



Mesures de débit d'air

Guide des bonnes pratiques sur site
pour les installations de ventilation

Mars 2024

Préambule

Depuis la mise en application de la réglementation thermique 2012, la consommation d'énergie des constructions neuves devient 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 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.

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

Cette nouvelle édition de "Mesures de débit d'air : guide des bonnes pratiques sur site pour les installations de ventilation" est une révision du guide précédemment publié en 2013 grâce au soutien de la DGCIS¹, ALDES et CIAT.

Son objectif est de sensibiliser les entreprises du génie climatique, et plus particulièrement les artisans installateurs et organismes de contrôle, aux bonnes pratiques d'utilisation du matériel de mesure de débit d'air et de les guider dans les choix des instruments de mesures adaptés.

¹ DGCIS : Direction Générale de la Compétitivité, de l'Industrie et des Services

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 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 et de désenfumage mécanique.

Sommaire

SÉLECTION D'UNE MÉTHODE DE MESURE ADAPTÉE	2
1. LA MESURE DE DÉBIT EN CONDUIT RIGIDE	4
1.1. Cas d'un conduit circulaire	5
1.2. Cas d'un conduit rectangulaire de facteur de forme inférieur à 4	5
2. LA MESURE DE DÉBIT AU NIVEAU D'UNE BOUCHE	6
2.1. Utilisation d'un cône de mesure équipé d'un moulinet	7
2.2. Utilisation d'un cône de mesure équipé d'un anémomètre thermique	8
2.3. Mesure de pression	9
2.4. Synthèse	10
3. LA MESURE DE DÉBIT AU NIVEAU D'UN DIFFUSEUR	12
3.1. Mesure de vitesse	13
3.2. Utilisation d'un balomètre	14
3.3. Mesure de pression	15
3.4. Synthèse	16
4. LA MESURE DE DÉBIT DANS LE CAS DU DÉSENFUMAGE MÉCANIQUE	18
ANNEXES	20
ANNEXE 1 - LES MÉTHODES DE MESURE DE DÉBIT PAR EXPLORATION DU CHAMP DES VITESSES	20
A1 1. MÉTHODE DE RÉFÉRENCE : NF ISO 3966	21
A1 2. RÉCEPTION DES INSTALLATIONS DE VENTILATION : NF EN 12599	23
A1 3. VENTILATION DANS LES BATIMENTS : MESURES DE DÉBIT D'AIR SUR SITE - MÉTHODES : PR NF EN 16211	24
A1 4. MÉTHODES NON NORMALISÉES	25
ANNEXE 2 - QUELQUES RAPPELS AÉRAULIQUES	26
A2 1. MASSE VOLUMIQUE DE L'AIR	26
A2 2. DÉBIT MASSIQUE / DÉBIT VOLUMIQUE	27
A2 3. CALCUL DU DIAMÈTRE HYDRAULIQUE D'UNE CONDUITE, DH	27
ANNEXE 3 - LES MOYENS DE MESURAGE	28
A3 1. LA MESURE DE PRESSION	28
A3 2. LA MESURE DE VITESSE	29
A3 3. LA MESURE DIRECTE DE DÉBIT	32
ANNEXE 4 - DÉFINITION ET CONCEPTION D'UN CADRE DE DÉPORT	34
BIBLIOGRAPHIE	36

Remerciements

Nous remercions Aldes, Allie'air, Atlantic, Sauermann et Testo de nous avoir aimablement fournis les photos pour l'illustration de ce guide.

SÉLECTION D'UNE MÉTHODE DE MESURE

Réseau de
désenfumage
mécanique

Réseau de
ventilation

Conduit rigide rectangulaire page 5

Mesure de pression
au diffuseur
page 15

Balomètre
page 14

Mesure de vitesse
page 13

Conduit rigide circulaire page 5

Mesure de pression
à la bouche
page 9

Cône de mesure
thermique
page 8

Cône de mesure
à moulinet
page 7

Grille de désenfumage et
anémomètre à moulinet
page 18

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 effectuer 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 du champ de vitesses nécessite de mesurer les vitesses suffisamment loin de toute singularité, en un nombre de points de mesure de vitesse suffisant, répartis selon un schéma d'exploration précis et ce, afin d'obtenir un niveau d'exactitude suffisant.

Plusieurs normes (NF ISO 3966, NF EN 12599, NF EN 16211) 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 souvent employées sans que l'exactitude atteinte ne soit documentée. 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 (i.e. correspondant à 1 direction d'exploration au lieu de 2).

Pour les conduits circulaires et les conduits rectangulaires, 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 très courantes dans un circuit aéraulique et sont considérées comme très perturbantes pour l'écoulement : coude simple, deux coudes coplanaires séparés ou non d'une longueur droite, jonction en Té, registre ouvert et fermé.

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, StarCCM+. Les simulations ont été réalisées pour un conduit cylindrique



de diamètre 315 mm et un débit de 1500 m³/h et un conduit rectangulaire de dimensions 300 mm x 600 mm et un débit de 3500 m³/h.

Les tableaux ci-après présentent, en fonction de la géométrie du conduit (circulaire, rectangulaire) et du schéma d'exploration de points de mesure 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).

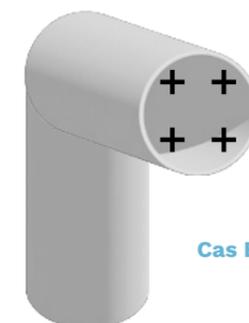
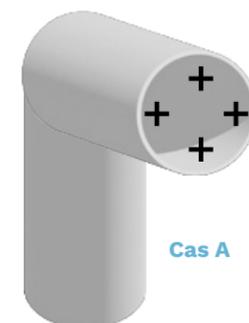
On considère ici que le dispositif de mesure de vitesse est adapté au besoin, suivi métrologiquement et que son incertitude de mesure est de 5% de la vitesse mesurée au maximum.

Afin de ne pas dégrader la qualité de la mesure et ne pas l'entacher de composantes d'incertitude supplémentaires, 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 exactement les points de mesure de vitesse ;
- ne pas oublier de reboucher les trous dans la conduite après la réalisation des mesures afin de ne pas créer des fuites dans le circuit de ventilation.

1.1. CAS D'UN CONDUIT CIRCULAIRE

Schéma d'exploration des points	Nombre de diamètres explorés	Incertitude de mesure attendue (%)							
		L/D : Distance aux singularités amont							
		1,6		2,5		5		10	
		Cas A	Cas B	Cas A	Cas B	Cas A	Cas B	Cas A	Cas B
NF ISO 3966	2	12%	5%	8%	6%	5%	5%	5%	5%
	1	24%	22%	17%	18%	10%	13%	7%	9%
NF EN 12599 1 anneau	2	9%	15%	10%	10%	8%	8%	7%	7%
	1	23%	25%	20%	22%	16%	19%	12%	16%
NF EN 12599 2 anneaux	2	10%	10%	8%	8%	6%	7%	6%	6%
	1	23%	24%	17%	22%	14%	17%	23%	12%
NF EN 12599 3 anneaux	2	11%	9%	7%	7%	6%	6%	6%	6%
	1	23%	24%	16%	20%	12%	15%	8%	11%
NF EN 12599 5 anneaux	2	12%	7%	8%	6%	6%	5%	5%	5%
	1	24%	22%	22%	18%	22%	14%	22%	11%
NF EN 12599 8 anneaux	2	12%	7%	8%	6%	5%	5%	5%	5%
	1	24%	21%	17%	18%	10%	13%	7%	10%
NF EN 16211	2	10%	8%	6%	7%	6%	7%	6%	6%
	1	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%



1.2. CAS D'UN CONDUIT RECTANGULAIRE

Schéma d'exploration des points	Incertitude de mesure attendue (%)			
	L/D : Distance aux singularités amont			
	1,6	2,5	5	10
NF ISO 3966	6%	6%	5%	5%
NF EN 12599 2x2 points	9%	7%	9%	12%
NF EN 12599 3x2 points	7%	7%	9%	7%
NF EN 12599 4x2 points	6%	7%	9%	8%
NF EN 12599 6x5 points	7%	7%	7%	6%
NF EN 16211	19%	14%	9%	10%

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

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

2. LA MESURE DE DÉBIT AU NIVEAU D'UNE BOUCHE

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

Elle est de petite taille (au maximum de l'ordre de 200 mm x 200 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 :

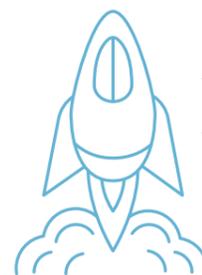
- Bouches fixes et variables
- Mesure en extraction et en insufflation si l'instrument présente un dispositif pour déporter la mesure
- Toute directivité de flux d'air
- Débit d'air supérieur à 50 m³/h

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 ou utiliser un instrument présentant un dispositif redresseur/prolongateur spécifique pour l'utilisation pour les bouches aux flux d'air très perturbés
- Si la pression disponible sur le réseau est faible, prendre en compte la variation de débit induite

À éviter dans le cas de :

- Débit inférieur à 50 m³/h



Pour aller plus loin et améliorer la méthode de mesure¹ :

- 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

¹ 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, induire 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 :

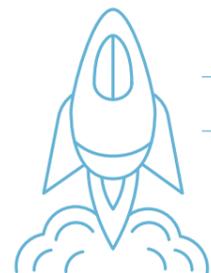
- Bouches fixes et variables
- Mesure en extraction
- Flux d'air peu dévié lors de la traversée de la bouche
- Quel que soit le débit d'air (dans le respect de l'étendue de mesure de l'anémomètre)

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
- Positionner correctement l'anémomètre au centre de l'étranglement du cône, conformément aux recommandations du constructeur et vérifier son orientation dans le flux d'air.

À 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 mesure¹ :

- 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

¹ 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 (m³/h), peut être évalué à partir d'une mesure de pression différentielle au niveau de celle-ci, ΔP (Pa). À partir du coefficient caractéristique de la bouche, dénommé K_{bouche} et fourni par le fabricant, et de la masse volumique de l'air, ρ (kg/m³), 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 ou hygroréglables, 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. Dans ce cas, se référer à la norme NF E51-777.



Solliciter le fabricant 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 :

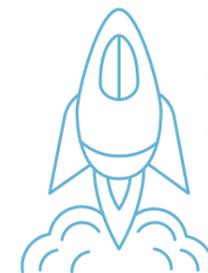
- Bouches fixes
- Pression différentielle supérieure à 10 Pa

Précautions à prendre :

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

À éviter dans le cas de :

- Bouches à débit variable



Pour aller plus loin et améliorer la méthode de mesure¹ :

- 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

¹ 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%

 Incertitude de mesure attendue si toutes les conditions favorables sont réunies

 Incertitude de mesure minimale si toutes les conditions favorables ne sont pas réunies

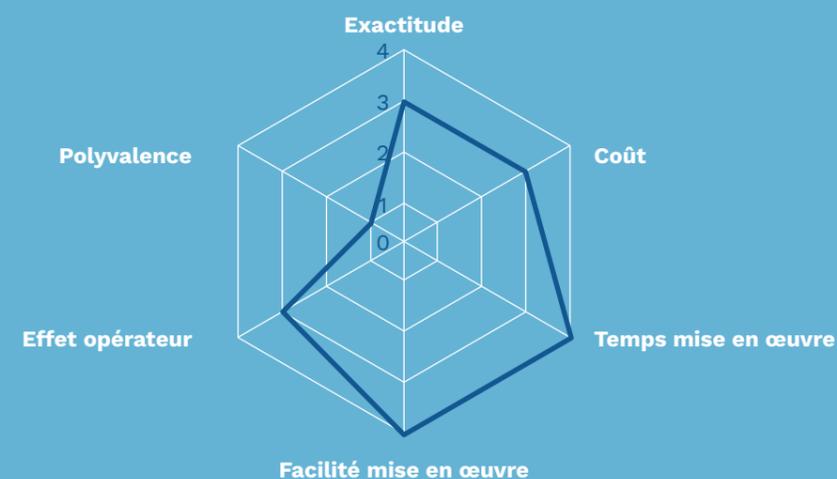
2.4.2. Comparaison des performances

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 :

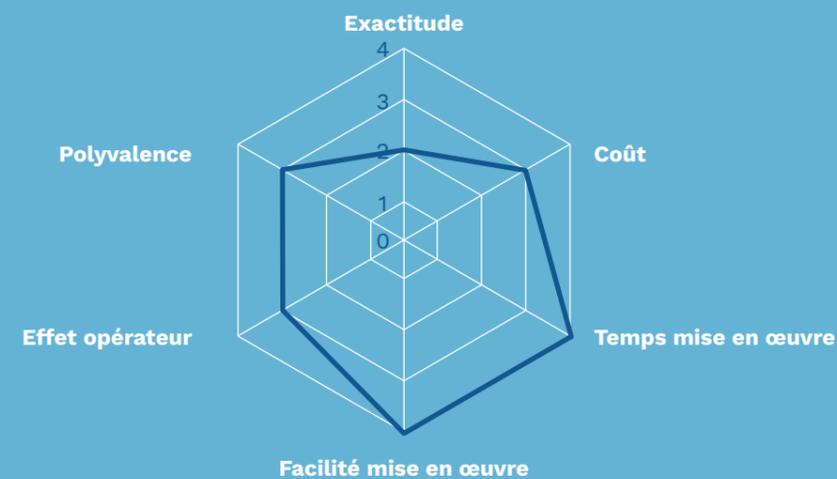
Les caractéristiques comparées et les critères de jugement sont les suivants :

Exactitude	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)
Coût	Prix de l'instrumentation (0 : très cher, > 1000€ – 4 : peu cher, < 500€)
Temps de mise en œuvre	Temps nécessaire pour la mise en œuvre de l'instrument (0 : long – 4 : court)
Facilité de mise en œuvre	Facilité avec laquelle une mesure de débit est obtenue (0 : difficile – 4 : très facile)
Effet opérateur	Influence de la mise en œuvre par l'opérateur (0 : influence forte – 4 : pas d'influence)
Polyvalence	Capacité de la méthode à être utilisée pour des applications variées (0 : peu polyvalente – 4 : très polyvalente)

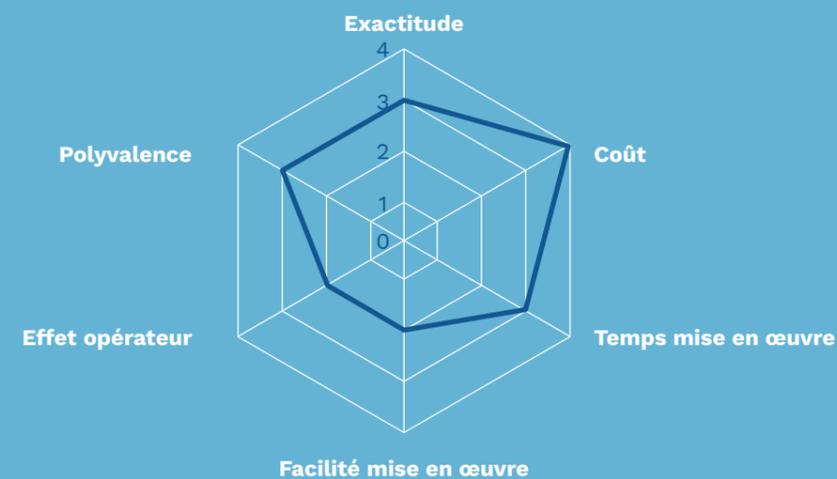
Cône de mesure + moulinet



Cône de mesure + anémomètre thermique



Mesure de pression



3. LA MESURE DE DÉBIT AU NIVEAU D'UN DIFFUSEUR

Un diffuseur est défini comme 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 variable. Il est majoritairement métallique.

Le débit d'air peut être compris entre 100 et 1000 m³/h. L'écoulement d'air, à proximité du diffuseur, 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), 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), la vitesse mesurée à la position i . En utilisant ensuite la section équivalente du diffuseur, A_k (en m²), fournie par le constructeur, on détermine le débit volumique, Q_v (en m³/h), 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



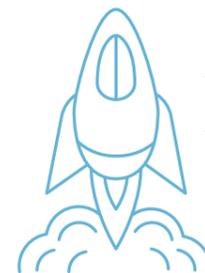
Précautions à prendre :

- 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



À éviter dans le cas de :

- Diffuseurs réglables
- Diffuseurs par déplacement



Pour aller plus loin et améliorer la méthode de mesure¹ :

- 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

¹ 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. Certains instruments présentent un ventilateur qui permet de compenser cette perte de charge.

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. Si le flux d'air présente un écoulement giratoire en insufflation, l'instrument doit présenter un système permettant de redresser le flux d'air avant l'élément de mesure (de manière passive ou dynamique -ventilateur de compensation)
- Débit d'air supérieur à 100 m³/h

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

À éviter dans le cas de :

- Diffuseur à jet hélicoïdal si l'instrument ne possède pas un système pour redresser l'écoulement
- Diffuseur à déplacement
- Débit d'air inférieur à 100 m³/h

Pour aller plus loin et améliorer la méthode de mesure¹ :

- 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

¹ 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 (m³/h), 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. À partir du coefficient caractéristique de la bouche, dénommé $K_{\text{diffuseur}}$ et fourni par le fabricant, et de la masse volumique de l'air, ρ (kg/m³), il est possible de déterminer le débit volumique Q_v par une relation du type :

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

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

 Solliciter le fabricant 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)

À 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 mesure¹ :

- 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

¹ 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.

METHODE DE MESURE	INCERTITUDE DE MESURE ATTENDUE	
	 < 20%	 > 30%
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

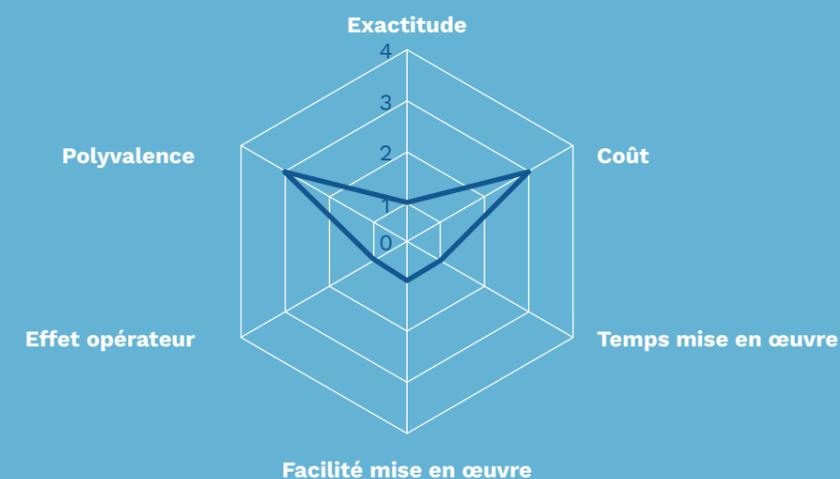
3.4.2. COMPARAISON DES PERFORMANCES

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 :

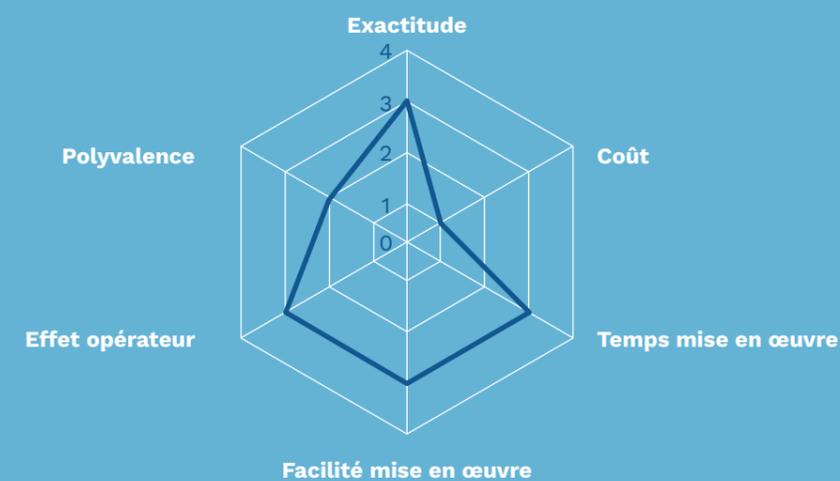
Les caractéristiques comparées et les critères de jugement sont les suivants :

Exactitude	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)
Coût	Prix de l'instrumentation (0 : très cher, > 1000€ – 4 : peu cher, < 500€)
Temps mise en œuvre	Temps nécessaire pour la mise en œuvre de l'instrument (0 : long – 4 : court)
Facilité mise en œuvre	Facilité avec laquelle une mesure de débit est obtenue (0 : difficile – 4 : très facile)
Effet opérateur	Influence de la mise en œuvre par l'opérateur (0 : influence forte – 4 : pas d'influence)
Polyvalence	Capacité de la méthode à être utilisée pour des applications variées (0 : peu polyvalente – 4 : très polyvalente)

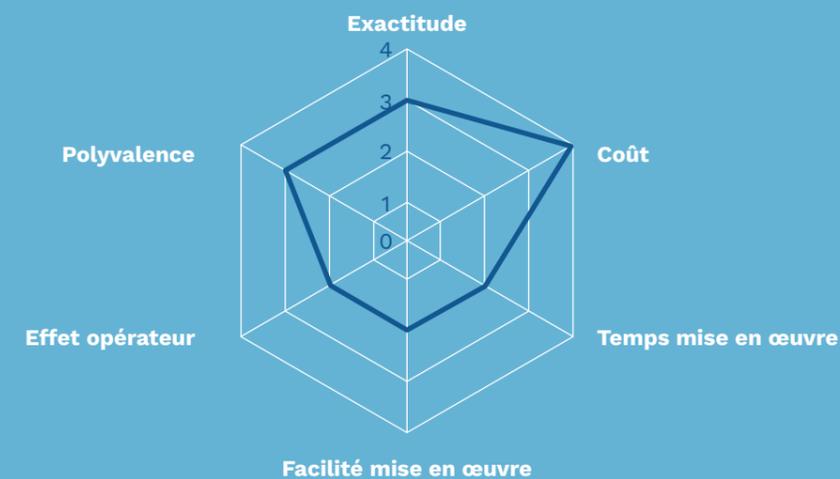
Mesure de vitesse



Balomètre



Mesure de pression

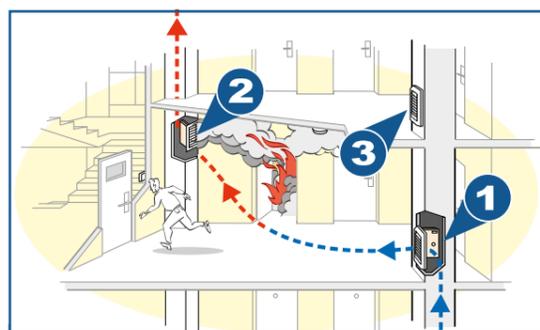


4. LA MESURE DE DÉBIT

DANS LE CAS DU DÉSENFUMAGE MÉCANIQUE

Le désenfumage a pour objet d'extraire des locaux et des circulations d'un bâtiment en situation d'incendie une partie des fumées et gaz de combustion afin de :

- rendre praticables les cheminements utilisés pour l'évacuation du public et l'intervention des secours
- limiter la propagation de l'incendie en évacuant vers l'extérieur chaleur, gaz et imbrûlés



- 1 - volet d'amenée d'air en position ouverte
- 2 - volet d'extraction d'air en position ouverte
- 3 - volet d'amenée d'air en position fermée

Le désenfumage peut se réaliser naturellement ou mécaniquement. L'instruction technique du 22 mars 2004, parue au journal officiel le 1^{er} avril 2004, décrit les dispositions relatives au désenfumage dans les établissements recevant du public [5]. Les éléments contenus dans ce guide ne concernent que le désenfumage par tirage mécanique.

Le désenfumage par tirage mécanique est assuré par des extractions mécaniques de fumée et des amenées d'air naturelles ou mécaniques disposées de manière à assurer un balayage du volume à désenfumer.

L'extraction des fumées est réalisée par des volets de désenfumage raccordés, au moyen d'un conduit, à un ventilateur d'extraction.

Les amenées d'air peuvent être :

- mécaniques. Dans ce cas, des volets sont raccordés, au moyen d'un conduit, à un ventilateur de soufflage
- naturelles, par des ouvrants en façade, des portes sur des espaces mis en surpression ou pouvant être largement aérés, des escaliers ou des bouches raccordées ou non à des conduits

Les caractéristiques des différents conduits sont décrites dans l'Instruction Technique n°246. Leur analyse ne fait pas l'objet du présent guide.

D'autre part, la vitesse de soufflage de l'air aux bouches d'amenée d'air doit toujours être inférieure à 5 m/s et les bouches d'amenée d'air mécanique doivent avoir un débit de l'ordre de 0,6 fois le débit extrait. En outre, les amenées d'air naturelles doivent être dimensionnées pour la totalité du débit extrait.

Les mesures de débit au niveau des bouches d'amenée et d'extraction d'air sont généralement réalisées à l'aide d'anémomètres de type moulinet (cf. Annexe 2.3). La méthode consiste à mesurer une vitesse moyenne sur la surface de la grille de désenfumage et à multiplier celle-ci par la section de passage libre pour l'ouvrant considéré, fournie par le constructeur dans son catalogue et indiquée sur une étiquette accolée au matériel.

La vitesse, V , est généralement mesurée en m/s et la section de passage libre, S , est exprimée en dm^2 . Le débit d'air, Q_v , est alors exprimé par la relation suivante :

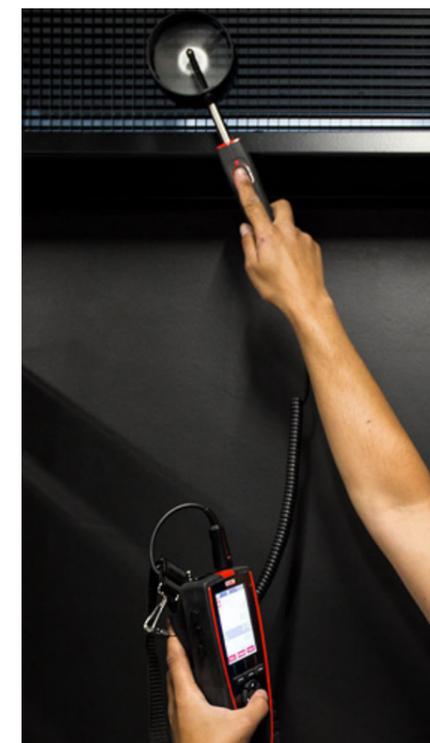
$$Q_v = V \times S \times 3600 \times 0,01 \text{ en m}^3/\text{h} \quad \text{ou} \quad Q_v = V \times S \times 0,01 \text{ en m}^3/\text{s}$$

La méthodologie mise en place pour la mesure de vitesse moyenne n'est pas normalisée et différentes pratiques se rencontrent (mesure en un point, en plusieurs points, balayage de l'anémomètre sur tout ou partie de la surface de l'ouvrant, ...). Certaines d'entre elles permettent une estimation acceptable de la vitesse moyenne et par suite du débit d'air, d'autres entraînent une estimation très erronée de cette vitesse moyenne.

La méthode présentée dans ce guide permet de mesurer le débit d'air avec une incertitude de mesure de l'ordre de 10% à partir d'un instrument de mesure étalonné et dont l'erreur de mesure est prise en compte. La procédure est la suivante :

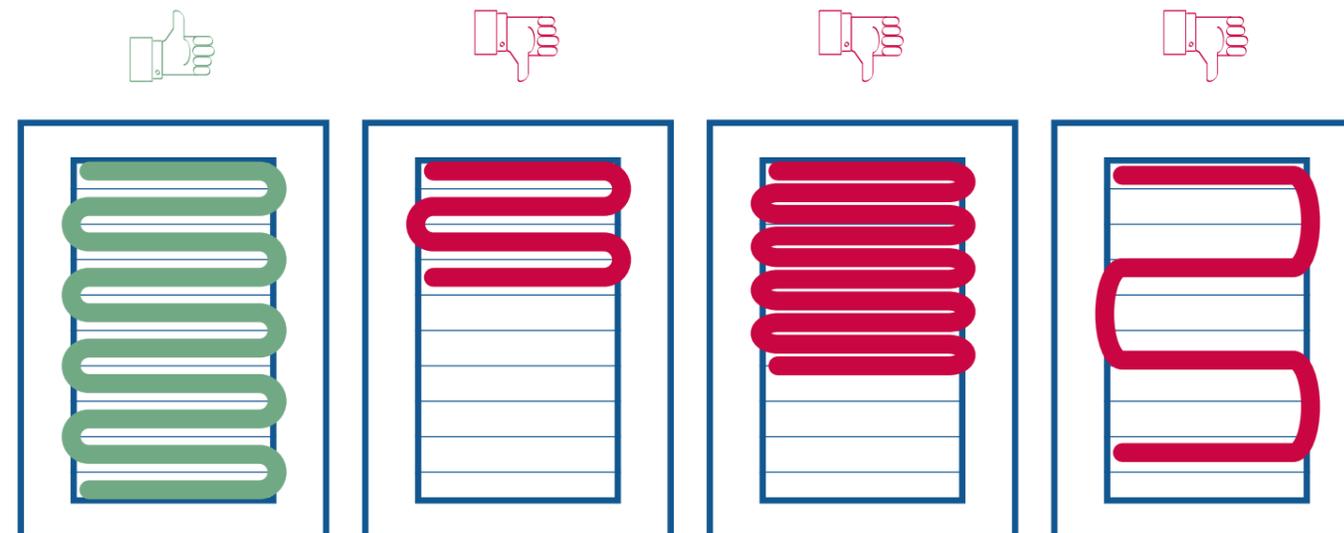
1. Utiliser un anémomètre de type moulinet étalonné, de préférence équipé d'une fonction moyennage
2. Se positionner à 2 cm de l'ouvrant en mode reprise (extraction d'air) et 5 cm en mode soufflage (amenée d'air)
3. Effectuer un balayage complet de l'ouvrant par lacets en évitant le recouvrement des zones et les espaces non couverts à une vitesse d'environ 10s par lacet en sélectionnant la durée de moyennage adaptée sur l'anémomètre. Soit :
 - pour un ouvrant de 700x700, la durée de balayage est de 90 s environ
 - pour un ouvrant de 700x400, la durée de balayage est de 60 s environ
4. Pour les bouches d'extraction d'air, cette technique permet d'estimer la vitesse moyenne avec une incertitude de mesure de l'ordre de 10%
5. Pour les bouches d'amenée d'air, cette technique génère une erreur systématique reproductible de l'ordre de 20% par excès. Après correction de la vitesse moyenne mesurée de cette erreur systématique, l'incertitude de mesure est également d'environ 10%
6. Dans une étape finale vérifier enfin que la somme des débits extraits est égale à la somme des débits amenés. Un écart entre ces deux valeurs peut être dû à un défaut dans la méthodologie de mesure de vitesse ou à un défaut dans l'étanchéité du réseau de ventilation.

$$V_{\text{corrigée}} = V_{\text{mesurée}} - 0,2 \times V_{\text{mesurée}} \text{ en m/s}$$



Dans tous les cas, il faut éviter les méthodes de mesure de vitesse ponctuelles en un ou plusieurs points qui peuvent entraîner des erreurs de mesure de plusieurs dizaines de % à cause de la forte hétérogénéité du champ de vitesse au niveau de l'ouvrant

Les schémas ci-dessous présentent graphiquement le parcours de l'anémomètre au-dessus du volet dans le cas d'une mise en pratique de la méthode proposée et dans le cas de mauvaises mises en œuvre de cette méthode:



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)
- N, le nombre de surfaces élémentaires
- V_i , la vitesse mesurée dans la surface élémentaire i , (en m/s)

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 m³/h)
- S, la section de passage du conduit (en m²)

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.

A1 1. MÉTHODE DE RÉFÉRENCE : NF ISO 3966

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 est inférieure à 3%, si les conditions de mise en pratique définies dans la norme sont respectées.

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 supposé 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 la norme, dans des tableaux pour les conduits de forme circulaire et rectangulaire :

- Pour un conduit circulaire, les mesures doivent être réalisées sur 2 diamètres minimum et 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

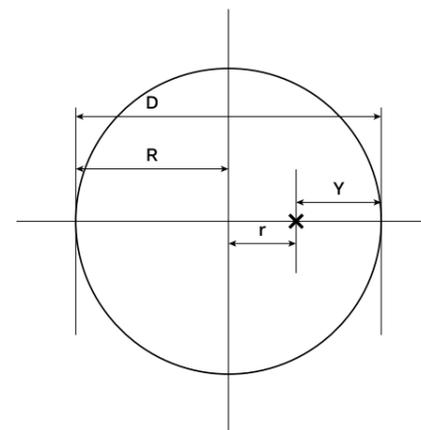


Tableau 1
Répartition selon un schéma "Log-Tchebycheff" des points de mesure de vitesse dans le cas d'une conduite circulaire (NF ISO 3966, [1])

Nombre de points de mesure par rayon	y/D
3	0,3123
	0,1374
	0,0321
4	0,3343
	0,1938
	0,1000
5	0,0238
	0,3567
	0,2150
5	0,1554
	0,0764
5	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
Position des points de mesure dans une conduite de section rectangulaire dans le cas de la méthode "log-Tchebycheff" (NF ISO 3966)

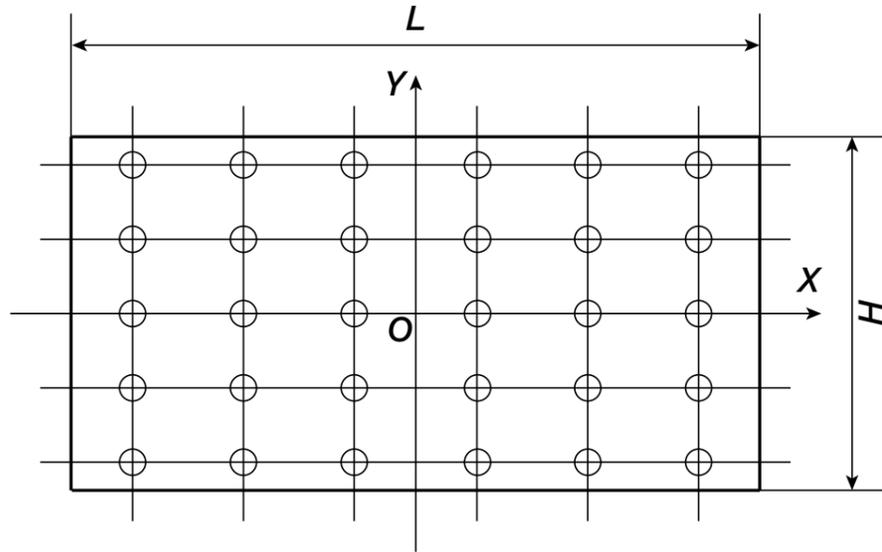


Tableau 2
Répartition selon un schéma "Log-Tchebycheff" des points de mesure de vitesse dans le cas d'une conduite rectangulaire (NF ISO 3966)

Nombre de points de mesure	Valeurs de X/L ou Y/H		
5	0	$\pm 0,212$	$\pm 0,426$
6	$\pm 0,063$	$\pm 0,265$	$\pm 0,439$
7	0	$\pm 0,134$	$\pm 0,297$

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) ;
- 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).

A1 2. RÉCEPTION DES INSTALLATIONS DE VENTILATION : NF EN 12599

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 ;
- 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. Le tableau 3 est issu de la norme NF EN 12599 et définit 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/Dh à partir d'une perturbation et en fonction de l'incertitude maximale recherchée (NF EN 12599)

Distance relative a/D _n	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

1 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.

A1 3. VENTILATION DANS LES BATIMENTS : MESURES DE DÉBIT D'AIR SUR SITE - MÉTHODES : NF EN 16211

Cette norme décrit des méthodes de mesure de débit d'air sur site simplifiées ainsi que les incertitudes associées.

La méthode par exploration de champ de vitesse décrite est une méthode alternative aux méthodes décrites dans les normes NF ISO 3966 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 ISO 3966 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 (NF EN 16211)

Diamètre nominal D (mm)	Position des points de mesure	a mm	b mm	c mm	d mm	Figure
100		29	71			
125	a = 0,29 x D b = 0,71 x D	36	89			
160		46	114			
200		20	100	180		
250	a = 0,10 x D b = 0,50 x D c = 0,90 x D	25	125	225		
315		32	158	283		
400		40	200	360		
500		22	145	355	478	
630		27	185	445	603	
800	a = 0,043 x D b = 0,290 x D c = 0,710 x D d = 0,957 x D	34	230	570	766	
1000		43	290	710	957	
1250		54	360	890	1196	

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

$150 < L_2 \leq 300$ mm		$300 < L_2 \leq 2000$ mm		
a=0,08*L ₂	b=0,43*L ₂	a=0,06*L ₂	b=0,235*L ₂	d=0,43*L ₂
c=0,57*L ₂	d=0,92*L ₂	d=0,57*L ₂	e=0,765*L ₂	f=0,94*L ₂

Tableau 6
Points de mesure pour une section rectangulaire selon la hauteur L_1 (NF EN 16211)

$100 < L_1 \leq 400$	$400 < L_1 \leq 800$	$800 < L_1 \leq 2000$
$100 < L_1 \leq 400$	$400 < L_1 \leq 800$	$800 < L_1 \leq 2000$

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)

A1 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 souvent réalisées.

Pour les conduites rectangulaires, une traversée comprenant 5 à 7 points (selon les dimensions) est réalisée au centre de la hauteur.

QUELQUES RAPPELS AÉRAULIQUES

A2 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/m³). L'air est constitué d'air sec et de vapeur d'eau.

A2 1.1. Masse volumique de l'air sec, ρ_{as}

Si on considère que l'air sec suit la loi des gaz parfaits¹, 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[K] = t[°C] + 273,15
- M_{as}, la masse molaire de l'air sec, en g/mol
- Où M_{as} = 28,959 g/mol pour l'air sec
- R, la constante des gaz parfaits, en J/mol/K
- Où R = 8,314462618... J/mol/K

A2 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 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 :

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

À titre indicatif, pour une pression atmosphérique de 100 000 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 100 000 Pa

		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%

¹ 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%.

A2 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 avec la pression et la température 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 (Préf, Tréf). 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 :

$$Q_{v,réal} = Q_{v,réf} \times \frac{\rho_{réf}}{\rho_{réel}}$$

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

$$Q_{v,réal} = Q_{v,réf} \times \frac{\rho_{réf}}{\rho_{réel}} \times \frac{T_{réel}}{T_{réf}}$$

À titre indicatif et d'exemple, si les conditions de pression et température de référence sont de 101 325 Pa et 0°C et si les conditions réelles sont comprises entre 95 000 Pa et 101 000 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, serait comprise entre 1% et 20%.

A2 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 × b
P	π × D	4 × a	2 × (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. Dans tous les cas, on considère que les instruments de mesure sont étalonnés. Une correction sur la lecture de l'appareil est réalisée afin de tenir compte de l'erreur observée lors de l'étalonnage et pouvoir atteindre les niveaux d'exactitude mentionnés dans ce guide.

A3 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	0,00001	0,01	0,102	0,0075	0,00145
bar	100000	1	1000	10200	750	14,5
mbar (hPa)	100	0,001	1	10,2	7,50	1,45
mm H2O	9,81	0,000981	0,981	1	0,0736	0,0142
torr (mm Hg)	133,33	0,00133	1,33	13,6	1	0,0193
psi	6895	0,06895	68,95	703	51,7	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 (modification de l'élasticité de l'élément sensible) et aux surpressions (élasticité limitée de l'élément sensible).

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 (parfois 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.

À 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.

A3 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.

A3 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 ISO 3966.

Les conditions d'utilisation de ces instruments sont :

- Un écoulement permanent (i.e. stable et continu dans le temps)
- Une vitesse¹ inférieure à 80 m/s environ

¹ La condition limitante dans la norme NF ISO 3966 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. 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.

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 :

$$V = \alpha \times \sqrt{\frac{2 \times \Delta P}{\rho}}$$

Avec :

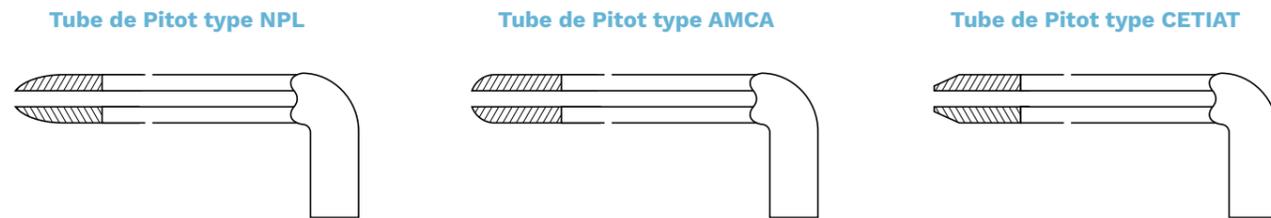
- V, la vitesse de l'écoulement (en m/s)
- ΔP , la pression différentielle mesurée par le tube de Pitot (en Pa)
- α , le coefficient du tube de Pitot
- ρ , la masse volumique du fluide (en kg/m³)

Dans des conditions normales d'utilisation, il est difficile de mesurer avec un tube de Pitot une vitesse inférieure à 3, voire 5 m/s. Cette vitesse correspond, en effet, à une pression différentielle comprise entre 5 et 15 Pa délicate à mesurer 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 ISO 3966. En effet, dans ce cas, le coefficient vaut 1,0².

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
Les différents types de tubes de Pitot selon NF ISO 3966



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)
- 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 ISO 3966 pour l'évaluation des corrections à appliquer.

A3 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), 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)
- V_{lue}, la vitesse lue sur l'afficheur de l'instrument (en m/s)
- P_{réelle}, T_{réelle}, les conditions réelles de pression (en Pa) et de température (en K) lors de la mesure
- P_{réf}, T_{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 versions les plus récentes des anémomètres thermiques incluent la possibilité d'indiquer la valeur de la pression réelle et de la température, afin de permettre l'affichage direct de la vitesse réelle. Certaines autres versions plus récentes incluent un capteur de pression et température permettant la mesure directe de la vitesse réelle. Il convient de vérifier dans le manuel de l'instrument utilisé ses possibilités de mesure.

Les anémomètres thermiques sont bien adaptés pour la mesure de faible vitesse d'air (à partir de quelques cm/s) 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. Ils présentent l'inconvénient d'être relativement fragiles et sensibles à la pollution particulaire.

Figure 4
Anémomètre thermique



A3 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.

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. À faible vitesse, les forces de frottement freinent, voire empêchent, 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 m/s (pour les plus petites).

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 % d'obstruction de la conduite ce qui exclut tout usage dans des conduites de trop faible diamètre (sauf pour des applications très particulières).

Figure 5
Anémomètres à hélice de différentes tailles



² Un étalonnage permet néanmoins de déterminer plus précisément ce coefficient et reste nécessaire pour assurer la traçabilité de la mesure.

A3 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.

A3 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 6
Cônes de mesure pour anémomètres à fil chaud et à hélice

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. Certains modèles sont équipés d'un prolongateur permettant de déporter la mesure par rapport à la bouche testée permettant un usage y compris sur des bouches en insufflation provoquant une déviation importante du flux d'air.



Figure 7
Exemple d'un cône de mesure avec moulinet et prolongateur

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.

A3 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 :

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

Avec :

- $Qv_{réel}$, le débit volumique dans les conditions réelles de pression et de température ($P_{réel}$, $T_{réel}$),
- Qv_{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.



Elles peuvent également être équipées d'un dispositif permanent ou amovible permettant de redresser l'écoulement dans le cas d'un écoulement giratoire généré par un diffuseur en insufflation.

Parce que 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, certains instruments sont équipés d'un ventilateur de compensation. La présence de ce ventilateur permet également de s'affranchir fortement des perturbations de l'écoulement générées par les diffuseurs.

Figure 8
Exemple de hotte pour balomètre

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 cadre de déport réalisé en laine minérale revêtue d'une feuille d'aluminium :

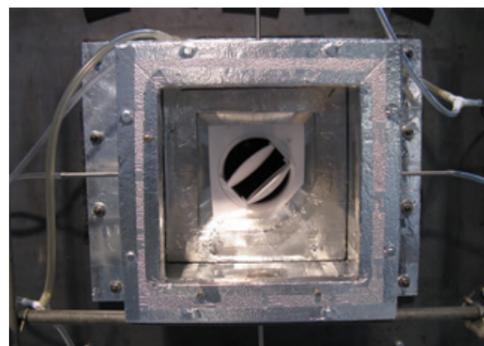


Figure 9
Bouche de soufflage
montée sur une paroi

entourée par un cadre de déport



seule



Figure 10
Diffuseur linéaire
monté sur un plafond

seul



entouré par un cadre de déport



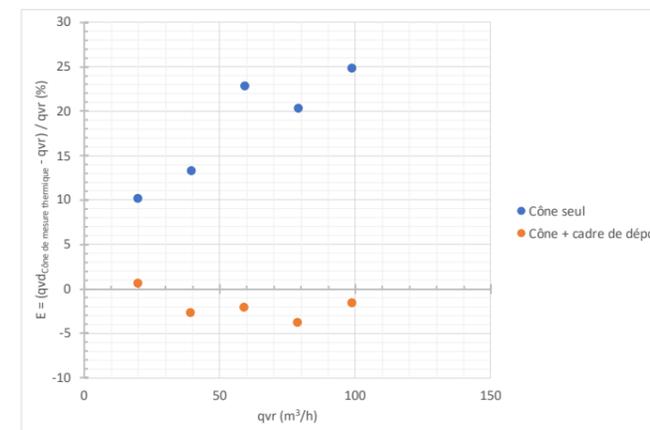
L'utilisation d'un cadre de déport peut répondre à deux problématiques différentes :

1. Au niveau de certaines bouches, particulièrement en soufflage, le flux d'air peut être particulièrement dévié (exemple Figure 9). 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.

2. 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 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.

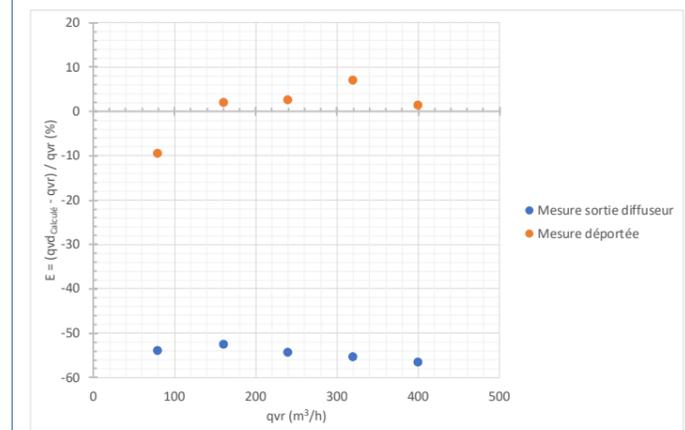
Figure 11
Comparaison des résultats de mesure de débit avec un cône de mesure équipé d'un anémomètre thermique sur une bouche soufflage en présence ou non d'un cadre de déport



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 collants au plafond, par exemple).

À 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 12
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



BIBLIOGRAPHIE

NF ISO 3966, Mesurage du débit des fluides dans les conduites fermées - Méthode d'exploration du champ des vitesses au moyen de tubes de Pitot doubles, Août 2021

NF EN 12599, Ventilation des bâtiments. Procédures d'essai et méthodes de mesure pour la réception des installations de ventilation et de climatisation installées, Décembre 2012

NF EN 16211, Systèmes de ventilation pour les bâtiments - Mesurages de débit d'air dans les systèmes de ventilation - Méthodes, Septembre 2015

NF E51-777, Systèmes de ventilation pour les bâtiments - Mesurages de débit d'air dans les systèmes de ventilation - Méthode de mesure de pression aux bouches autoréglables et hygroréglables, Décembre 2022

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

Instruction Technique n°246 relative au désenfumage dans les établissements recevant du public, Journal Officiel du 1er avril 2004

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



cetiat

ensemble, innover et valider

Mesures de débit d'air : Guide des bonnes pratiques sur site pour les installations de ventilation est un ouvrage édité par le Centre Technique des Industries Aérodynamiques et Thermiques (CETIAT).



CETIAT

Domaine Scientifique de la Doua
25, av. des Arts - BP 520242
69603 Villeurbanne Cedex - France
Tél. : +33 (0)4 72 44 49 00
information@cetiat.fr

www.cetiat.fr

