

Pratique de la mesure en génie climatique

CAHIERS TECHNIQUES

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

Thierry DUPUIS



DUNOD

Tout le catalogue sur
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^{er} 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

ISBN 978-2-10-074087-1

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.¹

Thierry DUPUIS

* *Métrologie en génie Climatique*, Dunod Éditeur.

SOMMAIRE

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

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

LES CAHIERS TECHNIQUES, MODE D'EMPLOI

Les fiches sont
classées par dossier



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 des mesures intrusives dans des gaines où circulent l'air ou des effluents gazeux.

REPÈRE

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 des 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 ».

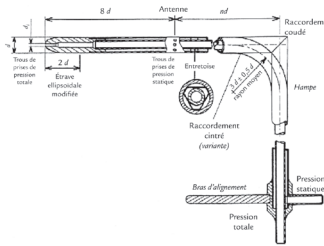


Figure 3.1 Exemple du tube de Pitot NPL décrit dans la norme NF X10-112

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 0,5 % de la pleine échelle. On peut placer le débitmètre à effet Coriolis dans plusieurs positions (figure 13.2) :

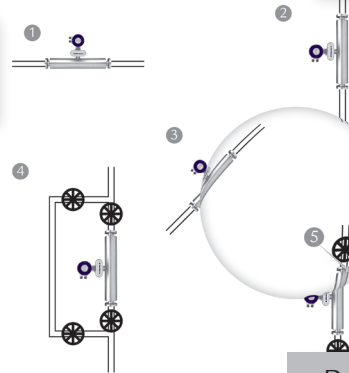


Figure 13.2 Positions possibles du débitmètre à effet Coriolis (doc. KROHNE). (1) position verticale avec écoulement horizontal, (2) position oblique avec écoulement ascendant, (3) position horizontale avec écoulement ascendant, (4) position verticale avec écoulement descendant, (5) position horizontale avec écoulement descendant.

Des schémas
clairs et complets

DOSSIER 3 : LE DÉBIT HYDRAULIQUE

85

FICHE 21

Les n

Des compléments
d'information pour
aller plus loin

Exemples

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

Si on appelle α 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.

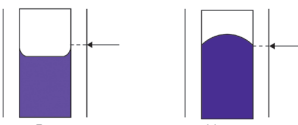


Figure 21.3 Lecture du ménisque (doc. Dunod)

144

Le thermomètre optique à infrarouge

FICHE 19

Matière	Type/structure/Élément	Température (°C)	ϵ
Tableau d'inconel	tablette d'inconel	540	0,28
	tablette d'inconel	650	0,42
Cadmium	cadmium	25	0,02
	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
Corrosé	corrosé	40	0,09
	poli	40	0,03
Laminé	laminé	40	0,64
	brut	40	0,74
Fendu	fendu	540	0,15
Alliage	Ni 20, Cr 24, Fe 55 oxydé	200	0,90
	Ni 60, Cr 12, Fe 28 oxydé	270	0,89
Magnésium	Ni 80, Cr 20, oxydé	100	0,87
	magnésium	40 jusqu'à 260	0,07 jusqu'à 0,13
73 % Cu, 27 % Zn, poli	73 % Cu, 27 % Zn, poli	250	0,03
62 % Cu	62 % Cu		
	matte		
Laiton	brut		
	oxydé		
Molybdène	non oxydé		
	molybdène		
Molybdène	molybdène	540	
Ni Cu	Ni Cu	400	
	monel	600	0,44
Monel	monel	20	0,46
	oxydé	20	0,43
Nickel	poli	40	0,05
	oxydé	40 jusqu'à 260	0,11 jusqu'à 0,46
Nickel	non oxydé	25	0,05
	non oxydé	100	0,06
Nickel	non oxydé	500	0,04
	galvanisé	40	0,05
Platine	platine	40 jusqu'à 260	0,10
	noire	540	0,93
Platine	noire	260	0,96
	oxydé à 600 °C	260	0,07
Platine	oxydé 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

Fiche 1 : L'anémomètre à fil chaud	14
Fiche 2 : L'anémomètre à hélice.....	24
Fiche 3 : Le tube de Pitot	34
Fiche 4 : L'anémomètre à effet Vortex	40
Fiche 5 : Le balomètre	44
Fiche 6 : 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)