cf Annexe 4 pour la conception d'un cadre de déport)
- Centrer le cône par rapport à la bouche dans la mesure du possible
- Veiller à l'étanchéité du montage du cône sur la paroi

*: Si ces précautions ne sont pas respectées, l'incertitude de mesure due à la méthode risque d'être augmentée.

2.3 MESURE DE PRESSION

Le débit d'air dans une bouche de ventilation, Q_v ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$), peut être évalué à partir d'une mesure de pression différentielle au niveau de celle-ci, ΔP (Pa). A partir du coefficient caractéristique de la bouche, nommé K_{bouche} et fourni par le fabricant, et de la masse volumique de l'air, ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), il est possible de déterminer le débit volumique Q_v par une relation du type :



$$Q_v = K_{\text{bouche}} \times \sqrt{\frac{2 \times \Delta P}{\rho}}$$

Pour les définitions des pressions, le principe de fonctionnement et les conseils d'utilisation des capteurs de pression, voir en Annexe 3 §1.

Remarque : dans le cas de bouches autoréglables, dont la plage de fonctionnement en pression est connue, la mesure de pression en amont de la bouche permet de vérifier si celle-ci est dans sa plage de fonctionnement : dans ce cas, cette vérification suffit à réceptionner l'installation.



Solliciter le constructeur pour connaître le coefficient de la bouche s'il n'est pas fourni dans la documentation ou directement indiqué sur la bouche

Méthode bien adaptée pour :



- Bouches fixes
- Pression différentielle supérieure à 10 Pa

Précautions à prendre :



- Mesure d'une pression différentielle inférieure à 10 Pa : le choix du capteur de pression utilisé doit être adapté à la mesure (cf Annexe 3 §1)

A éviter dans le cas de :



- Bouches à débit variable

Pour aller plus loin et améliorer la méthode de mesure* :





- Suivre les recommandations du constructeur de l'appareil de mesure pour les mesures de pression et de la bouche pour la position de la prise de mesure

*: Si ces précautions ne sont pas respectées, l'incertitude de mesure due à la méthode risque d'être augmentée.

2.4 SYNTHÈSE

2.4.1 INCERTITUDE DE MESURE

Le tableau ci-dessous récapitule l'incertitude de mesure que l'on peut attendre de chaque méthode de mesure lorsque les conditions les plus favorables sont réunies et lorsqu'elles ne le sont pas.

MÉTHODE DE MESURE	INCERTITUDE DE MESURE ATTENDUE	
		
Cône de mesure moulinet	< 10%	> 25%
Cône de mesure fil chaud	< 10%	> 50%
Mesure de pression	< 10%	> 50%



Incertainitude de mesure attendue "au mieux" si toutes les conditions favorables sont réunies



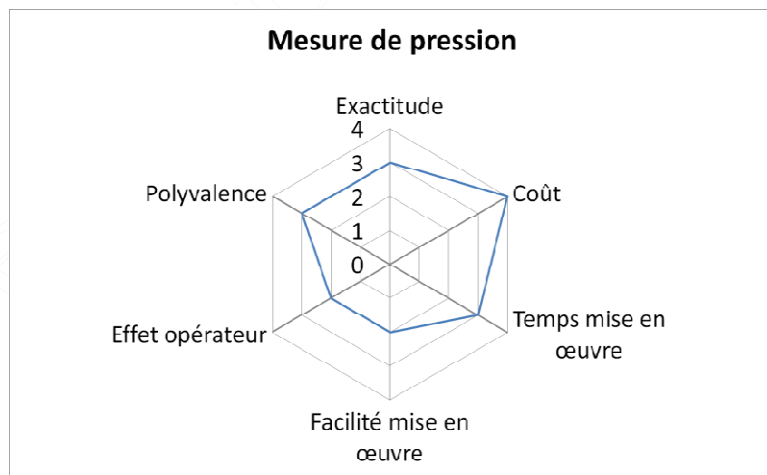
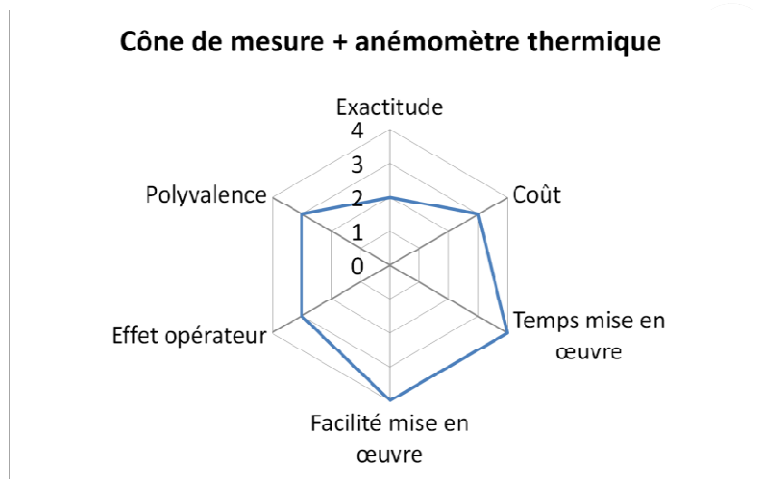
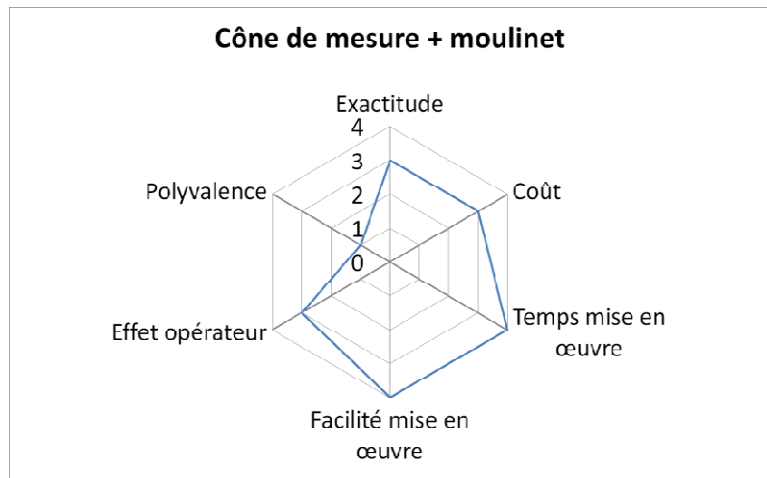
Incertainitude de mesure attendue "au pire" si certaines des conditions favorables ne sont pas réunies

2.4.2 COMPARAISON DES PERFORMANCES

Un comparatif des différentes méthodes de mesure de débit au niveau d'une bouche est également réalisé. Ce comparatif permet de hiérarchiser les performances des méthodes sur des critères autres que ceux directement liés à la mesure :

Les caractéristiques comparées et les critères de jugement sont les suivants :

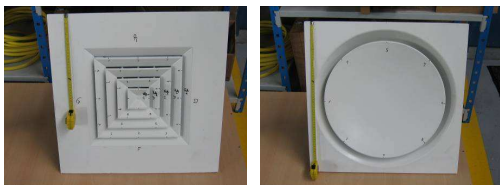
Exactitude	<i>Étroitesse de l'accord entre la valeur mesurée et une valeur vraie du mesurande en dépit des perturbations des paramètres environnants (0 : peu précis – 4 : très précis)</i>
Coût	<i>Prix de l'instrumentation (0 : très cher, > 1000€ – 4 : peu cher, < 500€)</i>
Temps mise en œuvre	<i>Temps nécessaire pour la mise en œuvre de l'instrument (0 : long – 4 : court)</i>
Facilité mise en œuvre	<i>Facilité avec laquelle une mesure de débit est obtenue (0 : difficile – 4 : très facile)</i>
Effet opérateur	<i>Influence de la mise en œuvre par l'opérateur (0 : influence forte – 4 : pas d'influence)</i>
Polyvalence	<i>Capacité de la méthode à être utilisée pour des applications variées (0 : peu polyvalente – 4 : très polyvalente)</i>



3 LA MESURE DE DÉBIT AU NIVEAU D'UN DIFFUSEUR

Un diffuseur est un terminal à air, d'insufflation ou d'extraction, fixe ou réglable.

Il est souvent installé dans des bâtiments de type tertiaire et peut être de taille et de forme très variables. Il est majoritairement métallique.



Le débit d'air peut être compris entre 100 et 1000 m³/h. L'écoulement d'air, à proximité de la bouche, peut être peu ou fortement perturbé par la géométrie de celle-ci.



Les mesures de débit d'air au niveau de ce type de diffuseur sont souvent réalisées directement à l'aide d'un balomètre. Elles peuvent également être obtenues, pour les diffuseurs fixes, à l'aide de mesures de vitesse ou de mesures de pression.

Pour les diffuseurs par déplacement, la mesure de débit est très difficile à cause du faible niveau des vitesses. On privilégiera alors la mesure de débit en conduit (cf §1). La problématique liée à ces diffuseurs n'est donc pas abordée dans ce chapitre.

3.1 MESURE DE VITESSE

Pour mesurer le débit au niveau d'un diffuseur, il est possible d'utiliser un anémomètre, de préférence thermique, afin de limiter l'effet d'obstruction. La vitesse d'air est mesurée en plusieurs points répartis au niveau de la section de passage. On réalise ensuite la moyenne arithmétique de ces différents relevés pour déterminer la vitesse moyenne, V_k (en $m.s^{-1}$), en sortie de diffuseur :



$$V_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_{k_i}$$

avec N , le nombre de points de mesure de vitesse d'air et V_{k_i} (en $m.s^{-1}$), la vitesse mesurée à la position i . En utilisant ensuite la section équivalente du diffuseur, A_k (en m^2), fournie par le constructeur, on détermine le débit volumique, Q_v (en $m^3.h^{-1}$), par la relation : $Q_v = A_k \times V_k \times 3600$

Pour le principe de fonctionnement et les conseils d'utilisation des anémomètres thermiques, voir en Annexe 3, §2.

Méthode bien adaptée pour :



- Diffuseurs fixes

Précautions à prendre :



- Réaliser un nombre de points de mesure de vitesse suffisant (en explorant au préalable la dispersion des vitesses au niveau du diffuseur)
- S'assurer que la répartition des points de mesure est homogène sur l'ensemble de la section de passage

A éviter dans le cas de :



- Diffuseurs réglables
- Diffuseurs par déplacement

Pour aller plus loin et améliorer la méthode de mesure* :



- Déporter la mesure dans le cas des diffuseurs à fentes (cf Annexe 4 pour la conception d'un cadre de déport)
- Augmenter le nombre de points de mesure de vitesse

*: Si ces précautions ne sont pas respectées, l'incertitude de mesure due à la méthode risque d'être augmentée.

3.2 UTILISATION D'UN BALOMÈTRE

Afin de mesurer directement le débit d'air au passage d'un diffuseur, il est possible d'utiliser un balomètre (ou hotte de mesure de débit). La hotte en matériau synthétique souple, de forme tronconique, canalise l'air vers une section aéraulique connue dans laquelle l'élément de mesure de vitesse est positionné.



Un réseau de prises de pression différentielle (principe de mesure du tube de Pitot) ou de fils chauds (principe de mesure de l'anémomètre thermique) occupe la section de mesure et permet une mesure directe de débit.

Le système de mesure entraîne une perte de charge supplémentaire sur le réseau qui peut, si la pression disponible est faible, entraîner une variation du débit et modifier sa répartition dans les différentes branches du réseau aéraulique.

Pour le principe de fonctionnement et les conseils d'utilisation des balomètres, voir en Annexe 3, §3.

Méthode bien adaptée pour :



- Diffuseurs de tous types (sous réserve de dimensions adaptées à la hotte)
- Flux d'air peu dévié lors de la traversée du diffuseur
- Débit d'air supérieur à $100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

Précautions à prendre :



- Mesures en insufflation, particulièrement dans le cas d'un flux d'air très dévié
- Adapter la taille de la hotte à la taille du diffuseur (juste supérieur)
- Si la pression disponible sur le réseau est faible, prendre en compte la variation de débit induite

A éviter dans le cas de :



- Diffuseur à jet hélicoïdal
- Diffuseur à déplacement
- Débit d'air inférieur à $100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

Pour aller plus loin et améliorer la méthode* :



- Centrer la hotte par rapport au diffuseur dans la mesure du possible, sinon un risque de dégradation de la mesure existe
- Veiller à l'étanchéité du montage de la hotte sur la paroi

*: Si ces précautions ne sont pas respectées, l'incertitude de mesure due à la méthode risque d'être augmentée.

3.3 MESURE DE PRESSION

Le débit d'air dans un diffuseur, Q_v ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$), peut être évalué à partir d'une mesure de pression différentielle, ΔP (Pa) si le plenum du diffuseur est équipé d'une prise de pression. A partir du coefficient caractéristique de la bouche, nommé $K_{\text{diffuseur}}$ et fourni par le fabricant, et de la masse volumique de l'air, ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), il est possible de déterminer le débit volumique Q_v par une relation du type :



$$Q_v = K_{\text{diffuseur}} \times \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}$$

Pour les définitions des pressions, le principe de fonctionnement et les conseils d'utilisation des capteurs de pression, voir en Annexe 3 §1.



Solliciter le constructeur pour connaître le coefficient du diffuseur s'il n'est pas fourni dans la documentation

Méthode bien adaptée pour :



- Diffuseurs fixes de courbe débit/pression connue
- Pression différentielle supérieure à 10 Pa

Précautions à prendre :



- Mesure d'une pression différentielle inférieure à 10 Pa : le choix du capteur de pression utilisé doit être adapté à la mesure (cf Annexe 3 §1)

A éviter dans le cas de :



- Diffuseurs réglables, sauf si le constructeur fournit un coefficient $K_{\text{diffuseur}}$ en fonction du réglage

Pour aller plus loin et améliorer la méthode de mesure* :





- Suivre les recommandations du constructeur de l'appareil de mesure pour les mesures de pression et de la bouche pour la position de la prise de mesure

*: Si ces précautions ne sont pas respectées, l'incertitude de mesure due à la méthode risque d'être augmentée.

3.4 SYNTHÈSE

3.4.1 INCERTITUDE DE MESURE

Le tableau ci-dessous récapitule l'incertitude de mesure que l'on peut attendre de chaque méthode de mesure lorsque les conditions les plus favorables sont réunies et lorsqu'elles ne le sont pas.

MÉTHODE DE MESURE	INCERTITUDE DE MESURE ATTENDUE	
		
Mesure de vitesse	< 20%	> 30%
Balomètre	< 5%	> 20%
Mesure de pression	< 10%	> 30%



Incertitude de mesure attendue "au mieux" si toutes les conditions favorables sont réunies



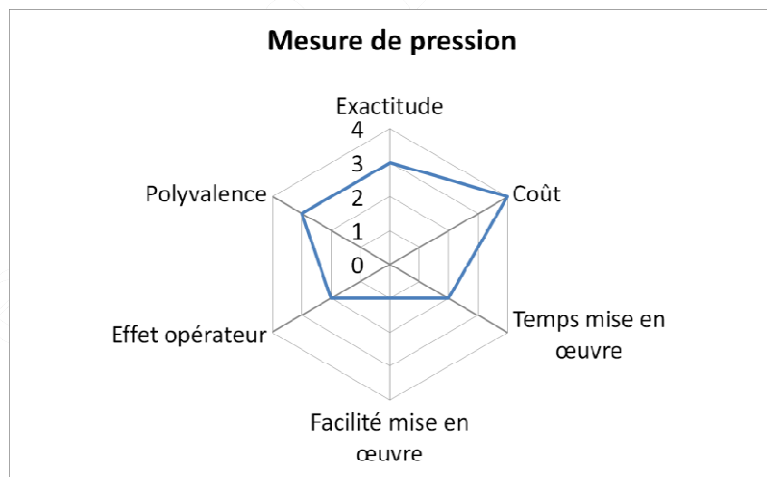
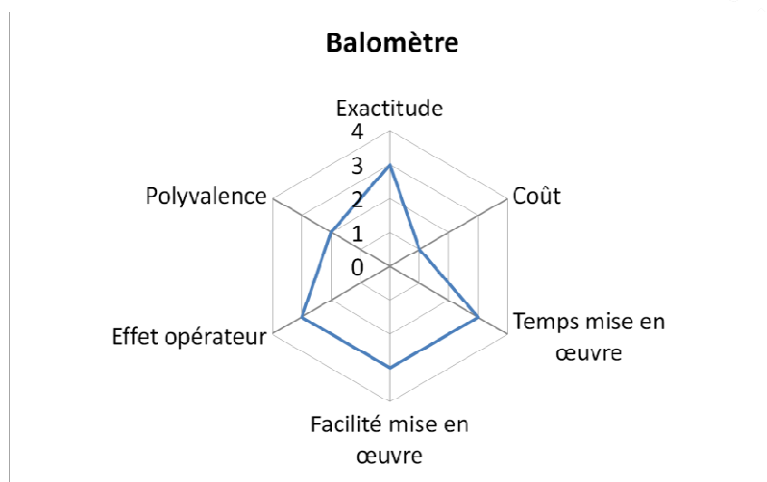
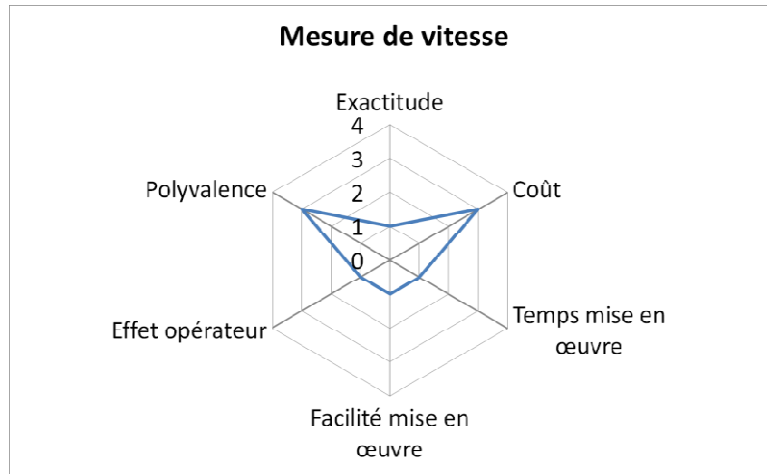
Incertitude de mesure attendue "au pire" si certaines des conditions favorables ne sont pas réunies

3.4.2 COMPARAISON DES PERFORMANCES

Un comparatif des différentes méthodes de mesure de débit au niveau d'un diffuseur est également réalisé. Ce comparatif permet de hiérarchiser les performances des méthodes sur des critères autres que ceux directement liés à la mesure :

Les caractéristiques comparées et les critères de jugement sont les suivants :

Exactitude	<i>Étroitesse de l'accord entre la valeur mesurée et une valeur vraie du mesurande en dépit des perturbations des paramètres environnants (0 : peu précis – 4 : très précis)</i>
Coût	<i>Prix de l'instrumentation (0 : très cher, > 1000€ – 4 : peu cher, < 500€)</i>
Temps mise en œuvre	<i>Temps nécessaire pour la mise en œuvre de l'instrument (0 : long – 4 : court)</i>
Facilité mise en œuvre	<i>Facilité avec laquelle une mesure de débit est obtenue (0 : difficile – 4 : très facile)</i>
Effet opérateur	<i>Influence de la mise en œuvre par l'opérateur (0 : influence forte – 4 : pas d'influence)</i>
Polyvalence	<i>Capacité de la méthode à être utilisée pour des applications variées (0 : peu polyvalente – 4 : très polyvalente)</i>



Version provisoire

ANNEXE 1

LES MÉTHODES DE MESURE DE DÉBIT PAR EXPLORATION DU CHAMP DES VITESSES

La mesure du débit dans un conduit peut être réalisée à partir d'une exploration des vitesses effectuées avec un anémomètre ou un tube de Pitot.

Les conditions d'utilisations des différents types d'instruments de mesure de vitesse sont indiquées en Annexe 3.

Le principe de cette technique consiste à diviser une section du conduit en surfaces élémentaires, à mesurer la vitesse dans chacune de ces zones et à réaliser une moyenne de ces vitesses afin de déterminer la vitesse moyenne dans la section.

$$V = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N V_i$$

avec :

- V , la vitesse moyenne dans la section du conduit (en m.s^{-1})
- V_i , la vitesse mesurée dans la surface élémentaire i , (en m.s^{-1})
- N , le nombre de surfaces élémentaires

Le débit volumique est ensuite calculé en multipliant cette vitesse moyenne par la section de la conduite étudiée.

$$Q_v = V \times S \times 3600$$

avec :

- Q_v , le débit volumique dans les conditions réelles de pression et température (en $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$)
- S , la section de passage du conduit (en m^2)

La précision de la méthode de mesure est limitée par la forme du profil des vitesses dans le conduit, de la distance entre le plan de mesurage et les singularités. En effet, plus les mesures sont réalisées proches d'une singularité (coude, vanne, ...), plus le profil des vitesses est perturbé. Afin d'obtenir un niveau d'exactitude suffisant, il est alors nécessaire de multiplier le nombre de points de mesure de vitesse et/ou de s'éloigner des singularités.

Des schémas de répartition de points de mesure de vitesse sont proposés dans différentes normes. Ces schémas ainsi que les contraintes de mise en œuvre sont présentés dans cette annexe.

1 MÉTHODE DE RÉFÉRENCE : NF X 10-112 [1]

Cette norme traite de la détermination, par exploration du champ des vitesses au moyen de tubes de Pitot doubles, du débit volumique d'un écoulement régulier dans un conduit fermé.

Cette norme décrit en particulier le principe de la méthode d'intégration du champ de vitesses dite « Log-Tchebycheff » ainsi que les contraintes d'application, en termes de longueurs droites amont/aval, notamment. Elle peut être considérée comme la méthode de référence pour la mesure de débit d'air par exploration du champ de vitesse puisque son exactitude, si les conditions de mise en pratique sont respectées, est inférieure à 3%.

La section de mesure est partagée en plusieurs éléments. On prédétermine des positions de mesure dans chaque élément de section à partir d'une hypothèse sur la forme mathématique de la loi de répartition des vitesses dans l'élément de section considéré.

Par hypothèse, l'écoulement est supposée turbulent. La forme mathématique de la loi de répartition des vitesses en fonction de la distance à la paroi est logarithmique dans les éléments disposés à la périphérie de la section et polynomiale dans les autres éléments.

La répartition des points de mesure est donnée dans des tableaux pour les conduits de forme circulaire et rectangulaire :

- Pour un conduit circulaire, les mesures doivent être réalisées sur 2 diamètres minimum avec 3 points minimum par rayon, soit 12 points minimum selon le schéma "log-Tchebycheff" proposé dans la norme

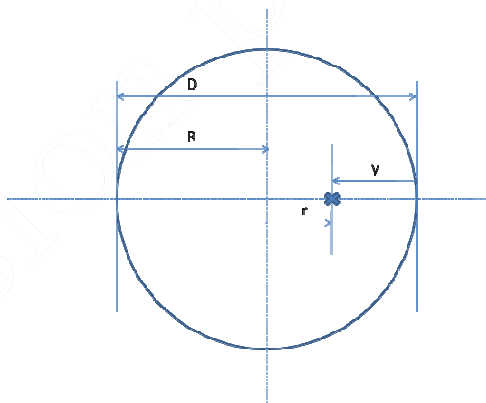


Figure 1 – Représentation de la signification des paramètres de position pour une conduite cylindrique

Tableau 1 - Répartition selon un schéma "Log-Tchebycheff" des points de mesure de vitesse dans le cas d'une conduite circulaire (NF X 10-112, Septembre 1977 [1])

Nombre de points de mesure par rayon	y/D
3	0,3123
	0,1374
	0,0321
4	0,3343
	0,1938
	0,1000
	0,0238
5	0,3567
	0,2150
	0,1554
	0,0764
	0,0189

Avec :

- D, le diamètre intérieur de la conduite
 - y, la distance par rapport à la paroi
- Pour les conduits rectangulaires, les mesures doivent être réalisées sur 25 points minimum selon le schéma "log-Tchebycheff" proposé dans la norme (5 droites d'exploration par côté)

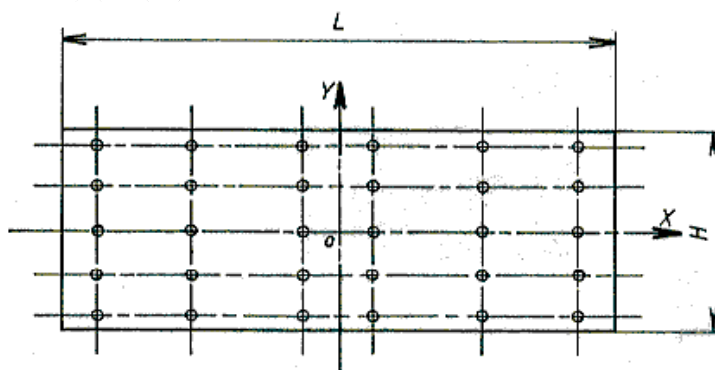


Figure 2 - Positions des points de mesure dans une conduite de section rectangulaire dans le cas de la méthode "log-Tchebycheff" (NF X 10-112, Septembre 1977 [1])

Tableau 2 - Répartition selon un schéma "Log-Tchebycheff" des points de mesure de vitesse dans le cas d'une conduite rectangulaire (NF X 10-112, Septembre 1977 [1])

Nombre de points de mesure	Valeurs de X/L ou Y/H			
	5	0	$\pm 0,212$	
6	$\pm 0,063$	$\pm 0,265$		$\pm 0,439$
7	0	$\pm 0,134$	$\pm 0,297$	$\pm 0,447$

Les conditions d'application de cette méthode sont les suivantes :

- Nombre de points minimum à respecter (cf ci-dessus en fonction de la géométrie de la conduite)
- Utilisation d'un tube de Pitot. Toutefois, la méthode est applicable avec n'importe quel autre anémomètre tant que le rapport entre le diamètre de celui-ci et le diamètre de la conduite est inférieur à 0,02. Cette condition permet de négliger l'effet d'obstruction de l'anémomètre dans le conduit
- La longueur droite de conduit entre la section de mesure et toute singularité importante en amont doit être au moins 20 fois le diamètre d'un conduit de section circulaire (ou 80 fois le diamètre hydraulique d'un conduit de section quelconque)⁷
- La longueur droite de conduit entre la section de mesure et toute singularité importante en aval doit être au moins 5 fois le diamètre d'un conduit de section circulaire (ou 20 fois le diamètre hydraulique d'un conduit de section quelconque)

2 RÉCEPTION DES INSTALLATIONS DE VENTILATION : NF EN 12599 [2]

Cette norme spécifie des contrôles, **des méthodes d'essai et des instruments de mesure** en vue de **vérifier, au stade de la réception, l'aptitude à l'emploi des systèmes installés.**

La norme s'applique aux systèmes de ventilation et de climatisation mécaniques conçus pour maintenir des conditions de confort dans les bâtiments non résidentiels, **les logements étant exclus.**

Les méthodes de mesure de débit d'air et les appareils de mesure associés sont décrits en Annexe E de la norme. La mesure peut être effectuée :

- Sur la section droite du conduit
- Avec les dispositifs d'étranglement

⁷ Cette condition est pratiquement impossible à respecter sur site et les mesures sont, dans la grande majorité des cas, réalisées avec des longueurs droites amont restreintes. Afin de minimiser les erreurs, on peut alors augmenter le nombre de points de mesure de vitesse par rayon.

- Sur la section droite d'une chambre ou d'un dispositif
- Au niveau des bouches d'air

Si l'on dispose d'une section de mesure appropriée, les mesures doivent être effectuées dans le conduit. Un tableau (Tableau 3) est fourni dans la norme, définissant le nombre de points de mesure en fonction de la distance d'une perturbation et de l'incertitude de mesure recherchée.

Tableau 3 – Nombre de points de mesure requis en fonction de la distance relative a/D_h à partir d'une perturbation et en fonction de l'incertitude maximale recherchée (NF EN 12599, Juillet 2000 [2])

Distance relative a/D _h	Incertitude totale/incertitude de toutes les autres influences		
	10/5	20/5	20/10
1,6	-	15	20
2,0	50	10	14
2,5	34	7	10
3,0	25	6	8
4,0	16	4	5
5,0	12	3	3
6,0	8	2	3

Pour les conduites rectangulaires, la section de mesure est divisée en éléments de surfaces égales (sans hypothèses sur le profil de vitesse). La distance relative entre le point de mesure et la paroi du conduit est alors donnée par la formule suivante :

$$\frac{y_i}{H} = \frac{x_i}{B} = \frac{2i - 1}{2n}$$

avec :

- y_i, x_i , les coordonnées du point de mesure
- B, la largeur du conduit aéraulique
- H, la hauteur du conduit aéraulique
- i, le numéro du point de mesure (sur une droite de mesure)
- n, le nombre de points de mesure (sur une droite de mesure)

Pour les sections circulaires, la méthode de la ligne des centres de gravité est utilisée pour définir les sections élémentaires. Dans ce cas, les mesures doivent être réalisées sur au moins 2 diamètres perpendiculaires. La distance relative entre le point de mesure et la paroi du conduit est calculée à partir de la relation suivante :

$$\frac{y_i}{D} = \frac{1}{2} \times \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2i - 1}{2n}} \right)$$

avec :

- y_i , la distance entre le point de mesure et la paroi du conduit,
- D , le diamètre du conduit,
- i , le numéro du point de mesure,
- n , le nombre de points de mesure

3 VENTILATION DANS LES BÂTIMENTS : MESURES DE DÉBIT D'AIR SUR SITE - MÉTHODES : Pr NF EN 16211 [3]

Ce projet de norme, actuellement au stade de l'enquête, décrit des méthodes de mesure de débit d'air sur site simplifiées ainsi que les incertitudes associées. Cette norme devrait probablement être publiée en 2013.

La méthode par exploration de champ de vitesse décrite est une méthode alternative aux méthodes décrites dans les normes NF X 10-112 et NF EN 12599. Les erreurs dues à l'approche simplifiée sont également définies.

La répartition des points de mesure, dans le cas de conduits de section circulaire et rectangulaire, est donnée dans des tableaux. Le nombre de points de mesure est particulièrement réduit par rapport à la norme NF X 10-112 et dépend des dimensions du conduit :

- Au minimum, 4 points au lieu de 12 dans le cas d'une conduite circulaire
- Au minimum, 6 points au lieu de 25 dans le cas d'une conduite rectangulaire

Les tableaux 4 et 5 fournissent, pour les conduits circulaires et rectangulaires, la disposition des points de mesure :

Tableau 4 - Points de mesure pour un conduit circulaire (Pr NF EN 16211 [3])

Diameter Nominal D mm	Position of measurement points	a mm	b mm	c mm	d mm	Figure
100 125 160	$a=0,29 \cdot D$ $b=0,71 \cdot D$	29 36 46	71 89 114			
200 250 315 400	$a=0,10 \cdot D$ $b=0,50 \cdot D$ $c=0,90 \cdot D$	20 25 32 40	100 125 158 200	180 225 283 360		
500 630 800 1000 1250	$a=0,043 \cdot D$ $b=0,290 \cdot D$ $c=0,710 \cdot D$ $d=0,967 \cdot D$	22 27 34 43 54	145 185 230 290 360	355 445 570 710 800	478 603 766 957 1196	

Tableau 5 - Points de mesure pour une section rectangulaire selon la plus grande longueur L_2 (Pr NF EN 16211 [3])

$150 < L_2 \leq 300$ mm	$300 < L_2 \leq 2000$ mm
$a=0,08 \cdot L_2$ $b=0,43 \cdot L_2$ $c=0,57 \cdot L_2$ $d=0,92 \cdot L_2$	$a=0,06 \cdot L_2$ $b=0,235 \cdot L_2$ $c=0,43 \cdot L_2$ $d=0,57 \cdot L_2$ $e=0,765 \cdot L_2$ $f=0,94 \cdot L_2$

Tableau 6 - Points de mesure pour une section rectangulaire selon la hauteur L_1 (Pr NF EN 16211 [3])

$100 < L_1 \leq 400$	$400 < L_1 \leq 800$	$800 < L_1 \leq 2000$
<p>$100 < L_1 \leq 400$</p>	<p>$400 < L_1 \leq 800$</p>	<p>$800 < L_1 \leq 2000$</p>

Afin de pouvoir appliquer ces méthodes, des conditions de longueurs droites en amont et en aval du plan de mesurage sont définies :

- La longueur droite de conduit entre la section de mesure et toute singularité importante en amont doit être au moins 5 fois le diamètre d'un conduit de section circulaire (ou 6 fois le diamètre hydraulique d'un conduit de section rectangulaire)
- La longueur droite de conduit entre la section de mesure et toute singularité importante en aval doit être au moins 2 fois le diamètre d'un conduit de section circulaire (ou 2 fois le diamètre hydraulique d'un conduit de section rectangulaire)

4 MÉTHODES NON NORMALISÉES

En pratique, sur site, on rencontre communément l'utilisation de méthodes de mesure non normalisées. La pratique diffère d'un opérateur à l'autre. On s'intéressera ici à des méthodes qui sont couramment rencontrées.

Pour les conduits circulaires, 2 points de mesure également répartis sur 2 diamètres perpendiculaires et un point de mesure au centre sont généralement réalisés.

Pour les conduites rectangulaires, la stratégie de répartition employée dépend de la forme du conduit :

- Si le rapport de forme (longueur/largeur) est supérieur à 4, une traversée comprenant 5 à 7 points (selon les dimensions) est réalisée au centre de la hauteur
- Si le rapport de forme (longueur/largeur) est inférieur à 4, trois traversées également réparties sur la hauteur comprenant 5 à 7 points (selon les dimensions) sont réalisées

ANNEXE 2

QUELQUES RAPPELS AÉRAULIQUES

1 MASSE VOLUMIQUE DE L'AIR

La **masse volumique de l'air ρ (*rho*)** définit la masse d'air qui est contenue dans un mètre cube d'air. Elle se mesure en kilogrammes par mètre cube (kg/m^3). L'air est constitué d'air sec et de vapeur d'eau.

1.1 MASSE VOLUMIQUE DE L'AIR SEC, ρ_{as}

Si on considère que l'air sec suit la loi des gaz parfaits⁸, sa masse volumique peut s'écrire sous la forme :

$$\rho_{as} = \frac{P \times M_{as}}{R \times T} \text{ en kg/m}^3$$

avec :

- P, la pression absolue de l'air, en Pa
- T, la température de l'air, en K

Où $T[\text{K}] = t[^\circ\text{C}] + 273,15$

- M_{as} , la masse molaire de l'air sec, en g/mol

Où $M_{as} = 28,959 \text{ g/mol}$ pour l'air sec

- R, la constante des gaz parfaits, en J/mol/K

Où $R = 8,314472 \text{ J/mol/K}$

⁸ Le gaz parfait est un modèle thermodynamique idéal décrivant le comportement de tous les gaz réels à basse pression dans lequel on considère que les molécules de gaz sont suffisamment éloignées les unes des autres pour négliger les interactions d'ordre électrostatique. L'air sec peut être considéré, avec une excellente approximation, comme un gaz parfait puisqu'à pression atmosphérique l'erreur induite par cette hypothèse sur la masse volumique est inférieure à 0,1%.

1.2 MASSE VOLUMIQUE DE L'AIR HUMIDE, ρ_{ah}

Pour déterminer la valeur exacte de la masse volumique de l'air, il faut prendre en compte l'humidité de l'air. Par définition, la masse volumique de l'air humide est la masse de gaz humide (air sec + vapeur d'eau) contenue par unité de volume d'air humide. Elle s'écrit en fonction de la masse volumique de l'air sec dans les mêmes conditions de pression et de température sous la forme :

$$\rho_{ah} = \rho_{as} \times \left(1 - \frac{M_{as} - M_v}{M_{as}} \times \frac{p_v}{P} \right) \text{ en kg/m}^3$$

Avec

- M_v , la masse molaire de la vapeur d'eau, en g/mol

Où $M_v = 18,015 \text{ g/mol}$

- p_v , la pression partielle de vapeur d'eau, en Pa

En première approximation, la pression partielle de vapeur d'eau est liée à la pression de vapeur saturante, e_w , et l'humidité relative U_w par la relation suivante :

$$p_v = \frac{U_w}{100} \times e_w$$

Soit :

$$\rho_{ah} = \rho_{as} \times \left(1 - \frac{M_{as} - M_v}{M_{as}} \times \frac{U_w}{100} \times \frac{e_w}{P} \right) \text{ en kg/m}^3$$

A titre indicatif, pour une pression atmosphérique de 100000 Pa, l'écart en % entre la masse volumique de l'air humide et celle de l'air sec est présenté sur le tableau ci-dessous en fonction de l'humidité relative et de la température sèche de l'air :

Tableau 7 - Erreur relative (en %) sur la masse volumique de l'air en fonction de la température et de l'humidité relative de l'air si on néglige l'humidité relative pour une pression de 100000Pa

		Humidité relative		
		10%	50%	90%
Température de l'air	10°C	0,1%	0,2%	0,4%
	20°C	0,1%	0,5%	0,8%
	30°C	0,2%	0,8%	1,5%

2 DÉBIT MASSIQUE / DÉBIT VOLUMIQUE

Le débit massique, Q_m , et le débit volumique, Q_v , sont liés par l'intermédiaire de la masse volumique, ρ , par la relation :

$$Q_m = Q_v \times \rho$$

Dans un réseau, sous réserve qu'il n'y ait pas de fuites, le débit massique est constant. La température et la pression peuvent varier entre deux points distants de ce réseau du fait de la présence éventuelle d'échangeur et d'obstacles générant des pertes de charge. De ce fait, la masse volumique varie dans le réseau ainsi que le débit volumique.

En aéraulique, le débit massique est souvent exprimé en unités volumiques en spécifiant des conditions de référence de pression et température ($P_{réf}$, $T_{réf}$). En effet, ces conditions fixent, pour un gaz donné (l'air généralement), la masse volumique, $\rho^{réf}$, et le débit massique exprimé en unités volumiques est calculé à partir de la relation :

$$Q_{v_{réf}} = \frac{Q_m}{\rho_{réf}}$$

Si un instrument mesure un débit massique et que celui-ci est exprimé en unités volumiques pour des conditions de référence, le débit volumique dans les conditions réelles de pression et température est exprimé à partir de la relation suivante :

$$Q_{v_{réel}} = Q_{v_{réf}} \times \frac{\rho_{réf}}{\rho_{réel}}$$

Si on ne tient pas compte de l'humidité de l'air, cette relation s'écrit également :

$$Q_{v_{réel}} = Q_{v_{réf}} \times \frac{P_{réf}}{P_{réel}} \times \frac{T_{réel}}{T_{réf}}$$

A titre indicatif et d'exemple, si les conditions de pression et température de référence sont de 101325 Pa et 0°C et si les conditions réelles sont comprises entre 95000 Pa et 101000 Pa pour la pression et 10°C et 40°C pour la température, l'erreur sur le débit volumique, si la correction précédente n'est pas effectuée, sera comprise entre 1% et 20%.

3 CALCUL DU DIAMÈTRE HYDRAULIQUE D'UNE CONDUITE, Dh

La notion de diamètre hydraulique est utilisée dans le cas d'une conduite de géométrie complexe. En utilisant ce diamètre particulier, on peut réaliser des calculs similaires à ceux d'une conduite circulaire.

Par définition, le diamètre hydraulique est le diamètre d'une conduite circulaire ayant le même rapport entre la section et le périmètre que la conduite réelle. Soit :

$$D_h = \frac{4 \times S}{P}$$

Où :

- Dh est le diamètre hydraulique de la conduite (en m)
- S est la section de passage de la conduite réelle (en m²)
- P est le périmètre de la conduite réelle (en m)

Le tableau ci-dessous indique pour différentes géométries de conduite, la valeur du diamètre hydraulique :

	Conduit circulaire de diamètre D	Conduit carré de côté a	Conduit rectangulaire de côtés a et b
S	$\frac{\pi \times D^2}{4}$	a^2	$a \times b$
P	$\pi \times D$	$4 \times a$	$2 \times (a + b)$
Dh	D	a	$\frac{2 \times a \times b}{a + b}$

ANNEXE 3

LES MOYENS DE MESURAGE

Les mesures de débit d'air sont réalisées, selon les cas, dans les conduits ou au niveau des équipements terminaux (bouches, diffuseurs, ...).

Les moyens pour réaliser ces mesures sont décrits dans cette annexe.

1 LA MESURE DE PRESSION


Par définition, la pression P représente une force appliquée sur une surface :

$$P = \frac{F}{S}$$

Avec :

- P, la pression (en Pa)
- F, la force appliquée (en N)
- S, la surface sur laquelle s'applique la force (en m²)

L'unité du Système International est le Pascal, noté Pa mais il existe de nombreuses autres unités. Le tableau ci-dessous fournit les correspondances entre certaines d'entre elles :

	Pa	bar	mbar (hPa)	mm H2O	torr (mm Hg)	psi
Pa	1	1,00E-5	1,00E-2	1,02E-1	7,50E-3	1,45E-3
bar	1,00E+5	1	1,00E+3	1,02E+4	7,50E+2	14,5
mbar (hPa)	1,00E+2	1,00E-3	1	1,02E+1	7,50	1,45
mm H2O	9,81	9,81E-4	9,81E-1	1	7,36E-2	1,42E-2
torr (mm Hg)	133,33	1,33E-3	1,33	1,36E+1	1	1,93E-2
psi	6,89E+3	6,89E-2	6,89E+1	7,03E+2	5,17E+1	1

Les instruments de mesure de pression se classent en deux catégories :

- Les systèmes fondamentaux (et leurs systèmes dérivés) pour lesquels la mesure de pression découle directement des lois de la physique et de la mécanique. Parmi ces systèmes, on peut citer le manomètre à dénivellation de liquide et la balance de pression
- Les instruments formés d'un élément sensible, flexible qui se déforme sous l'effet de la pression. Cette déformation peut être amplifiée de manière mécanique (on parle alors de manomètres mécaniques) ou de manière électrique pour les capteurs de pression ou les transmetteurs de pression (pour lesquels la sortie est une grandeur électrique en tension ou en courant). D'une manière générale, ces instruments sont sensibles aux variations de température et aux surpressions

L'exactitude des instruments de mesure de pression est souvent exprimée en valeur relative. Il est alors important de savoir s'il s'agit d'une valeur relative par rapport à la valeur mesurée (souvent notée V.L. pour valeur lue, v.m. pour valeur mesurée ou reading, ...) ou par rapport à la pleine échelle (PE pour pleine échelle, FS pour full scale, EM pour étendue de mesure, ...). En effet, un instrument possédant une exactitude exprimée en % de la valeur mesurée a des performances métrologiques plus intéressantes qu'un instrument dont l'exactitude est exprimée en % de la pleine échelle.

A titre d'exemple, prenons un instrument dont la pleine échelle est 1 bar et l'exactitude annoncée par le constructeur 1%. Le tableau ci-dessous indique pour les deux cas (1% de la pleine échelle et 1% de la valeur lue, la valeur absolue de l'exactitude à la pleine échelle (1 bar) et à 10% de celle-ci (0,1 bar) :

	1% PE	1% V.L.
0,1 bar	0,01 bar	0,001 bar
1 bar	0,01 bar	0,01 bar

Un instrument de mesure de pression, selon sa configuration, peut mesurer directement :

- Une pression absolue. Il s'agit d'une pression mesurée par rapport au vide parfait. Cette grandeur est toujours positive et peut être inférieure ou supérieure à la pression atmosphérique (ou ambiante). Cette dernière est une pression absolue particulière qui peut être mesurée avec un baromètre. La valeur de 101325 Pa associée à la température de 0°C définissent les conditions normales de pression et de température
- Une pression relative (gauge pour les anglo-saxons). Il s'agit d'une pression mesurée par rapport à la pression atmosphérique. Les variations dans le temps et dans l'espace de celle-ci peuvent entraîner des composantes d'incertitude supplémentaires. La pression relative peut être positive ou négative
- Une pression différentielle. Il s'agit de la différence de pression entre deux points de mesure. Elle peut être positive ou négative. La pression relative peut être considérée comme une pression différentielle particulière

2 LA MESURE DE VITESSE

Les mesures de vitesse sont réalisées à l'extérieur au niveau de la bouche ou du diffuseur ou en gaine pour déterminer un débit d'air.

Dans le cas des installations de ventilation et de désenfumage, les méthodes employées sont intrusives puisque le principe de mesure nécessite l'introduction dans l'écoulement d'un instrument constituant un élément perturbateur pour le phénomène mesuré. L'erreur de mesure engendrée dépend en partie de la nature de l'élément perturbateur.

2.1 LES ANÉMOMÈTRES À SONDE DE PRESSION OU TUBES DE PITOT

Les anémomètres à sonde de pression sont couramment employés pour la mesure de vitesse. Parmi ceux-ci, les caractéristiques géométriques de construction des tubes de Pitot (ou tubes de Pitot doubles) sont décrites dans la norme NF X 10-112 [1].

Les conditions d'utilisation de ces instruments sont :

- Un écoulement permanent (i.e. stable et continu dans le temps)
- Une vitesse⁹ inférieure à 80 m.s⁻¹ environ

Il s'agit d'un appareil tubulaire constitué d'une antenne cylindrique percée de deux séries d'orifices. La première positionnée autour de la circonférence de l'antenne permet la mesure de la pression statique dans l'écoulement. La seconde est positionnée à l'extrémité de l'antenne, face à l'écoulement est constituée d'un orifice unique et permet de mesurer la pression totale. La mesure de la différence entre ces deux pressions (réalisée à l'aide d'un capteur de pression différentielle) permet de remonter à l'information sur la vitesse de l'écoulement par la relation :

$$V = \alpha \times \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}$$

Avec :

- V, la vitesse de l'écoulement (en m.s⁻¹)
- α , le coefficient du tube de Pitot (pour les tubes de Pitot décrits dans la norme NF X 10-112, il est pratiquement de 1,0)
- ΔP , la pression différentielle mesurée par le tube de Pitot (en Pa)
- ρ , la masse volumique du fluide (en kg.m⁻³)

⁹ La condition limitante dans la norme NF X 10-112 est liée au nombre de Mach qui doit être inférieur à 0,25. Dans le cas de l'air, cette condition correspond à une vitesse d'environ 80 m.s⁻¹. En réalité, le nombre de Mach peut être supérieur mais, dans ce cas, des facteurs correctifs supplémentaires liés à la compressibilité de l'air doivent être pris en compte.

Dans des conditions normales d'utilisation, il est difficile de mesurer avec un tube de Pitot une vitesse inférieure à 3, voire 5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Cette vitesse correspond, en effet, à une mesure de pression différentielle comprise entre 5 et 15 Pa délicate à réaliser sur site.

Pour des raisons de simplicité (notamment en ce qui concerne la connaissance du coefficient α), il peut être préférable d'utiliser un tube de Pitot tel que décrit dans la norme NF X 10-112. En effet, dans ce cas, le coefficient vaut 1,0¹⁰. Le tube de Pitot peut alors être du type AMCA, NPL ou CETIAT. Les trois types se différencient principalement par la forme du nez comme le montrent les figures ci-dessous :

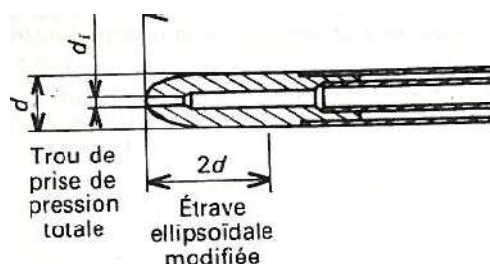


Figure 3 - Tube de Pitot type NPL (NF X 10-112 [1])

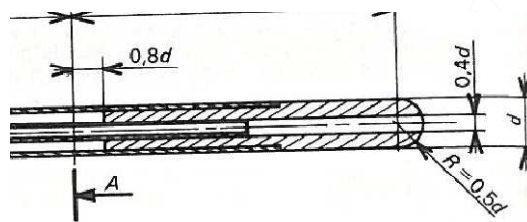


Figure 4 - Tube de Pitot type AMCA (NF X 10-112 [1])

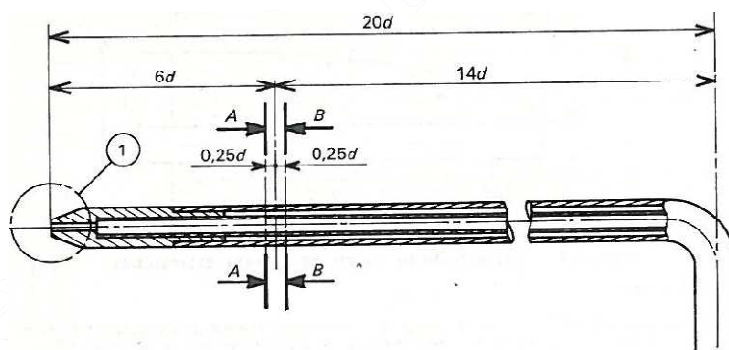


Figure 5 - Tube de Pitot type CETIAT (NF X 10-112 [1])

Lors de l'utilisation du tube de Pitot dans une conduite, l'effet d'obstruction peut engendrer une erreur de mesure. Cette erreur peut être négligée si :

- Le rapport d/D est inférieur ou égal à 0,02 (d étant le diamètre du tube de Pitot et D celui de la conduite)

¹⁰ Un étalonnage permet néanmoins de déterminer plus précisément ce coefficient.

- Le tube de Pitot est introduit successivement aux deux extrémités d'un même diamètre de manière à n'explorer qu'un seul rayon

Si ces conditions ne sont pas respectées, l'erreur de mesure devrait être évaluée. On se reportera à la norme NF X 10-112 pour l'évaluation des corrections à appliquer.

2.2 LES ANÉMOMÈTRES THERMIQUES

Les anémomètres thermiques sont parfois appelés anémomètres à fil chaud.

Le principe de mesure est basé sur la mesure de la puissance électrique nécessaire pour maintenir en température un élément sensible chauffé par effet Joule et positionné dans l'écoulement. En effet, cet élément sensible, dont la température est supérieure à la température de l'écoulement, échange avec ce dernier par conduction, rayonnement et surtout convection. Les échanges seront d'autant plus importants que la vitesse de l'écoulement sera élevée. Il existe donc bien une relation entre la vitesse de l'écoulement (que l'on cherche à mesurer) et l'énergie électrique fournie (que l'on peut mesurer). Cette relation n'est pas simple et dépend des caractéristiques physiques et géométriques de l'élément sensible et des caractéristiques physiques du fluide.

D'autre part, puisque l'instrument est sensible à la masse de fluide en contact, si l'indication est exprimée en unité de vitesse (m.s^{-1}), elle correspond à des conditions de pression et de température spécifiques au constructeur. Pour connaître la vitesse réelle de l'écoulement, il est alors nécessaire de réaliser une correction de la forme :

$$V = V_{\text{lue}} \times \frac{P_{\text{réf}}}{P_{\text{réelle}}} \times \frac{T_{\text{réelle}}}{T_{\text{réf}}}$$

Avec :

- V , la vitesse réelle de l'écoulement (en m.s^{-1})
- V_{lue} , la vitesse lue sur l'afficheur de l'instrument (en m.s^{-1})
- $P_{\text{réelle}}$, $T_{\text{réelle}}$, les conditions réelles de pression (en Pa) et de température (en K) lors de la mesure
- $P_{\text{réf}}$, $T_{\text{réf}}$, les conditions de référence de pression (en Pa) et de température (en K) spécifiques au constructeur de l'instrument. Il convient de se rapprocher du constructeur pour connaître ses conditions de référence.

Certaines des versions les plus récentes des anémomètres thermiques incluent la possibilité d'indiquer la valeur de la pression réelle, la température étant mesurée par l'anémomètre, afin de permettre l'affichage direct de la vitesse réelle.

Les anémomètres thermiques sont bien adaptés pour la mesure de faible vitesse d'air (à partir de quelques cm.s^{-1}) dans une gamme de température comprise entre 10°C et 40°C. Selon la configuration géométrique de l'élément sensible, ils peuvent être unidirectionnels (anémomètre à fil chaud) ou omnidirectionnels (anémomètre à boule chaude). Dans tous les cas, ils ne permettent pas de connaître le sens du flux d'air.



Figure 6 – Anémomètres thermiques à fil chaud (doc. TSI) et à boule chaude (doc. TESTO)

Ils présentent l'inconvénient d'être relativement fragiles et sensibles à la pollution particulaire.

2.3 LES ANÉMOMÈTRES À MOULINET

Les anémomètres à moulinet ou à hélice sont souvent utilisés pour réaliser des mesures de vitesse au niveau de grilles de ventilation ou de désenfumage.

La taille du moulinet peut varier entre 10 mm et 100 mm environ.



Figure 7 - Anémomètres à hélice de différentes tailles (doc. KIMO)

Cet instrument est formé d'une hélice constituée de pales fixées sur un axe de rotation et orientées par rapport à la direction de l'écoulement. L'axe de rotation est placé parallèlement à la direction de l'écoulement et la vitesse d'air tend à faire tourner les pales. La vitesse de rotation de l'hélice est sensiblement proportionnelle à la vitesse de l'écoulement et est détectée sans contact, optiquement ou électriquement. A faible vitesse, les forces de frottement freinent voire bloquent le mouvement de rotation. Les anémomètres à moulinet présentent donc un seuil de démarrage qui peut varier selon la taille de l'hélice et sa qualité de construction. Les valeurs classiques de seuil de démarrage sont généralement de 0,2 (pour les grandes hélices) à $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (pour les plus petites).

De par sa taille, l'anémomètre à moulinet placé dans un écoulement peut déformer fortement les lignes de courant lorsqu'une fraction non négligeable de la section de mesure est obstruée par le moulinet et son support. Très approximativement, l'erreur engendrée par cet effet d'obstruction peut être évaluée à 0,1% par pour cent d'obstruction de la conduite ce qui exclut tout usage dans des conduites de trop faible diamètre (sauf pour des applications très particulières).

3 LA MESURE DIRECTE DE DÉBIT

Dans le domaine de la ventilation, certains instruments permettent de mesurer le débit directement. Il s'agit généralement de méthodes de mesure utilisant un anémomètre ou un principe de mesure découlant de celui des anémomètres.

3.1 LE CÔNE DE MESURE DE DÉBIT

Le cône de mesure de débit est constitué d'un anémomètre thermique ou à moulinet et d'un cône qui peut présenter différentes formes. L'anémomètre est positionné au niveau de la partie la plus étroite du cône et occupe tout ou partie de la section. Il est généralement utilisé pour une mesure directe de débit pour les bouches de petites dimensions.



Figure 8 - Cônes de mesure pour anémomètres à fil chaud et à hélice (Doc. KIMO)

Ces cônes de mesure sont conçus et commercialisés par certains fabricants d'anémomètres. Le débit est lié à la mesure de vitesse par un coefficient propre à chaque modèle. Il peut également dépendre du sens de l'écoulement (bouche d'extraction ou d'insufflation). Certains constructeurs ne recommandent pas leur utilisation pour les bouches d'insufflation.

Le système de mesure entraîne une perte de charge supplémentaire sur le réseau qui peut, si la pression disponible est faible, entraîner une variation du débit et modifier sa répartition dans les différentes branches du réseau aéraulique.

3.2 LE BALOMÈTRE

Pour les dimensions plus importantes de bouches, un balomètre peut être utilisé. Celui-ci est constitué d'une hotte en matériau synthétique souple permettant de canaliser le flux d'air entre le diffuseur et la section de mesure. Un réseau de prises de pression différentielle (principe de mesure du tube de Pitot) ou de fils chauds (principe de mesure de l'anémomètre thermique) occupe la section de mesure et permet une mesure directe de débit.

Les appareils les plus récents utilisent plutôt un réseau de prises de pression différentielle. Une mesure de température et de pression atmosphérique simultanée permet un affichage direct du débit volumique dans les conditions réelles de pression et de température.

Les appareils dont la technologie est basée sur un principe thermique fournissent un débit volumique pour des conditions de référence spécifiques au constructeur. La détermination du débit volumique réelle n'est possible qu'à partir d'une mesure supplémentaire de la pression atmosphérique (la mesure de température est généralement réalisée par l'instrument) à l'aide d'une relation du type :

$$Q_{v_{réel}} = Q_{v_{lu}} \times \frac{\rho_{réf}}{\rho_{réel}} = Q_{v_{lu}} \times \frac{P_{réf}}{P_{réel}} \times \frac{T_{réel}}{T_{réf}}$$

Avec :

- $Q_{v_{réel}}$, le débit volumique dans les conditions réelles de pression et de température ($P_{réel}$, $T_{réel}$),
- $Q_{v_{lu}}$, le débit volumique dans les conditions de référence de pression et de température définies par le constructeur ($P_{réf}$, $T_{réf}$),
- $\rho_{réf}$, la masse volumique de l'air dans les conditions de référence de pression et de température définies par le constructeur,
- $\rho_{réel}$, la masse volumique de l'air dans les conditions réelles de pression et de température

Ces instruments sont souvent utilisés lors de l'équilibrage des réseaux de ventilation mais peuvent également fournir des résultats intéressants pour une mesure de débit directe.

Les hottes peuvent présenter différentes dimensions de manière à s'adapter aux différentes géométries de diffuseurs.



Figure 9 – Exemples de différentes tailles de hotte pour balomètre (Doc. TSI)

ANNEXE 4

DÉFINITION ET CONCEPTION D'UN CADRE DE DÉPORT

Définition du cadre de déport : il s'agit d'un accessoire rigide à confectionner sur mesure en fonction de la taille de la bouche ou du diffuseur à tester et qui permet de déporter la mesure en amont de l'organe de ventilation. Sa longueur doit être au minimum de 300 mm pour les dimensions de bouche les plus courantes. L'étanchéité entre le support (mur, plafond) et le cadre doit être assurée lors de la mesure.

Exemples de réalisation d'un cadre de déport réalisé en laine minérale revêtu de feuille d'aluminium :

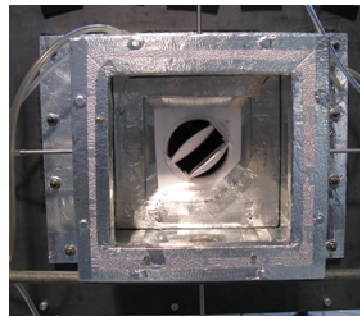
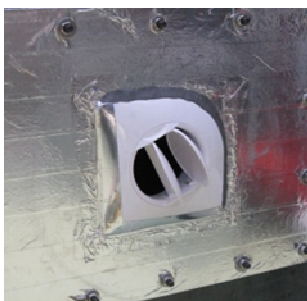


Figure 10 - Bouche d'insufflation montée sur une paroi (seule, à gauche - entourée par un cadre de déport, à droite)

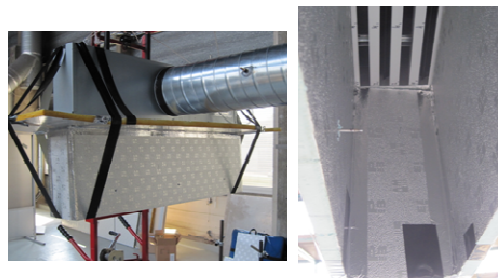


Figure 11 - Diffuseur linéaire monté sur un plafond (seul, à gauche - entouré par un cadre de déport, à droite)

L'utilisation d'un cadre de déport peut répondre à deux problématiques différentes :

- **Au niveau de certaines bouches, particulièrement en insufflation**, le flux d'air peut être particulièrement dévié (exemple Figure 10). Cette configuration peut engendrer une erreur de mesure importante, notamment lorsque la mesure de débit est réalisée avec un cône de mesure équipé d'un anémomètre thermique.

A titre d'exemple, la figure ci-dessous indique l'erreur de mesure obtenue avec un cône de mesure équipé d'un anémomètre thermique lorsqu'il est directement placé sur la bouche ("Cône seul") et lorsqu'un cadre de déport est positionné sur la bouche ("Cône + cadre de déport"). L'erreur de mesure est calculée par rapport à une mesure du débit par un moyen de référence sur un banc dédié.

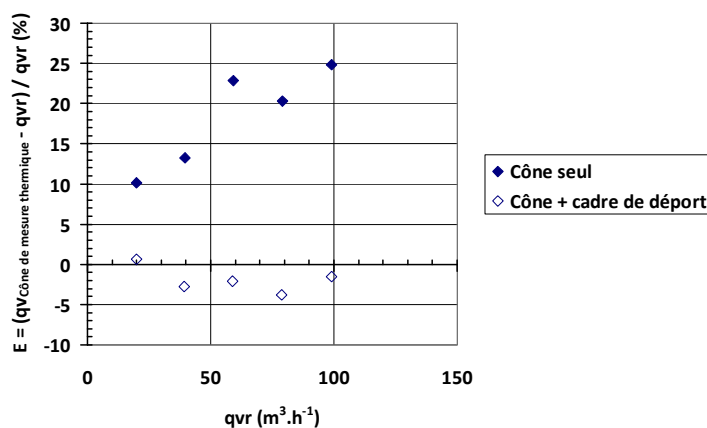


Figure 12 - Comparaison des résultats de mesure de débit avec un cône de mesure équipé d'un anémomètre thermique sur une bouche d'insufflation en présence ou non d'un cadre de déport

- Dans le cas de diffuseurs linéaires**, la mesure de débit est réalisée à partir de mesures de vitesse et de la connaissance de la section équivalente du diffuseur (cf § 3.1). Au niveau du diffuseur, cette méthode conduit à une erreur de mesure importante et qui dépend du nombre de points de mesure de vitesse, de la répartition du champ de vitesse, de la connaissance de la surface équivalente. L'utilisation d'un cadre de déport permet une meilleure connaissance de la surface de la section de mesure. D'autre part, si le flux d'air est fortement dévié, le déport de la mesure permet une meilleure homogénéité dans le plan de mesure.

A titre d'exemple, la figure ci-dessous indique l'erreur de mesure obtenue lorsque les mesures de vitesse sont réalisées à la sortie du diffuseur ("Mesure sortie diffuseur") et lorsqu'elles sont réalisées en amont après un cadre de déport ("Mesure déportée"). L'erreur de mesure est calculée par rapport à une mesure du débit par un moyen de référence sur un banc dédié.

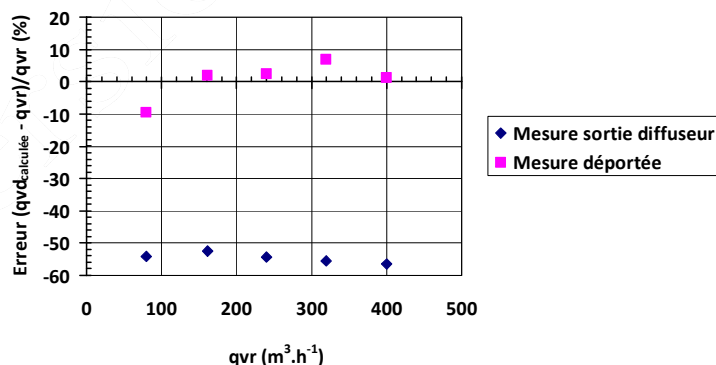


Figure 13 – Comparaison du débit calculé à partir de mesures de vitesse et de la connaissance de la section du plan de mesure en présence ou non d'un cadre de déport

L'utilisation d'un cadre de déport n'est pas appropriée si son installation perturbe le flux d'air engendré par le diffuseur (cas des jets collant au plafond, par exemple).

BIBLIOGRAPHIE

1 NF X 10-112, Mesure de débit des fluides dans les conduites fermées – Méthode d'exploration du champ des vitesses pour des écoulements réguliers au moyen de tubes de Pitot doubles, Septembre 1977

2 NF EN 12599, Ventilation des bâtiments. Procédures d'essai et méthodes de mesure pour la réception des installations de ventilation et de climatisation installées, Juillet 2000

3 Pr NF EN 16211, Ventilation for buildings - Measurement of air flows on site –methods, en attente de publication

L'acquisition des textes intégraux des normes citées peut se faire en ligne auprès de l'AFNOR, à l'adresse suivante : <http://www.boutique.afnor.org>

4 Mesures locales de vitesse dans un fluide, F. DUPRIEZ et J.-P. FLODROPS, Techniques de l'Ingénieur, R2 110-1 à 28



CETIAT

Domaine scientifique de la Doua
25, avenue des Arts
BP 52042
69603 Villeurbanne Cedex

Téléphone : +33 4 72 44 49 00

Télécopie : +33 4 72 44 49 90

www.cetiat.fr

Pour toutes informations, contactez :
commercial@cetiat.fr