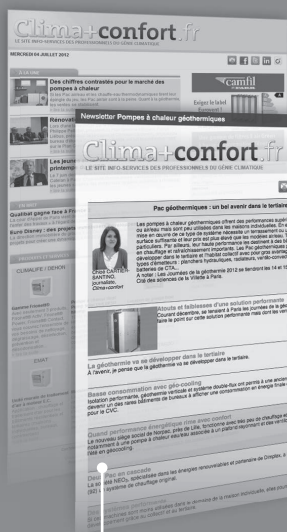


# Pratique de la mesure en génie climatique

>> EN **28** FICHES-OUTILS<<

# CLIMA+CONFORT

L'offre d'info des professionnels  
du génie climatique



44 newsletters  
par an



Accès à l'intégralité  
du site



8 numéros  
par an

Abonnez-vous sur [www.climaplusconfort.fr](http://www.climaplusconfort.fr) dès 82 € TTC

Clima+confort, une marque d'information

PYC ÉDITION

# Pratique de la mesure en génie climatique

CAHIERS TECHNIQUES

>> EN **28** FICHES-OUTILS <<

Thierry DUPUIS

CLIMA+CONFORT  
Efficacité énergétique & confort intérieur des bâtiments

DUNOD

Tout le catalogue sur  
[www.dunod.com](http://www.dunod.com)



ÉDITEUR DE SAVOIRS

Mise en page : Belle Page

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du

Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, 2015

5 rue Laromiguière, 75005 Paris

[www.dunod.com](http://www.dunod.com)

ISBN 978-2-10-073762-8

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Dans le domaine du génie climatique, les mesurages de grandeurs physiques sont fréquents et permettent d'atteindre plusieurs objectifs. Cet ouvrage est destiné aux ingénieurs soucieux de vérifier les performances des installations qu'ils ont conçues, aux metteurs au point qui règlent le fonctionnement des équipements en fonction des paramètres contractuels, aux techniciens de maintenance et d'exploitation qui assurent en continu le contrôle des performances de productions d'énergie et de distributions des fluides.

La diminution des consommations se révélant indispensable depuis plusieurs années, voire depuis le choc pétrolier des années 70, la juste utilisation des énergies requiert des campagnes de mesurages permanent de tous les paramètres aérauliques et hydrauliques. De même, le respect des contrats de travaux nécessite le commissionnement des ouvrages de génie climatique afin de valider les hypothèses de calculs et les performances attendues auprès du maître d'ouvrage.

Ces défis énergétiques concernent particulièrement les intervenants dans l'acte de construire et d'exploiter, et il m'a semblé utile de rappeler ce qui devait être fait dans le domaine du mesurage des grandeurs physiques rencontrées au quotidien.

Il est ainsi décrit dans cet ouvrage au sein des cinq premiers dossiers les principes de mesurage des débits aérauliques et hydrauliques, le mesurage de la température dans les gaines et dans les locaux, le mesurage de l'hygrométrie dans l'air et de la pression.

Le sixième dossier est consacré à la combustion des chaudières et aux mesurages des effluents gazeux avec quelques rappels fondamentaux de chimie pour les thermiciens désireux de mieux apprécier les mesurages.

Enfin, le dernier dossier est un rappel des principales notions de métrologie, avec notamment des exemples de calculs pratiques d'incertitudes et d'erreurs de mesurage s'appuyant sur les normes en vigueur.

Les dossiers sont rédigés sous forme de fiches-outils structurées en trois sections spécifiques :

- « Repères » apporte des éléments d'information de base sur les matériels de mesurage et sur leur utilisation ;
- « Savoir-faire » détaille la mise en œuvre de l'appareil de mesure en fonction des normes en vigueur si elles existent ou selon les règles de l'art ;
- « En pratique » expose des exemples concrets d'utilisation ainsi que des précautions d'usage.

Les annexes en fin d'ouvrage sont des rappels plus théoriques concernant les mesurages avec quelques données physiques et des définitions de termes utilisés couramment dans le domaine du traitement d'air.

Ces prolégomènes exposés, comme disent mes amis avocats, je laisse maintenant le lecteur se lancer sur le sentier de la métrologie pavé d'incertitudes...

## MOT DE L'AUTEUR ET REMERCIEMENTS

Ce nouvel ouvrage sur le domaine de la métrologie du génie climatique se veut un peu plus didactique que le précédent\*. Ma volonté de simplification n'a pour seul but que celui de transmettre mes acquis à mes contemporains pour leur permettre de poursuivre au mieux leur chemin avec un outil « de terrain » adapté.

Ce n'est qu'une « petite pierre apportée à l'édifice » mais j'espère qu'elle sera utile aux thermiciens confrontés aux difficultés de la construction et de l'environnement.

Je remercie Nadine de m'avoir permis une nouvelle fois de me lancer dans cette aventure.<sup>1</sup>

Thierry DUPUIS

---

\**Métrologie en génie Climatique*, Dunod Éditeur.

# SOMMAIRE

	Les cahiers techniques, mode d'emploi .....	10
<b>Dossier 1</b>	<b>Le débit aéraulique</b> .....	12
	<b>Fiche 1</b> L'anémomètre à fil chaud.....	14
	<b>Fiche 2</b> L'anémomètre à hélice .....	24
	<b>Fiche 3</b> Le tube de Pitot.....	34
	<b>Fiche 4</b> L'anémomètre à effet Vortex.....	40
	<b>Fiche 5</b> Le balomètre .....	44
	<b>Fiche 6</b> Le mesurage des turbulences de l'air .....	48
<b>Dossier 2</b>	<b>Le débit hydraulique</b> .....	56
	<b>Fiche 7</b> Les débitmètres déprimogènes .....	58
	<b>Fiche 8</b> Le débitmètre volumique à ultrasons.....	68
	<b>Fiche 9</b> Le débitmètre volumique électromagnétique.....	74
	<b>Fiche 10</b> Le débitmètre volumique à effet Vortex .....	76
	<b>Fiche 11</b> Le débitmètre volumique à turbine.....	78
	<b>Fiche 12</b> Les débitmètres volumétriques .....	80
	<b>Fiche 13</b> Le débitmètre massique à effet Coriolis.....	84
	<b>Fiche 14</b> Le débitmètre massique thermique.....	88
<b>Dossier 3</b>	<b>La température</b> .....	92
	<b>Fiche 15</b> Le capteur à résistance type PT100 .....	94
	<b>Fiche 16</b> Le capteur à résistance CTN .....	104
	<b>Fiche 17</b> Le thermocouple .....	106
	<b>Fiche 18</b> Le capteur à contact.....	110
	<b>Fiche 19</b> Le thermomètre optique à infrarouge.....	116
<b>Dossier 4</b>	<b>La pression</b> .....	126
	<b>Fiche 20</b> Les capteurs-transmetteurs de pression.....	128
	<b>Fiche 21</b> Les manomètres à colonne de liquide.....	142
<b>Dossier 5</b>	<b>L'hygrométrie de l'air</b> .....	146
	<b>Fiche 22</b> Le psychromètre .....	148
	<b>Fiche 23</b> L'hygromètre capacitif .....	154



<b>Dossier 6</b>	<b>La combustion</b> .....	158
	<b>Fiche 24</b> Les analyseurs chimiques .....	160
	<b>Fiche 25</b> Les opacimètres.....	168
	<b>Fiche 26</b> Le dépressostat de conduit.....	172
<b>Dossier 7</b>	<b>Rappels de metrologie</b> .....	174
	<b>Fiche 27</b> Les incertitudes de mesures .....	176
	<b>Fiche 28</b> Les erreurs de mesures.....	198
<b>Annexes</b>	.....	216
	<b>Annexe 1</b> Les échelles de température .....	218
	<b>Annexe 2</b> Définitions des différents airs (norme NF X 15-110) .....	219
	<b>Annexe 3</b> Calcul de la masse volumique de l'air.....	221
	<b>Annexe 4</b> Définitions des paramètres hygrométriques .....	226
	<b>Annexe 5</b> Les unités de combustion .....	235
	<b>Annexe 6</b> Incertitudes-types composées.....	237
	Bibliographie.....	241
	Index .....	249

# LES CAHIERS TECHNIQUES, MODE D'EMPLOI

Les fiches sont classées par dossier

**DOSSIER** 1

## LE DÉBIT AÉRAULIQUE

La maîtrise des débits d'air qui circulent dans les installations de génie climatique revêt un caractère prépondérant pour différentes raisons. Que ce soit pour atteindre les performances en matière de confort, d'hygiène et de consommation énergétique, le mesurage des quantités d'air véhiculées devient un paramètre fondamental au moment de la livraison d'une installation aéraulique, et ensuite pour la conservation de ses performances.

En raison de l'évolution de la réglementation thermique, le pourcentage de plus en plus important que représente la part d'énergie nécessaire au traitement de l'air par rapport au bâti doit amener les techniciens à approfondir leur savoir-faire, à utiliser les bons outils et employer des méthodes de mesurages adaptées.

Les difficultés sont grandes quand on veut mesurer la vitesse d'un fluide « incolore, inodore et sans saveur » comme c'est le cas de l'air. Les incertitudes de mesure sont parfois déconcertantes et il faut apprécier le résultat du mesurage avec précaution avant d'en tirer des conclusions.

Dans ce dossier sont détaillés sous forme de fiches les appareils les plus couramment utilisés pour mesurer les débits aérauliques dans le domaine du génie climatique ainsi que les méthodes normalisées quand elles existent et pour certains, ou ayant fait leur preuve pour d'autres.

L'exploration de ces champs de vitesses permet de mieux appréhender la répartition des flux à condition que ce soit le bon appareil qui soit utilisé. Ces mesurages permettent d'apprécier la qualité de l'installation dans son ensemble.

L'évolution permanente des constructeurs de matériels de métrologie pour s'adapter aux différentes normes permet aux ingénieurs, techniciens et installateurs aux points d'installation de s'approcher aux plus près des mesurages pertinents pour améliorer et quantifier l'utilisation des énergies véhiculées dans les bâtiments.

8

**DOSSIER** 1

## LES FICHES

Fiche 1 : L'anémomètre à fil chaud .....	10
Fiche 2 : L'anémomètre à hélice .....	20
Fiche 3 : Le tube de Pitot .....	30
Fiche 4 : L'anémomètre à effet Vortex .....	36
Fiche 5 : Le balomètre .....	40
Fiche 6 : Le mesurage des turbulences de l'air .....	44

9

Une introduction reprenant les grandes thématiques du dossier

Un menu déroulant des fiches du dossier

Une signalétique claire

FICHE 3

LE TUBE DE PITOT

Mise en avant de l'objectif de la fiche

Objectif

L'utilisation du tube de Pitot permet de mesurer la vitesse d'un fluide d'une manière très simple et relativement précise. Très léger, robuste et facile d'emploi, le domaine du génie climatique fait souvent appel à cet outil pour les mesures intrusives dans des gaines où circulent l'air ou des effluents gazeux.

REPÈRES

Une partie Repères pour définir les bases

Le tube de Pitot permet de déterminer la vitesse d'un fluide d'une manière très simple et relativement précise. Très léger, robuste et facile d'emploi, le domaine du génie climatique fait souvent appel à cet outil pour les mesures intrusives dans des gaines où circulent l'air ou des effluents gazeux.

Les tubes de Pitot sont fabriqués d'après la norme NF X10-112 de septembre 1977 intitulée « Mesure du débit des fluides dans les conduites fermées ».

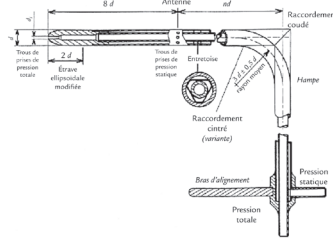


Figure 3.1 Exemple du tube de Pitot NPL décrit dans la norme NF X10-112

34

Le débitmètre massique à effet Coriolis

FICHE 13

SAVOIR-FAIRE

Une partie Savoir-faire qui détaille la mise en œuvre

Normalement installé, on peut estimer la précision de mesure d'un débitmètre à effet Coriolis à environ 0,2 et 0,3 % de la pleine échelle. On peut placer le débitmètre à effet Coriolis dans plusieurs positions (figure 13.2) :

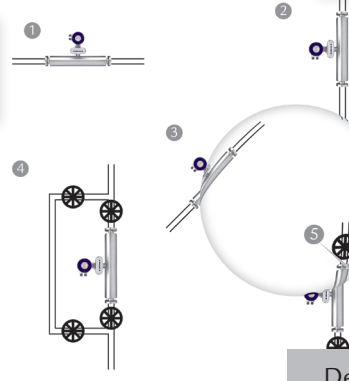


Figure 13.2 Positions possibles du débitmètre à effet Coriolis (doc. KROHNE). (1) position verticale avec écoulement horizontal, (2) position oblique avec écoulement ascendant, (3) position verticale avec écoulement descendant, (4) position verticale avec écoulement horizontal, (5) position verticale avec écoulement horizontal et pompe de circulation s'arrêtant.

Des schémas clairs et complets

LE DÉBIT HYDRAULIQUE

85

FICHE 21

Les n

Des compléments d'information pour aller plus loin

obtenir le rapport à la hauteur de la gaine de

Exemples

- ◆ Pour un angle  $\alpha$  de 45°, la longueur sera 1,41 fois la hauteur  $h$  ( $\sin \alpha = 0,707$ ).
- ◆ Pour un angle  $\alpha$  de 30°, la longueur  $L$  sera le double de la hauteur  $h$  ( $\sin \alpha = 0,50$ ).

Si on appelle  $\alpha$  l'angle formé par le tube par rapport à l'horizontale, et  $h$  la hauteur manométrique, la longueur  $L$  de graduation sera plus importante qu'avec un tube en U car  $\sin \alpha < 1$  :

$$L = \frac{h}{\sin \alpha}$$

Une partie En pratique pour une application terrain

EN PRATIQUE

Lecture de la pression

La lecture de la pression doit se faire en fonction de la forme du ménisque (surface du liquide) liée à la nature du fluide utilisé dans le tube lui-même.

On peut remarquer que les forces capillaires s'exercent différemment selon qu'il s'agit d'eau (ménisque concave) ou de mercure (ménisque convexe). La lecture doit se faire au niveau de l'attache du liquide sur le bord du tube (figure 21.3).

Au voisinage de la paroi du tube, il se forme un ménisque sous l'effet de la capillarité. Ce phénomène revêt une importance particulière avec les tubes de diamètre inférieur à 8 mm. La forme concave ou convexe du ménisque dépend aussi de la propriété de mouillage du liquide utilisé.

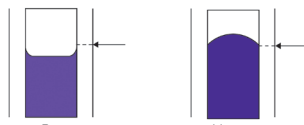


Figure 21.3 Lecture du ménisque (doc. Dunod)

144

Le thermomètre optique à infrarouge

FICHE 19

Matériau	Type/structure/Élément	Température (°C)	$\epsilon$
Tableau d'inconel	tablette d'inconel	540	0,28
	tablette d'inconel	650	0,42
Cadmium	cadmium	25	0,92
	non oxydé	500	0,31
Cobalt	oxyde de cuivre	100	0,87
	oxyde de cuivre	260	0,83
Cuivre	oxyde de cuivre	540	0,77
	oxyde noir	40	0,78
Cuivre	corrodé	40	0,09
	poli	40	0,03
Cuivre	laminé	40	0,64
	brut	40	0,74
Cuivre	fendu	540	0,15
	Ni 20, Cr 24, Fe 55 oxydé	200	0,90
Alliage	Ni 60, Cr 12, Fe 28 oxydé	270	0,89
	Ni 80, Cr 20, oxydé	100	0,87
Magnésium	magnésium	40 jusqu'à 260	0,07 jusqu'à 0,13
	73 % Cu, 27 % Zn, poli	250	0,03
Laiton	82 % Cu, matre	540	0,28
	bruni	400	0,44
Molybdène	oxyde	600	0,46
	non oxyd	20	0,43
Molibdène	poli	40	0,05
	oxyde	40 jusqu'à 260	0,31 jusqu'à 0,46
Monel	non oxydé	25	0,95
	non oxydé	100	0,96
Nickel	non oxydé	500	0,92
	galvanisé	40	0,04
Platine	platine	40	0,05
	platine	40 jusqu'à 260	0,10
Platine	noire	540	0,93
	noire	40	0,96
Platine	oxyde à 600 °C	260	0,07
	oxyde à 600 °C	540	0,11

Des banques de données pour aider au dimensionnement

DOSSIER 3 : LA TEMPÉRATURE

121

# LE DÉBIT AÉRAULIQUE

La maîtrise des débits d'air qui circulent dans les installations de génie climatique revêt un caractère prépondérant pour différentes raisons. Que ce soit pour atteindre les performances en matière de confort, d'hygiène et de consommation énergétique, le mesurage des quantités d'air véhiculées devient un paramètre fondamental au moment de la livraison d'une installation aéraulique, et ensuite pour la conservation de ses performances.

En raison de l'évolution de la réglementation thermique, le pourcentage de plus en plus important que représente la part d'énergie nécessaire au traitement de l'air par rapport au bâti doit amener les techniciens à approfondir ce vecteur qualitatif et économique.

Il faut par conséquent utiliser les bons outils et employer des méthodes de mesurages adaptées.

Les difficultés sont grandes quand on veut mesurer la vitesse d'un fluide « incolore, inodore et sans saveur » comme c'est le cas de l'air. Les incertitudes de mesure sont parfois déconcertantes et il faut apprécier le résultat du mesurage avec précaution avant d'en tirer des conclusions.

Dans ce dossier sont détaillés sous forme de fiches les appareils les plus couramment utilisés pour mesurer les débits aérauliques dans le domaine du génie climatique ainsi que les méthodes normalisées quand elles existent pour certains, ou ayant fait leur preuve pour d'autres.

L'exploration des champs de vitesses permet de mieux appréhender la répartition des flux à condition que ce soit le bon appareil qui soit utilisé. Ces mesurages permettent d'apprécier la qualité de l'installation dans son ensemble.

L'évolution permanente des constructeurs de matériels de métrologie pour s'adapter aux différentes normes permet aux ingénieurs, techniciens et metteurs au point d'installations de s'approcher aux plus près des mesurages pertinents pour améliorer et quantifier l'utilisation des énergies véhiculées dans les bâtiments.

La notion de confort, ou d'inconfort, met en exergue les anomalies de conception et de réalisation des installations de traitement et de diffusion d'air. Une méthode normalisée est aussi reprise dans ce dossier.

Pour paraphraser le vieil adage, nous pourrions dire « chaque mesurage a sa méthode et une méthode pour chaque mesurage ».

## LES FICHES

<b>Fiche 1</b> : L'anémomètre à fil chaud .....	14
<b>Fiche 2</b> : L'anémomètre à hélice.....	24
<b>Fiche 3</b> : Le tube de Pitot .....	34
<b>Fiche 4</b> : L'anémomètre à effet Vortex .....	40
<b>Fiche 5</b> : Le balomètre .....	44
<b>Fiche 6</b> : Le mesurage des turbulences de l'air .....	48

**Objectif**

*L'anémomètre à fil chaud est utilisé pour déterminer la vitesse de l'air dans une gaine ou à proximité d'une grille de ventilation.*

**REPÈRES**

L'anémomètre est constitué d'un élément sensible dit « fil chaud » protégé dans un cylindre dans lequel circule le flux d'air (figure 1.1). Il comprend aussi une sonde qui mesure la température.

L'anémomètre à « fil chaud », appelé aussi anémomètre thermique, est couramment utilisé d'une manière intrusive dans les gaines des installations de génie climatique pour mesurer des vitesses comprises entre 0,15 m/s et 30 m/s avec un flux à 80 °C maximum, et un air propre en raison de la fragilité de l'élément sensible.

Placé perpendiculairement à la veine d'air, le flux refroidi le « fil chaud » qui est en réalité une thermistance dont la variation de conduction thermique varie en fonction de la vitesse du flux. La puissance électrique fournie au « fil chaud » pour le maintenir à la température d'équilibre  $T_f$  est proportionnelle à l'écart entre cette température et la température  $T_0$  du fluide mesurée.

**SAVOIR-FAIRE**

L'utilisation d'un anémomètre à fil chaud nécessite un positionnement rigoureux dans la veine d'air. Il doit être orthogonal au flux de manière à ce que l'air traverse directement le cylindre de protection. Un écart angulaire maximal de 2° par rapport à la verticale est acceptable, ainsi que par rapport au plan horizontal. Au-delà, le mesurage sera entaché d'une erreur supplémentaire (figure 1.1)

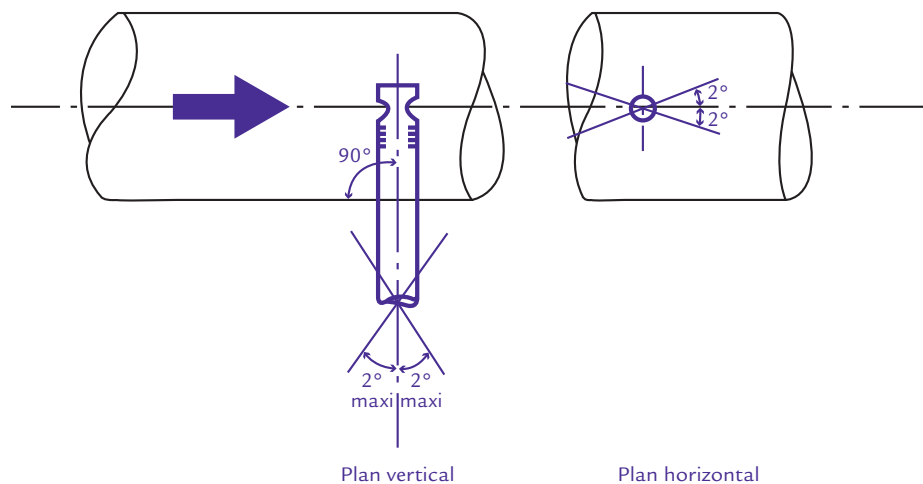


Figure 1.1 Position de l'anémomètre à fil chaud

## Mesurage dans une gaine

La dimension de l'anémomètre ne doit pas perturber la mesure par rapport à la section de la gaine. Il est admis un rapport de 2 % entre le diamètre de l'anémomètre et le diamètre de la gaine pour ne pas considérer l'obstruction que crée le corps du fil chaud dans la veine d'air. Au-delà, une erreur de mesure supplémentaire est à considérer.

Il faut être vigilant avec les gaines de petites dimensions. Par exemple, pour une gaine DN125, le fil chaud devrait donc être de diamètre maximal 2,5 mm, alors que les produits commercialisés ont des diamètres de l'ordre de 8 mm qui ne permettraient en théorie que des mesurages dans des gaines de DN400 minimum. N'ayant pas le choix à ce jour, on doit absolument considérer que les mesurages dans des gaines de diamètre inférieur à DN315 nécessitent une appréciation toute à fait particulière du résultat.

Pour faciliter le repérage des points de mesure dans les gaines, les constructeurs (TESTO, KIMO, etc.) graduent le corps télescopique de leur « fil chaud » afin de le placer à la distance souhaitée par rapport à la paroi extérieure. Un repère prévu par le constructeur permet également de bien positionner du fil chaud dans l'axe longitudinal de la veine d'air.



## EN PRATIQUE

L'anémomètre à fil chaud est surtout utilisé pour déterminer les vitesses et les débits d'air dans les gaines.

Le fait que la température du fluide soit quantifiée en même temps que sa vitesse permet de ramener le résultat dans les conditions normales de température et de pression (20 °C et 101 325 Pa). Le débit volumique  $Q_v$  est déterminé en fonction de la section de la gaine au droit du champ de vitesse exploré.

En plus de sa fragilité, un autre inconvénient de l'anémomètre à fil chaud provient du fait qu'il ne permet pas de connaître le sens de l'air car il indique une valeur dans toutes les positions. En complément, on peut utiliser un tube de Pitot qui, lui, est très sensible au sens de l'air (voir fiche 2 ci-après).

### Champ de vitesse dans une gaine rectangulaire

À l'intérieur d'un conduit fermé tel qu'une gaine de ventilation, la vitesse de l'air n'est pas homogène. Au contact des parois notamment, le flux est ralenti. Pour déterminer la vitesse débitante, il faut par conséquent explorer le champ de vitesse à plusieurs endroits et, selon la méthode utilisée, effectuer une moyenne arithmétique des valeurs obtenues aux différents points de mesure.

La norme NF EN 12599 de décembre 2012 décrit une méthode d'exploration du champ de vitesse dans une gaine rectangulaire. Elle est basée sur la division de la section d'écoulement en aires de surfaces égales, appelées aussi « centroïdes d'aires égales ». Le mesurage s'effectue au centre de chaque surface (figure 1.2).

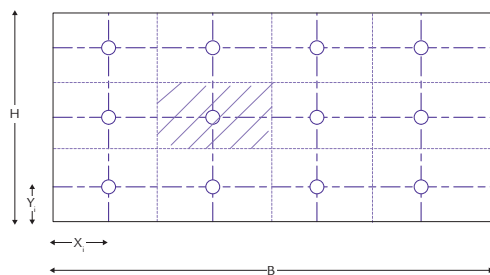
Les distances entre la paroi du conduit et le point de mesure sont déterminées par l'équation suivante, dite « méthode simple », anciennement dite « méthode triviale » :

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

avec :

- $y_i ; x_i$  : coordonnées du point de mesure ;
- $B$  : largeur du conduit ;
- $H$  : hauteur du conduit ;
- $i$  : nombre ordinal du point de mesure ;
- $n$  : nombre de point de mesure sur une même droite.





**Figure 1.2** Exemple de répartition de points de mesure au centre d'aires de surfaces égales

La norme NF EN 12599 présente l'avantage d'indiquer le pourcentage d'erreur probable lié à cette méthode en fonction de la distance d'un obstacle situé en amont et de l'incertitude de mesure de l'appareil de mesure utilisé. Plus l'incertitude souhaitée sera faible, plus grand sera le nombre de mesurages à réaliser (tableau 1.1).

**Tableau 1.1** Nombre de points de mesure requis

Distance relative $L_r = L/D_h$	% incertitude totale / % incertitude de l'appareil de mesure		
	10/5	15/5	15/10
1,6	-	30	44
2,0	50	21	30
2,5	34	16	24
3,0	25	12	18
4,0	16	8	12
5,0	12	6	9
6,0	9	4	6

$L$  : distance entre la section de mesure et l'obstacle situé en amont.

$D_h$  : diamètre hydraulique de la conduite rectangulaire (voir ci-après le calcul de  $D_h$ ).

La localisation des points de mesure est alors définie dans le tableau 1.2.

**Tableau 1.2** Distance relative des points de mesure par rapport au bord intérieur d'une conduite rectangulaire

Nombre de points de mesure $n$ par ligne	Distance relative des points de mesure $i$ par rapport à un bord intérieur du conduit rectangulaire ( $x_i/B$ ou $y_i/H$ )									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	0,167	0,500	0,833							
4	0,125	0,375	0,625	0,875						
5	0,100	0,300	0,500	0,700	0,900					
6	0,083	0,250	0,417	0,583	0,750	0,917				
7	0,071	0,214	0,357	0,500	0,643	0,786	0,929			
8	0,062	0,187	0,312	0,438	0,563	0,688	0,813	0,938		
9	0,056	0,167	0,278	0,389	0,500	0,611	0,722	0,833	0,944	
10	0,050	0,150	0,250	0,350	0,450	0,550	0,650	0,750	0,850	0,950

Certains constructeurs comme Testo par exemple commercialisent des anémomètres guidant l'opérateur pour le positionnement de l'anémomètre dans le champ de vitesse en fonction des dimensions de la gaine, qu'elle soit rectangulaire ou circulaire en respectant la norme NF EN 12599.

*Exemple d'application*

Si l'on souhaite connaître le débit dans une section de gaine de ventilation de 0,6 m x 0,8 m située à 3,5 m en aval d'une singularité et en tolérant une incertitude de  $\pm 10\%$  sur le résultat, dont  $\pm 5\%$  dû à l'appareil de mesure, combien faut-il de points de mesure ?

Il faut d'abord déterminer le diamètre hydraulique  $D_h$  correspondant à cette gaine rectangulaire :

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

avec :

$S$  : la section de passage du fluide, en  $m^2$  ;

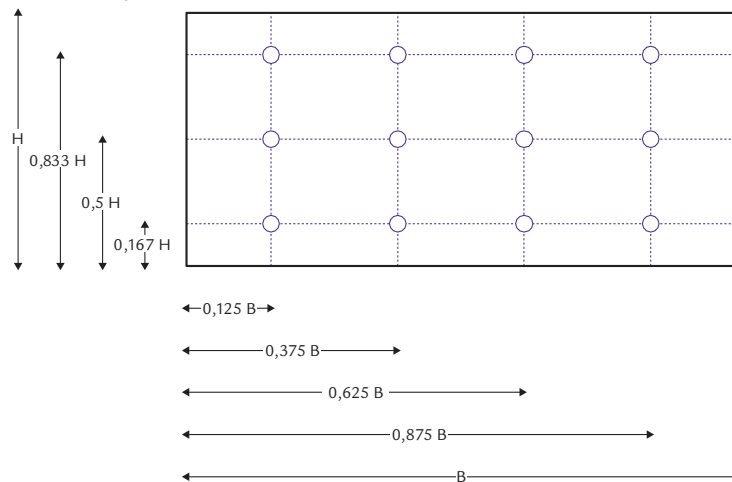
$P$  : le périmètre de la conduite, en m.

$$D_h = \frac{4(0,6 \times 0,8)}{2(0,6 + 0,8)} = 0,69 m$$

La distance relative  $L_r$  est égale à :

$$L_r = \frac{L}{D_h} = \frac{3,5}{0,69} = 5$$

En fonction du tableau 1.2, il faut 12 points de mesure, ceux-ci étant répartis de la façon suivante :



**Figure 1.3** Exemple de répartition des points de mesure d'une gaine rectangulaire selon la norme NF EN 12599

## Champ de vitesse dans une gaine circulaire

Comme dans le cas d'une gaine rectangulaire exposé ci-dessus, la norme NF EN 12599 de décembre 2012 décrit une méthode d'exploration du champ de vitesse dans une gaine circulaire. Elle est basée sur la division de la section d'écoulement en centroïdes de surfaces égales (figure 1.4).

Après la détermination du nombre de points de mesure de la même manière qu'avec une gaine rectangulaire, la répartition des points de mesure se fait d'après le tableau 1.3.

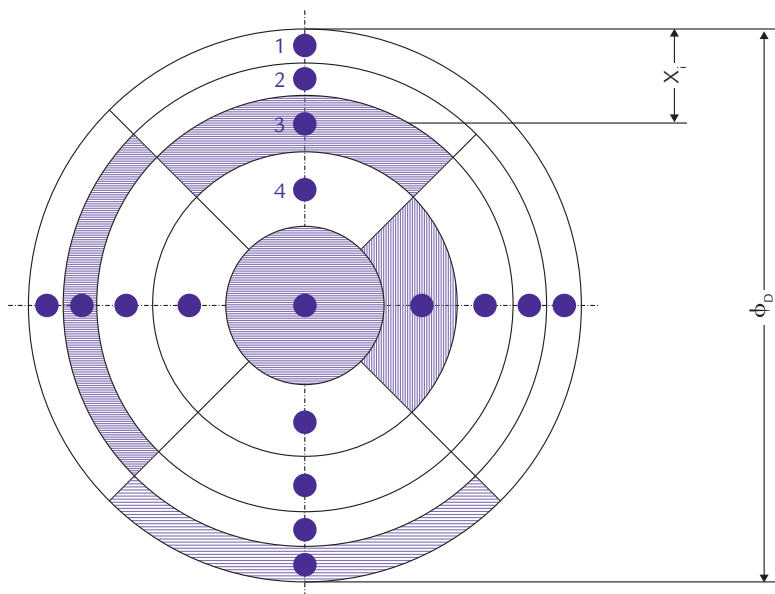


Figure 1.4 Exemple de répartition de points de mesure au centres d'aires égales

Tableau 1.3 Distance relative des points de mesure par rapport au bord intérieur d'une conduite circulaire

Nombre de points de mesure $n$ par ligne	Distance relative des points de mesure $i$ par rapport à un bord intérieur du conduit circulaire ( $x_i/D$ )									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,1644									
2	0,0670	0,2500								
3	0,0436	0,1464	0,2959							
4	0,0323	0,1047	0,1938	0,3232						
5	0,0257	0,0817	0,1464	0,1161	0,3419					
6	0,0213	0,0670	0,1181	0,1773	0,2500	0,3557				
7	0,0182	0,0568	0,0991	0,1464	0,2012	0,2685	0,3664			
8	0,0159	0,0493	0,8540	0,1250	0,1693	0,2205	0,2835	0,3750		
9	0,0141	0,0436	0,0751	0,1091	0,1464	0,1882	0,2365	0,2959	0,3821	
10	0,0127	0,0390	0,0670	0,0969	0,1292	0,1646	0,2042	0,2500	0,3064	0,3882

*Exemple d'application*

La section de mesure d'une gaine circulaire de diamètre 0,8 m se situe à 4 m d'une singularité avec une incertitude totale de  $\pm 10\%$  sur le résultat, dont  $\pm 5\%$  dû à l'appareil de mesure.

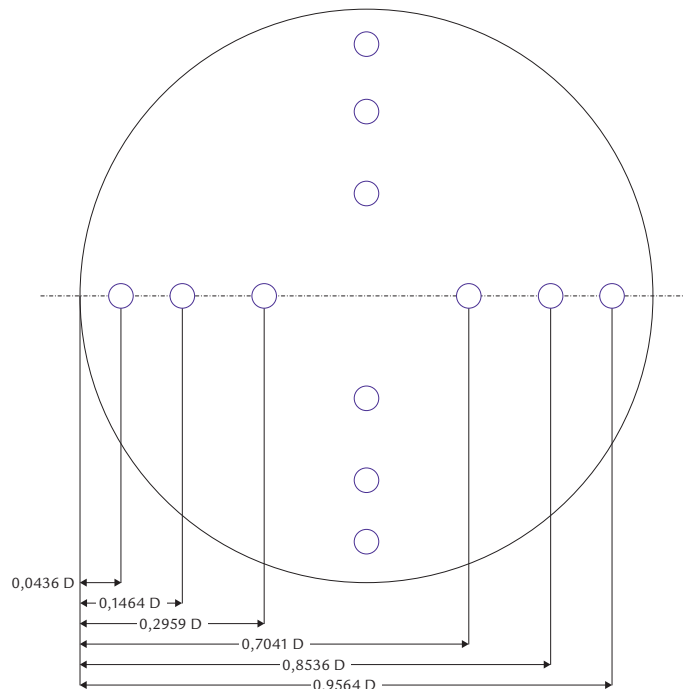
La distance relative  $L_r$  est égale à :

$$L_r = \frac{L}{D} = \frac{4}{0,8} = 5$$

En fonction du tableau 1.1, il faut 12 points de mesure à répartir sur toute la section de mesure, soit 3 par demi-diamètres. Ceux-ci sont répartis sur 3 anneaux de mesure de la façon suivante :

- point 1 à 0,0436 D
- point 2 à 0,1464 D
- point 3 à 0,2959 D
- point 4 à  $(1-0,2959) D = 0,7041 D$
- point 5 à  $(1-0,1464) D = 0,8536 D$
- point 6 à  $(1-0,0436 D) = 0,9564 D$

On peut remarquer que le centre de la gaine n'est pas forcément un point de mesurage.



**Figure 1.5** Exemple de répartition des points de mesure d'une gaine circulaire selon la norme NF EN 12599

## Mesurage en un seul point

Un mesurage unique peut être suffisant pour approcher la vitesse débitante dans une gaine circulaire. L'anémomètre doit être placé au centre de la conduite ou à la distance de **0,242 R** de la paroi extérieure avec une tolérance de  $\pm 0,01 R$ .

L'écoulement doit être établi pour que la répartition des vitesses soit invariable au niveau de la section de mesurage.

Quelques précautions sont à respecter ; un tronçon rectiligne suffisant en fonction de la perturbation située en amont (tableau 1.4) et une longueur droite équivalent à cinq diamètres en amont.

Le rapport entre le diamètre  $\phi$  de l'anémomètre à fil chaud et le diamètre  $\Phi$  de la gaine ne doit pas dépasser 0,02 (0,11 dans le cas d'un anémomètre à hélice).

**Tableau 1.4** Longueur droite en amont de la section de mesure

Type de perturbation	Longueur droite minimale en amont (exprimée en multiple du diamètre de la conduite)	
	Mesure sur l'axe de la conduite	Mesure au point de vitesse débitante
Coude à 90° ou té	25	50
Plusieurs coudes à 90° coplanaires	25	50
Plusieurs coudes à 90° non coplanaires	50	80
Convergent d'angle total 18° à 36°	10	30
Divergent d'angle total 14° à 28°	25	55

## Diamètre hydraulique d'une gaine non circulaire

Dans le cas de conduite à géométrie complexe, rectangulaire ou carré par exemple, il est nécessaire d'utiliser la notion de « diamètre hydraulique », noté  $D_h$ . Cette grandeur correspond au diamètre équivalent d'une conduite de section circulaire respectant un rapport entre la section ( $a \times b$ ) et le périmètre  $2(a + b)$  de la conduite réelle.

La relation dite de CHESY est la suivante :

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

Avec :

- $S$  : la section de passage du fluide, en  $m^2$  ;
- $P$  : le périmètre de la conduite, en m.