

TECHNOSUP

Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS

MESURE

Mesure physique et instrumentation

Analyse statistique et spectrale des mesures, capteurs

Dominique BARCHIESI

ellipses

2-530-114-1

2-530-114-1

TECHNOSUP

Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS

Préface

MESURE

Mesure physique et instrumentation

Analyse statistique et spectrale des mesures, capteurs

Dominique BARCHIESI
Professeur à l'Université de technologie
de Troyes



Table des matières

Préface	iii
Avant propos	ix
I La mesure, vocabulaire, notations et outils	1
Introduction à la mesure	1
Applications et caractéristiques de la mesure	3
Glossaire	4
Formulaire	6
II Grandeur	7
1 Différentes grandeurs	7
2 Dimensions	8
3 Équation aux dimensions, principe d'homogénéité	11
III Mesure	13
1 Définition	13
2 Propriétés de la mesure	14
3 Types de mesure	15
3.1 Mesure directe	15
3.2 Mesure indirecte	15
3.3 Mesures répétées ou multiples	16
4 Précision, répétabilité, reproductibilité d'une mesure	16
5 Unités de mesure	17
5.1 Unités de base du SI	18
5.2 Unités dérivées du SI	19
5.3 Unités hors du SI	25
6 Erreur de mesure	27
6.1 Définition	27
6.2 Causes d'erreurs	28

IV	Incertitudes de mesure	31
1	Erreur n'est pas incertitude	32
2	Incertitudes normalisées	32
2.1	Incertitudes-types...	33
2.2	Incertitude-type composée, propagation des incertitudes	33
2.3	Incertitude-type élargie	35
2.4	Écriture des résultats de mesure	35
3	Incertitudes-types, calcul et utilisation	36
3.1	Calculs d'incertitudes-types de type B	36
3.2	Calculs d'incertitudes-types de type A	39
3.3	Combinaison d'incertitudes : incertitude-type composée	43
3.4	Incertitude type élargie et intervalle de confiance	44
4	La distribution des mesures est-elle gaussienne?	46
4.1	Préparation des données	46
4.2	Test du χ^2	48
4.3	Test de Smirnov-Kolmogorov	50
4.4	Détermination de l'intervalle de confiance	51
4.5	Exemple d'exploitation statistique de mesures	52
4.6	Autre exemple, résumé de la procédure de test d'hypothèse	56
V	Analyse spectrale	57
1	Temps, fréquence	58
1.1	Période	58
1.2	Fréquence, pulsation	58
1.3	Phase, déphasage	59
2	Pourquoi l'analyse fréquentielle?	59
3	Spectre, série de Fourier	60
3.1	Spectre	60
3.2	Série de Fourier	61
3.3	Propriétés de la série de Fourier	63
4	Applications de l'analyse spectrale	65
4.1	Analyse de signaux simples	66
4.2	Signal modulé en amplitude	66
4.3	Acoustique	67
4.4	Mesure interférométrique	67

5	Systèmes linéaires : fonction de transfert	70
5.1	Système linéaire	70
5.2	Réponse impulsionnelle	71
5.3	Fonction de transfert	71
5.4	L'appareil de mesure est un filtre	72
5.5	Filtre électronique	73
6	Action d'un filtre sur un signal	74
VI Choix d'un appareil, méthodes de mesure		77
1	Analogique, numérique	77
2	Caractéristiques des instruments de mesure	78
3	Valeur efficace	80
4	Chaîne de mesure, bruit et échantillonnage	80
4.1	Bruit	82
4.2	Influence de l'échantillonnage : théorème de Shannon- Wittaker	82
5	Méthodes de mesure	83
5.1	Une mesure par comparaison : la stroboscopie . . .	84
5.2	Une mesure par compensation : pont de mesure . .	84
5.3	Une mesure différentielle : absorptance et concen- tration chimique	86
6	Synthèse : caractérisation d'une chaîne de mesure	87
VII Capteurs		93
1	Capteur passif, capteur actif	93
2	Mesure acoustique : microphone électroacoustique	94
2.1	Principe général du microphone électroacoustique	94
2.2	Théorie du microphone	94
2.3	Caractéristiques réelles d'un microphone	97
3	Mesure de champ magnétique : sonde à effet Hall	97
4	Mesure thermique : thermistance	98
5	Mesure photométrique et électronique	99
5.1	Semiconducteur, jonction	99
5.2	Application : redressement	103
5.3	Photodiode	104
VIII Exercices, aides et solutions		105
1	Énoncés	105

1.1	Grandeurs, dimensions	105
1.2	Mesure	107
1.3	Unités	108
1.4	Erreurs	110
1.5	Incertitudes, résultats de mesure	111
1.6	Analyse spectrale	116
1.7	L'appareil n'est pas parfait...	119
1.8	Choix d'un appareil	121
1.9	Méthodes de mesure	124
2	Aides des exercices	125
3	Solutions des exercices	132
	Épilogue	158
Annexes		158
1	Variable aléatoire, moyenne, écart-type	159
2	Quelle est la loi suivie par l'estimation du mesurande?	159
3	Intervalle de confiance	161
3.1	Définition	161
3.2	Degré de liberté	161
4	Test d'hypothèse : la répartition des mesures est-elle gaus- sienne?	162
4.1	Test du χ^2	162
4.2	Test de Smirnov-Kolmogorov	163
5	Test d'hypothèse : deux grandeurs mesurées sont-elles in- dépendantes?	164
6	Test d'hypothèse : la valeur de mesure est-elle aberrante?	164
7	Synoptique du calcul des incertitudes	165
8	Algorithme de l'exploitation statistique	165
9	Table : loi de Gauss, loi normale	167
10	Table : loi du χ^2	169
11	Table : loi de Smirnov-Kolmogorov	170
12	Table : loi de Student	174

La collection TECHNOSUP dirigée par Claude Chèze est une sélection d'ouvrages dans toutes les disciplines, pour les filières technologiques des enseignements supérieurs.

Niveau A **Approche** (éléments, résumés ou travaux dirigés) *Initiation, mise à niveau*

Niveau B **Bases** (cours avec exercices et problèmes résolus) *IUP - IUT - BTS*

Niveau C **Compléments** (approfondissement, spécialisation) *Écoles d'ingénieurs, Maîtrise*

L'ouvrage (niveau A.B) :

L'ouvrage est un guide pour découvrir que la mesure est fondamentale dans l'approche scientifique, mais qu'elle n'est pas aussi intuitive qu'on pourrait le croire. Le thème de la mesure est développé en introduisant les grandeurs mesurables, les systèmes d'unités, les méthodes de mesure et l'analyse statistique et spectrale des données. La démarche est basée sur la norme internationale qui régit la mesure physique et le calcul des incertitudes. Des compléments de statistique et le principe de quelques capteurs sont introduits à partir de modèles simples pour illustrer la démarche. Le cours et les exercices privilégient la découverte et l'appropriation de l'outil.

L'auteur :

Dominique Barchiesi est Professeur des Universités à l'Université de technologie de Troyes. Il effectue des recherches dans le domaine des nanotechnologies en modélisation électromagnétique. Il a déjà publié deux autres ouvrages chez le même éditeur.

Illustration de couverture : Dessin de Léonard de Vinci.



ISBN 2-7298-1426-4