

Thierry Dupuis
Guy Delmas



MÉTROLOGIE EN GÉNIE CLIMATIQUE

DUNOD

Thierry Dupuis
Guy Delmas

MÉTROLOGIE EN GÉNIE CLIMATIQUE



DUNOD

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, Paris, 2009
ISBN 978-2-10-054270-3

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.

PRÉFACE

Les défis énergétiques auxquels nous sommes confrontés affectent très largement le monde du bâtiment et pour cause : ce secteur représente 42,5 % de l'énergie finale consommée pour prendre les chiffres français. L'objectif de réduction d'un facteur 4 des émissions dans le bâtiment ne peut être envisagé que par des actions fortes accompagnées de vérification régulière de leur efficacité. Bâtiments basse consommation, Bâtiments à énergie neutre ou positive ; tout ceci suppose non seulement des actes de conception mais aussi des pratiques de mise au point, de diagnostic et de suivi.

Sans nul doute, une plus grande technicité des acteurs du génie climatique sera requise dans les années qui viennent, d'autant que le climaticien devra intervenir non seulement sur les installations « traditionnelles » mais aussi sur celles qui apparaissent et surgiront, faisant appel aux énergies renouvelables, généralement pourvues d'exigences fortes en régulation voire en optimisation.

La notion de commissionnement permanent devra devenir une réalité si on ne veut pas que nos objectifs de réduction des consommations restent de simples déclarations d'intention. Et ceci devra se faire face à des occupants réclamant non seulement du confort thermique mais plus globalement des ambiances où l'on se sent bien, ce qui inclut notamment un souci de bien-être sonore.

Contrôler les performances, s'assurer de leur maintien dans le temps, mesurer des consommations et des niveaux sonores in situ, équilibrer des réseaux, s'engager sur des résultats et prendre des engagements contractuels, autant de missions pour les acteurs du Génie climatique.

Si la littérature technique aborde fréquemment la question de la mesure, il faut admettre que l'information est dispersée et rarement orientée vers une profession en particulier. Faire connaître la palette des outils qui s'offre au praticien du génie climatique, le conseiller dans son usage tel est l'objectif de cet ouvrage.

À cet égard, la qualité des auteurs qui sont de véritables experts de la mesure *in situ* apporte un regard pratique sur cette matière. Il ne s'agit pas seulement d'expliquer comment fonctionnent tel ou tel appareil mais aussi d'aider au choix, conseiller dans la mise en œuvre et le respect des conditions opératoires.

Il est remarquable qu'un thermicien et un acousticien se soient unis pour couvrir ce champ large et pluri disciplinaire. Il est également précieux que des professionnels chevronnés cherchent à transmettre leurs connaissances et leur savoir faire. Enfin,

c'est avec un plaisir particulier que je préface T. DUPUIS qui fut élève d'ISUPFERE, cycle d'ingénieur de MINES ParisTech. Je connais en effet sa rigueur et son souci de partager.

Dominique MARCHIO
Professeur à MINES ParisTech

TABLE DES MATIÈRES

Préface	III
Avant-propos	XI
Remerciements	XIII
Introduction	1

A

Les mesures de débits aérauliques par T. DUPUIS

1 • Les moyens de mesurage	5
1.1 Le tube de Pitot double	5
1.2 L'anémomètre à fil chaud	16
1.3 L'anémomètre à effet Vortex	20
1.4 L'anémomètre à ailettes (ou à hélice)	24
1.5 Le balomètre	26
1.6 Les débitmètres déprimogènes	30
2 • Les méthodes de mesurage	33
2.1 Débit dans une gaine rectangulaire	34
2.2 Débit dans une gaine circulaire	36
2.3 Débit d'une bouche de soufflage	41
2.4 Débit d'une bouche de soufflage à rotules orientables	45
2.5 Débit d'une bouche de soufflage à induction	48
2.6 Débit d'une grille à déplacement	48
2.7 Débit d'une grille de désenfumage	50
2.8 Débits d'air d'une sorbonne	50

2.9	Débit d'air d'un plafond diffusant	51
2.10	Débit d'air d'une poutre climatique	51
2.11	Nombre de mesurages à effectuer sur les installations	52
3 •	Annexes	55
3.1	Rappels de mécanique des fluides appliqués aux sondes de pression	55
3.2	Calcul de la masse volumique de l'air en fonction de la température, de la pression et de l'hygrométrie	59
3.3	Calcul du diamètre hydraulique D_h d'une conduite	63
3.4	Exploration du champ de vitesse avec la méthode « log-Tchebycheff »	63
3.5	Exploration du champ de vitesse avec la méthode « log-linéaire »	66
3.6	Facteur de correction K	68

B

Les mesures de débits hydrauliques

par T. DUPUIS

4 •	Les moyens de mesure	73
4.1	Le débitmètre massique à effet Coriolis	74
4.2	Le débitmètre massique thermique	78
4.3	Le débitmètre volumique électromagnétique	81
4.4	Les débitmètres volumiques à ultrasons	83
4.5	Les débitmètres volumiques à effet Vortex	90
4.6	Le débitmètre volumique à turbine	96
4.7	Les débitmètres volumétriques	98
4.8	Le débitmètre hybride à section variable	102
4.9	Les débitmètres déprimogènes	104
5 •	Annexes	139
5.1	Détail de fonctionnement du débitmètre de Coriolis	139
5.2	Détail de fonctionnement du débitmètre à effet Doppler	140
5.3	Calcul du coefficient de décharge C d'un diaphragme	142
5.4	Coefficients de décharge C d'un diaphragme	144
5.5	Coefficients de décharge C d'une tuyère	147

C

Les mesures de température

par T. DUPUIS

6 • Les moyens de mesurage	151
6.1 Le thermomètre à dilatation de liquide à lecture directe	154
6.2 Le thermomètre à dilatation de liquide à lecture indirecte	155
6.3 Le thermomètre à dilatation de gaz	155
6.4 Le thermomètre à dilatation de solide	155
6.5 Le capteur à résistance type Pt100	156
6.6 Le capteur à résistance CTN	166
6.7 Le thermocouple	167
6.8 Le capteur à contact	174
6.9 Le thermomètre optique à infrarouge	179
7 • Les méthodes de mesurage	186
7.1 Température dans une conduite	186
7.2 Température dans une gaine rectangulaire	186
7.3 Température dans une gaine circulaire	188
7.4 Température de l'air ambiant d'un local	188
7.5 Température ambiante dans un local	190
8 • Annexes	195
8.1 Relation température/résistance d'une résistance Pt100	195
8.2 Valeurs de l'émissivité ε de différents matériaux	198
8.3 Descriptions de deux méthodes mathématiques de calcul des températures moyennes de rayonnement	202

D

Les mesures d'hygrométrie

par T. DUPUIS

9 • Les moyens de mesurage	207
9.1 Le psychromètre	208
9.2 L'hygromètre à capteur capacitif	214
9.3 L'hygromètre à capteur résistif	216
9.4 Autres types d'hygromètres à variation d'impédance	217
9.5 Autres types d'hygromètres	217

10 • Les méthodes de mesurage	219
10.1 Hygrométrie de l'air ambiant	219
10.2 Hygrométrie dans une gaine rectangulaire ou circulaire	219
11 • Annexes	220
11.1 Les autres paramètres hygrométriques	220

E

Les mesures de pression

par T. DUPUIS

12 • Les moyens de mesurage	231
12.1 Les manomètres mécaniques	234
12.2 Les capteurs-transmetteurs	239
13 • Les méthodes de mesurage	246
13.1 Caractéristiques du capteur	246
13.2 Précautions d'emploi	248
14 • Annexes	251
14.1 Détail de fonctionnement d'un pont de Wheatstone	251
14.2 Équivalence des unités de pression	252

F

Les mesures de combustion

par T. DUPUIS

15 • Les moyens de mesurage	255
15.1 Les analyseurs chimiques	256
15.2 Les analyseurs à principe physique	258
15.3 Les opacimètres	259
15.4 Les thermomètres de fumée	262
15.5 Les dépressostats de conduit	262
16 • Les méthodes de mesurage	263
16.1 Les points de prélèvements	263
16.2 L'utilisation des cellules électrochimiques	265

17 • Annexes	266
17.1 Rappels élémentaires de combustion	266
17.2 Ordres de grandeur d'un bon réglage de combustion	269
17.3 Les unités	269
17.4 Les teneurs en O ₂	270

G

Les mesures acoustiques et vibratoires

par G. DELMAS

18 • Les moyens de mesurage	273
18.1 Le sonomètre	273
18.2 L'exposimètre	278
18.3 L'accéléromètre	279
19 • Les méthodes de mesurage	283
19.1 Mesures acoustiques dans l'environnement	285
19.2 Mesures acoustiques dans les locaux	298
19.3 Puissance acoustique des sources	300
19.4 Exposition sonore quotidienne	303
20 • Les différents types de mesures vibratoires	306
20.1 Mesure de la gêne vibratoire	306
20.2 Mesure des contraintes vibratoires sur les bâtiments	311
21 • Annexes	314

H

Rappels de métrologie

par T. DUPUIS

22 • Les incertitudes de mesures	327
22.1 Introduction	327
22.2 Quelle méthode choisir ?	328
22.3 Définitions fondamentales	328
22.4 Méthode d'évaluation de l'incertitude de mesurage	333

23 • Les erreurs de mesurage	346
23.1 Évaluation des erreurs de mesurage	346
23.2 L'intervalle de tolérance	347
24 • Annexes	351
24.1 Exemple de calcul d'incertitude d'un mesurage d'énergie thermique par débitmètre d'eau chaude	351
24.2 Exemple de calcul d'incertitude d'un mesurage d'énergie thermique par diaphragme vapeur	352
24.3 Incertitude de mesure dans un conduit aéraulique	355
24.4 Incertitude de mesure des compteurs thermiques (NF EN 1434)	361
Bibliographie	375
Coordonnées des entreprises ayant contribué aux ressources documentaires	381
Index	383

AVANT-PROPOS

« Ce n'est pas ce que l'on reçoit qui fait ce que nous sommes,
c'est ce que l'on donne aux autres. »

Jacques ATTALI, avec l'aimable autorisation de l'auteur

Lorsque j'ai commencé mes études techniques au début des années 1970, le premier ouvrage appliqué qu'il m'a été donné de lire est un traité pédagogique sur le chauffage et la climatisation. En deuxième page de couverture est inscrit (j'ai toujours ce « bréviaire ») une citation du philosophe Kuan-Tzu :

« Si tu donnes un poisson à un homme, il se nourrira une fois. Si tu lui apprends à pêcher, il se nourrira toute sa vie. »

C'est dans cet esprit que j'ai eu l'idée d'écrire cet ouvrage qui s'adresse aux différents acteurs du domaine du génie climatique.

En effet, il m'est souvent arrivé de constater que le manque de référentiel se faisait sentir parmi les différents intervenants pour l'application de la métrologie dans le domaine du génie climatique, et que les mêmes informations étaient nécessaires au quotidien.

Ce défaut d'information sur les méthodes de mesurage envisageables et sur les moyens disponibles selon la grandeur physique à évaluer m'a semblé être une voie à améliorer.

À toutes les étapes de la vie d'une installation, que ce soit à sa mise en service, lors de sa réception, lors de son commissionnement, lors du suivi de ses performances et de son exploitation, et même lors d'expertises s'il y a lieu, les méthodes de mesurage et les moyens associés sont rarement définis, voire même appréhendés.

Manipuler un appareil de mesure est rendu facile par son ergonomie et l'ingéniosité des constructeurs, mais savoir comment il fonctionne pour l'employer au mieux de ses capacités, et l'utiliser selon une méthode de mesure normalisée ou au minimum reconnue, permet de mieux apprécier le résultat.

Le partage de mes acquis complétés avec ceux de Guy pour la partie acoustique et vibrations, m'a semblé pertinent en les regroupant dans un ouvrage où les différentes références seraient aussi détaillées par domaine d'utilisation.

Les différents types de mesurages exposés, ainsi que les matériels associés, sont ceux d'usage courant. D'autres moyens sont sans doute disponibles, Guy et moi vous les exposerons lors d'édition(s) future(s) si vous nous faites part de votre intérêt pour ce domaine très vaste qu'est la métrologie dans le domaine du génie climatique qui nous concerne tous de plus en plus.

Thierry DUPUIS

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Nadine pour son soutien depuis le début de ce projet, et pour sa patience ensuite, ainsi que Julien et Jérémy pour leur compréhension.

À Cyril BARRE pour ses remarques (très) pertinentes et pour ses compétences avisées,

À David COHEN pour ses conseils très précieux dans le domaine de l'ingénierie de la mesure hydraulique.

Merci à Guy pour avoir accepté de participer à cette aventure.

Thierry DUPUIS

À mon entourage qui m'a permis de me consacrer à la rédaction d'une partie de cet ouvrage.

À Jean-Marc DAUTIN pour l'efficacité de sa relecture.

À Thierry, qui m'a proposé de rédiger la partie acoustique de cet ouvrage, ma première expérience d'auteur.

Guy DELMAS

Nos remerciements tout particuliers à Dominique MARCHIO pour sa relecture, pour ses conseils et pour sa préface qui nous honore.

Nos remerciements aux sociétés Kimo, Engineering Mesures, Testo, Ahlborn, TH Industrie, 01 dB-Metravib, Trox Technik, Krohne SAS, Swegon, Ultraflux, Endress & Hauser, Kobold Instrumentation, Lutz, Validyne, Vega et les Techniques de l'Ingénieur (T.I.) pour les ressources documentaires mises à notre disposition.

Thierry DUPUIS et Guy DELMAS

INTRODUCTION

Le domaine du génie climatique fait appel à différentes connaissances pour concevoir et réaliser les installations techniques. In fine, la qualité de cette réalisation devra être validée à l'aune de mesurages de paramètres physiques très divers.

De même, l'exploitation des installations nécessite périodiquement des vérifications de performances afin de confirmer le respect des engagements pris par les entreprises.

L'aspect réglementaire complète l'aspect contractuel dans tous les domaines du génie climatique. Les contraintes environnementales imposent des paramètres de fonctionnement très rigoureux et des rendements de génération en vue de limiter les consommations d'énergie. La dégradation de notre sphère vitale est accentuée par l'impact de chacune de nos faiblesses.

L'examen des performances d'une installation tout au long de son activité nécessite l'application de méthodes de mesurage bien définies, mais hélas souvent ignorées.

Il est vrai que la variété des grandeurs physiques à quantifier imposent la connaissance de méthodes métrologiques différentes et de moyens techniques adaptés.

L'objet de cet ouvrage est de permettre aux différents intervenants sur les installations de génie climatique, de disposer des moyens de mesurage et des méthodes appliquées dans les domaines de l'aéraulique, de l'hydraulique, de la thermique, de l'hygrométrie, de la pression, de la combustion, de l'acoustique et des vibrations.

Il a été mis en annexe de chaque partie des notions de physiques et différents rappels approfondis qui viennent compléter les différents aspects pratiques énoncés.

Ce recueil se termine par des rappels de métrologie décrivant les méthodes d'évaluation des incertitudes et des erreurs de mesurage, avec des exemples appliqués, nécessaires pour relativiser les résultats obtenus.

Chaque partie comporte une bibliographie qui permettra au lecteur de prendre connaissance notamment de l'intégralité des textes réglementaires et des normes de référence.

Cet ouvrage s'adresse plus particulièrement :

- aux entreprises du génie climatique ;
- aux bureaux d'études techniques « fluides » ;
- aux entreprises de mise au point et de comissionnement des installations ;
- aux bureaux de contrôle ;
- aux sociétés chargées de l'exploitation des installations ;

- aux Maîtres d’ouvrage ;
- aux experts dans le domaine du génie climatique ;
- aux étudiants de la filière.

Thierry DUPUIS

A

Les mesures
de débits aérauliques

1 • LES MOYENS DE MESURAGE

A

LES MESURES DE DÉBITS AÉRAULIQUES

Les mesures de débits d'air peuvent être réalisées de différentes manières selon les cas, soit par mesures intrusives directement dans la gaine, soit par mesures non-intrusives par l'extérieur de la gaine, soit au niveau de l'équipement terminal (diffuseurs, bouche, grille, etc.).

On privilégiera les mesures en gaines car l'exploration des champs de vitesse se fait indépendamment de l'environnement extérieur, ce qui élimine déjà une source de perturbation, donc d'erreur en moins.

Dans le cas des installations courantes de génie climatique, on retiendra que :

- le fluide est de l'air à température et pression voisines de celles de l'air ambiant ;
- l'air peut être considéré comme un gaz parfait à capacités thermiques constantes ;
- les débits étant parfois réduits, les nombres de Reynolds à considérer sont alors relativement faibles (de l'ordre de quelques milliers) ;
- le nombre de Mach est inférieur à 0,25.

On pourra trouver en annexes au présent chapitre la justification de certains principes retenus.

Le début de ce chapitre abordera donc les moyens dont disposent les techniciens pour procéder à ces mesures dans les réseaux, puis nous exposerons les appareils dits « noyés » dans les longueurs droites, et enfin nous détaillerons les moyens à mettre en œuvre pour les mesures à réaliser sur les terminaux.

1.1 Le tube de Pitot double

Très utilisé dans le domaine du génie climatique, le tube de Prandtl ou tube de « Pitot double », appelé plus couramment tube de « Pitot », permet de déterminer la vitesse d'un flux dans une veine d'air.

Ses principales qualités sont sa robustesse et sa plage de fonctionnement pouvant aller jusque 100 m/s. Par contre, il faut éviter de l'utiliser à moins de 1,5 m/s en limite basse.

Parfois réalisé en inconel, il peut supporter des températures jusqu'à 300 °C, pour être utilisé dans des conduits de cheminée de chaufferie ou d'installation de cogénération.

Un autre de ses avantages, mais qui peut devenir un inconvénient comme nous le verrons en détail ci-après, est qu'il est sensible à la direction du flux. Cette particularité permet de l'utiliser par exemple dans un plénum d'air reliant plusieurs équipements pour vérifier le sens de l'écoulement.