

**Georges Asch**  
et collaborateurs

# Les capteurs en instrumentation industrielle

5<sup>e</sup> édition



**DUNOD**

# Table des matières

<b>1. Principes fondamentaux</b>	1
<i>par G. Asch et P. Desgoutte</i>	
1.1. Définitions et caractéristiques générales	1
1.2. Capteurs actifs	3
1.3. Capteurs passifs	6
1.4. Corps d'épreuve - Capteurs composites	8
1.5. Grandeurs d'influence	9
1.6. La chaîne de mesure	10
1.7. Capteurs intégrés	13
1.8. Capteurs intelligents	15
Bibliographie	16
<b>2. Caractéristiques métrologiques</b>	17
<i>par G. Asch et P. Desgoutte</i>	
2.1. Les erreurs de mesure	17
2.1.1. Erreurs systématiques	17
2.1.2. Erreurs accidentelles	19
2.1.3. Fidélité - Justesse - Précision	21
2.2. Etalonnage du capteur	23
2.2.1. Etalonnage simple	23
2.2.2. Etalonnage multiple	25
2.2.3. Validité d'un étalonnage : répétabilité et interchangeabilité	26
2.3. Limites d'utilisation du capteur	26
2.4. Sensibilité	28
2.4.1. Définition générale	28
2.4.2. Sensibilité en régime statique	29
2.4.3. Sensibilité en régime dynamique et réponse en fréquence	30
2.4.4. Linéarité	38
2.5. Rapidité - Temps de réponse	41
2.5.1. Définitions	41
2.5.2. Temps de réponse d'un système du premier ordre	43
2.5.3. Temps de réponse d'un système du second ordre	44
2.6. Finesse	46
Bibliographie	48
Annexe, Organisation de la Métrologie en France	49
<i>par R. Collay</i>	

<b>3. Conditionneurs de capteurs passifs</b>	53
<i>par G. Asch et P. Desgoutte</i>	
3.1. Caractéristiques générales des conditionneurs de capteurs passifs	53
3.2. Montage potentiométrique	57
3.2.1. Mesure des résistances	57
3.2.2. Mesure des impédances complexes	62
3.2.3. Inconvénient du montage potentiométrique	69
3.3. Les ponts	70
3.3.1. Mesure des résistances - Pont de Wheatstone	71
3.3.2. Mesure des impédances complexes	83
3.4. Les oscillateurs	90
3.4.1. Oscillateurs sinusoïdaux	91
3.4.2. Oscillateurs de relaxation	92
3.5. Forme et spectre de fréquence du signal à la sortie du conditionneur	93
3.5.1. Spectre de fréquence du signal	93
3.5.2. Signal proportionnel aux variations du mesurande	93
3.5.3. Signal modulé en amplitude par les variations du mesurande	94
3.5.4. Signal modulé en fréquence par les variations du mesurande	100
Bibliographie	102
<b>4. Conditionneurs du signal</b>	103
<i>par G. Asch et P. Desgoutte</i>	
4.1. Adaptation de la source du signal à la chaîne de mesure	103
4.2. Linéarisation	105
4.2.1. Linéarisation analogique à la source du signal	106
4.2.2. Linéarisation analogique en aval de la source du signal	109
4.2.3. Linéarisation numérique	116
4.3. Amplification du signal et réduction de la tension de mode commun	122
4.3.1. La tension de mode commun : définition et origines	122
4.3.2. Amplificateur différentiel et taux de réjection du mode commun	124
4.3.3. Amplificateur d'instrumentation	126
4.3.4. Amplificateur d'isolement	128
4.4. Détection de l'information	129
4.4.1. Tension de mesure modulée en amplitude avec conservation de la porteuse	130
4.4.2. Tension de mesure modulée en amplitude avec suppression de la porteuse	130
4.4.3. Tension de mesure modulée en fréquence	132
Bibliographie	136
<b>5. Capteurs optiques</b>	137
<i>par G. Asch et P. Desgoutte</i>	
5.1. La lumière - Propriétés fondamentales	137
5.2. Photométrie	139
5.2.1. Photométrie énergétique	139
5.2.2. Photométrie visuelle	140
5.3. La lumière, support d'information	142
5.4. Sources lumineuses	143

5.5. Caractéristiques métrologiques propres aux capteurs optiques	144
5.5.1. Courant d'obscurité	144
5.5.2. Sensibilité	145
5.5.3. Détektivité	147
5.6. Cellule photoconductrice	149
5.6.1. La photoconduction : étude physique	149
5.6.2. Facteur de gain	151
5.6.3. Matériaux utilisés	152
5.6.4. Caractéristiques des cellules photoconductrices	154
5.7. Photodiode	161
5.7.1. Constitution et principe du fonctionnement	161
5.7.2. Modes de fonctionnement	163
5.7.3. Courant d'obscurité	168
5.7.4. Sensibilité	169
5.7.5. Temps de réponse	170
5.7.6. Réponse en fréquence	171
5.7.7. Bruit de fond - Détektivité	171
5.7.8. Montages associés à la photodiode	173
5.8. Photodiode à avalanche	175
5.8.1. Principe physique - Gain	175
5.8.2. Courant d'obscurité	175
5.8.3. Sensibilité	176
5.8.4. Temps de réponse	176
5.8.5. Réponse en fréquence	176
5.8.6. Bruit de fond - Détektivité	177
5.8.7. Montages associés à la photodiode à avalanche	177
5.9. Phototransistor	178
5.9.1. Constitution et principe de fonctionnement	178
5.9.2. Courant d'obscurité	180
5.9.3. Sensibilité	180
5.9.4. Temps de réponse	182
5.9.5. Réponse en fréquence	183
5.9.6. Bruit de fond	183
5.9.7. Montages associés au phototransistor	184
5.9.8. Phototransistor à effet de champ, ou photofet	186
5.10. Capteurs photoémisifs	187
5.10.1. Mécanisme de la photoémission - Matériaux photoémisifs	187
5.10.2. Courant cathodique	188
5.10.3. Cellule à vide	191
5.10.4. Cellule à gaz	194
5.10.5. Photomultiplicateur	195
5.11. Détecteurs thermiques	206
5.11.1. Caractères généraux	206
5.11.2. Relation entre échauffement et flux incident	206
5.11.3. Bolomètre - Caractéristiques métrologiques	206
5.11.4. Thermocouples	210
5.11.5. Détecteurs pyroélectriques	211
5.11.6. Cellule de Golay	215
5.12. Capteurs d'images	216
5.12.1. Principes généraux	216
5.12.2. Types principaux de capteurs d'images	217
5.12.3. Caractéristiques métrologiques	223
5.13. Fibres optiques	

5.13.1. Constitution de la fibre optique et propriétés générales	224
5.13.2. Applications	226
Bibliographie	231
<b>6. Capteurs de température</b>	<b>233</b>
<i>par G. Asch et P. Desgoutte</i>	
6.1. Les échelles de température	234
6.1.1. Echelles thermodynamiques ou absolues	234
6.1.2. Echelles dérivées des échelles thermodynamiques	234
6.1.3. Echelle internationale de température (E.I.T.)	236
6.2. Température mesurée et température à mesurer	237
6.2.1. Calcul de la réponse du capteur	239
6.2.2. Mesure de la température à l'intérieur d'un solide	243
6.2.3. Mesure de la température de fluides	244
6.3. Thermométrie par résistance	250
6.3.1. Sensibilité thermique	250
6.3.2. Linéarisation	251
6.3.3. Méthodes de mesure	256
6.3.4. Influence du courant de mesure	257
6.3.5. Résistances métalliques	259
6.3.6. Thermistances	267
6.3.7. Résistance de silicium	270
6.4. Thermométrie par thermocouple	271
6.4.1. Caractères généraux - Sensibilité thermique	271
6.4.2. Effets thermoélectriques	274
6.4.3. Principaux types de thermocouples et caractéristiques d'emploi	278
6.4.4. Mise en œuvre et dispositif de mesure	279
6.5. Thermométrie par diodes et transistors	290
6.5.1. Caractères généraux - Sensibilité thermique	290
6.5.2. Relation tension-température	291
6.5.3. Capteurs de température intégrés	294
6.6. Thermométrie par le bruit de fond	298
6.6.1. Principe de la méthode	298
6.6.2. Méthodes de mesure	299
6.7. Thermométrie par quartz	300
6.7.1. Résonance électromécanique du quartz	300
6.7.2. Oscillateur à quartz	304
6.6.3. Sensibilité thermique	305
6.7.4. Réalisation du thermomètre et méthode de mesure	306
6.8. Mesure de température sur des corps en mouvement	307
6.9. Pyrométrie optique	308
6.9.1. Principes physiques	308
6.9.2. Application à la mesure des températures	311
Bibliographie	314
Annexe : Sonde de platine	315
Annexe : Thermocouples	316
<b>7. Capteurs de position et déplacement</b>	<b>319</b>
<i>par G. Asch et P. Desgoutte</i>	
7.1. Potentiomètre résistif	320
7.1.1. Réalisation du potentiomètre	320

7.1.2. Caractéristiques métrologiques	322
7.1.3. Potentiomètre sans curseur mécanique	326
7.1.4. Influence des divers éléments du montage de mesure	328
7.1.5. Montages de mesure	333
7.2. Capteurs inductifs	333
7.2.1. Principes et propriétés générales	333
7.2.2. Inductances variables	334
7.2.3. Transformateur différentiel	342
7.2.4. Microsyn	346
7.2.5. Potentiomètre inductif	347
7.2.6. Synchrodétecteur	348
7.2.7. Resolver	349
7.2.8. Inductosyn	352
7.3. Capteurs capacitifs	356
7.3.1. Principe et caractéristiques générales	356
7.3.2. Condensateur à surface variable	357
7.3.3. Condensateur à écartement variable	358
7.3.4. Méthodes de mesure des variations de capacité	360
7.4. Capteurs digitaux	364
7.4.1. Codeurs absolus	366
7.4.2. Générateur incrémental optique (G.I.O.)	368
7.5. Capteurs à propagation d'ondes élastiques	370
7.5.1. Principes de mesure	370
7.5.2. Types de réalisation	372
7.6. Capteurs de proximité	376
7.6.1. Capteur inductif à réluctance variable	376
7.6.2. Capteur inductif à courants de Foucault	378
7.6.3. Capteur à effet Hall	381
7.6.4. Capteur magnétorésistif	386
7.6.5. Capteur capacitif de proximité	390
7.7. Capteurs optiques de position	391
7.7.1. Cellule à quadrants	392
7.7.2. Photodiode à effet latéral	393
Bibliographie	394a
<b>8. Capteurs de déformation</b>	<b>395</b>
<i>par G. Asch, P. Desgoutte et A. Mazeran</i>	
8.1. Définition des grandeurs mécaniques utiles	395
8.2. Principes généraux	396
8.3. Jauges résistives métalliques	398
8.3.1. Effet piézorésistif des métaux	398
8.3.2. Matériaux et réalisations	398
8.3.3. Caractéristiques principales des jauges métalliques	399
8.4. Sensibilité transversale	400
8.5. Influence de la température sur la résistance d'une jauge fixée	401
8.5.1. Calcul du coefficient de température de la résistance	401
8.5.2. Déformation apparente	403
8.5.3. Jauges autocompensées en température	403
8.6. Jauges résistives semi-conductrices ou piézorésistances	403
8.6.1. Effet piézorésistif des semi-conducteurs	403
8.6.2. Constitution des jauges semi-conductrices	405
8.6.3. Caractéristiques principales des jauges semi-conductrices	406

8.7. Fonctionnement dynamique des jauges	410
8.7.1. Fréquence maximale d'utilisation	410
8.7.2. Limite de fatigue	410
8.7.3. Indicateurs de fatigue	411
8.8. Rosettes	412
8.9. Méthodes de mesure	413
8.10. Extensomètre à corde vibrante	422
8.11. Extensomètre pour hautes températures	424
8.11.1. Jauges résistives soudables	424
8.11.2. Extensomètre capacitif	425
Bibliographie	426
<b>9. Capteurs tachymétriques</b>	427
<i>par G. Asch et P. Desgoutte</i>	
9.1. Tachymètres électromagnétiques de vitesse angulaire	428
9.1.1. Génératrice tachymétrique à courant continu	428
9.1.2. Génératrices tachymétriques à courant alternatif	434
9.2. Tachymètres électromagnétiques de vitesse linéaire	437
9.3. Tachymètres de vitesse angulaire à impulsions	438
9.3.1. Capteur à réluctance variable	439
9.3.2. Capteur à courants de Foucault	440
9.3.3. Tachymètre optique	441
9.4. Gyromètres	441
9.4.1. Gyromètre à gyroscope	442
9.4.2. Gyromètres optiques	443
Bibliographie	444
<b>10. Capteurs de force, pesage, couple</b>	445
<i>par P. Desgoutte, P. Pairet et J.-C. Prigent</i>	
10.1. Capteurs piézoélectriques	446
10.1.1. La piézoélectricité	446
10.1.2. Matériaux piézoélectriques	454
10.1.3. Constitution des capteurs	457
10.1.4. Caractéristiques métrologiques	461
10.1.5. Montages de mesure associés aux capteurs piézoélectriques	462
10.2. Capteurs à magnétostriction	468
10.2.1. Mécanisme élémentaire de l'aimantation	468
10.2.2. Capteur à variation de perméabilité	470
10.2.3. Capteur à variation d'induction rémanente	472
10.2.4. Caractéristiques métrologiques	473
10.3. Capteurs à jauges d'extensométrie	473
10.3.1. Caractéristiques mécaniques générales	473
10.3.2. Construction des capteurs	476
10.3.3. Caractéristiques métrologiques	485
10.3.4. Réponse en fréquence	488
10.4. Capteurs de force par mesure de déplacement	489
10.5. Capteur de couple	491
10.5.1. Liaisons électriques à un capteur mobile	491
10.5.2. Mesure de couple par effet mécanoélectrique	493
10.5.3. Mesure de couple par déformation d'un corps d'épreuve	494

10.6. Capteur tactile : peau artificielle	497
Bibliographie	498
<b>11. Capteurs d'accélération, vibration, choc</b>	<b>499</b>
<i>par P. André, J. Beaufront, P. Desgoutte et C. Jouvenot</i>	
11.1. Considérations générales	499
11.1.1. Les différentes gammes d'accélération	500
11.1.2. Mouvements vibratoires : choix du mesurande	501
11.1.3. Principe des capteurs sismiques	501
11.2. Accéléromètres piézoélectriques et piézorésistifs : caractéristiques communes	506
11.2.1. Rapidité	506
11.2.2. Influence de la liaison mécanique entre accéléromètre et structure	510
11.2.3. Finesse	512
11.2.4. Sensibilité transversale	514
11.2.5. Précautions particulières	515
11.2.6. Etalonnage	515
11.3. Accéléromètres piézoélectriques	518
11.3.1. Principe de fonctionnement	518
11.3.2. Caractéristiques métrologiques	520
11.3.3. Grandeurs d'influence	522
11.4. Accéléromètres piézorésistifs	524
11.4.1. Principe général	524
11.4.2. Caractéristiques métrologiques	524
11.4.3. Réalisations	527
11.4.4. Matériel associé	530
11.4.5. Comparaison avec les autres types d'accéléromètres	534
11.5. Accéléromètres utilisant une mesure de déplacement	535
11.5.1. Amortissement	535
11.5.2. Ressort de rappel	537
11.5.3. Accéléromètre à potentiomètre	538
11.5.4. Accéléromètre, capacitif	539
11.6. Accéléromètres asservis	540
11.6.1. Accéléromètre asservi à équilibre de couple	540
11.6.2. Accéléromètre asservi à équilibre de force	543
Bibliographie	545
<b>12. Capteurs de vitesse, débit, niveau de fluides</b>	<b>547</b>
<i>par G. Asch, G. Charnay et J.-P. Schon</i>	
12.1. Notions élémentaires de mécanique des fluides	547
12.1.1. Caractéristiques d'un écoulement	547
12.1.2. Equations de la mécanique des fluides	550
12.2. Vitesse des fluides : capteurs et méthodes de mesure	553
12.2.1. Anémomètre à fil ou film chaud	553
12.2.2. Anémomètre ionique	560
12.2.3. Anémomètres à coupelle et à hélice	561
12.2.4. Méthodes de mesure de la vitesse par capteurs non spécifiques	564
12.3. Débitmétrie	567
12.3.1. Débitmètre électromagnétique	567
12.3.2. Débitmètres mécaniques avec traduction électrique	569
12.3.3. Débitmètres fluidiques avec traduction électrique	573
12.3.4. Débitmètres à organe déprimogène	574

12.3.5. Débitmètres ultrasoniques	575
12.3.6. Débitmétrie par traceurs radioactifs	579
12.3.7. Débitmètre massique thermique	579
12.3.8. Débitmètre massique à force de Coriolis	581
12.4. Mesure et détection de niveau	582
12.4.1. Méthodes hydrostatiques	582
12.4.2. Méthodes électriques	583
12.4.3. Méthodes basées sur l'utilisation de rayonnements	584
Bibliographie	586
<b>13. Capteurs de pression de fluides</b>	587
<i>par U. Zeltstein</i>	
13.1. Généralités	588
13.1.1. La pression, grandeur physique	588
13.1.2. Unités	588
13.2. Principes de la mesure	590
13.2.1. Fluide immobile	590
13.2.2. Fluide en mouvement	594
13.2.3. Mesures multiples	595
13.3. Critères d'utilisation et caractéristiques métrologiques	596
13.3.1. Domaine d'emploi	596
13.3.2. Grandeurs d'influence	597
13.3.3. Durée de vie	599
13.4. Structures mécaniques	599
13.5. Procédés de conversion	602
13.5.1. Conversion par variation de résistance	602
13.5.2. Conversion par variation de capacité	609
13.5.3. Conversion par variation d'inductance et de mutuelle inductance	614
13.5.4. Conversion par effet piézoélectrique	616
13.5.5. Conversion par oscillateurs électromécaniques	619
13.5.6. Autres procédés de conversion	624
13.6. Systèmes asservis à équilibre de force	625
13.7. Etalonnage	626
Bibliographie	627
<b>14. Capteurs de mesure de vide</b>	629
<i>par A. Piquet</i>	
14.1. Rappel sur les propriétés physiques des gaz	629
14.1.1. Pression d'un gaz	630
14.1.2. Libre parcours moyen	631
14.1.3. Phénomène de sorption	632
14.2. Différents domaines du vide - Types de jauges	633
14.3. Jauges à déformation	634
14.3.1. Capteurs à tube de Bourdon	634
14.3.2. Capteurs à membrane	636
14.4. Jauges à fil chaud	639
14.4.1. Transfert thermique dans un gaz	639
14.4.2. Principe des jauges à fil chaud	640
14.4.3. Jauge de Pirani	641
14.4.4. Jauge à thermocouple	644
14.5. Jauges à ionisation	646
14.5.1. Ionisation du gaz	646

14.5.2. Jauge à cathode froide : jauge de Penning	648
14.5.3. Jauges à cathode chaude : triode normale et triode Bayard-Alpert	650
14.5.4. Jauge à ionisation par source radioactive	654
14.6. Appareils pour l'étalonnage des jauges à vide	655
Bibliographie	657
<b>15. Capteurs acoustiques</b>	<b>659</b>
<i>par M. Sunyach</i>	
15.1. Choix des grandeurs à mesurer	659
15.1.1. Méthodes d'étude suivant les différents types de champ	659
15.1.2. Etude d'une onde progressive plane	660
15.1.3. Etude d'une onde plane quelconque	660
15.1.4. Approche du cas tridimensionnel	661
15.1.5. Conclusion sur les grandeurs à mesurer	662
15.2. Généralités sur les microphones	662
15.2.1. Principe des microphones	662
15.2.2. Influence des phénomènes de diffraction	663
15.3. Principaux types de microphones	665
15.3.1. Classification des microphones	665
15.3.2. Analogies électromécano-acoustiques	666
15.3.3. Microphones "à pression"	668
15.3.4. Microphones "à gradient de pression"	669
15.3.5. Microphones mixtes "à pression" et "gradient de pression" combinés	671
15.3.6. Principaux modes de construction des microphones suivant le type de directivité désiré	672
15.4. Microphones à condensateur	672
15.4.1. Principe et classification des microphones à condensateur	672
15.4.2. Microphones d'instrumentation à polarisation externe	673
15.4.3. Microphones à électret	677
15.5. Microphones électrodynamiques	684
15.5.1. Principe	684
15.5.2. Microphone électrodynamique à bobine mobile du type "à pression"	685
15.5.3. Microphone électrodynamique à bobine mobile du type "à pression" et "à gradient de pression" combinés	687
15.6. Intensimétrie	689
15.6.1. Principe de la méthode de mesure de l'intensité	689
15.6.2. Précision des mesures d'intensité	689
15.6.3. Emploi de la sonde d'intensité	691
15.6.4. Réalisations d'intensimètres	692
15.6.5. Mesure directe du vecteur intensité	693
Bibliographie	693
<b>16. Détecteurs de rayonnements nucléaires</b>	<b>695</b>
<i>par G. Asch et P. Desgoutte</i>	
16.1. Radioactivité - Notions élémentaires	695
16.1.1. Définitions	695
16.1.2. Radiations nucléaires	698
16.1.3. Critères de choix d'une source radioactive	706
16.2. Détecteurs à ionisation dans les gaz	707
16.2.1. Principes généraux	707
16.2.2. Chambre d'ionisation	709

16.2.3. Compteur proportionnel	710
16.2.4. Compteur Geiger-Muller (G.M.)	711
16.3. Détecteurs à scintillation	713
16.4. Détecteurs semi-conducteurs	715
Bibliographie	717
Annexe : Abaque pour la détermination des paramètres des détecteurs au silicium	718
<b>17. Capteurs d'humidité</b>	719
<i>par B. Créton et J. Méricoux</i>	
17.1. Principales définitions relatives à l'air humide	720
17.2. Les hygromètres - Aperçu général	722
17.3. Hygromètre à condensation	722
17.3.1. Principe de la mesure et constitution de l'hygromètre	722
17.3.2. Facteurs d'influence	723
17.3.3. Caractéristiques métrologiques	725
17.4. Hygromètre à sorption	725
17.4.1. Principe de la mesure	725
17.4.2. Réalisation et fonctionnement d'une sonde à sorption au chlorure de lithium	727
17.4.3. Facteurs d'influence	729
17.4.4. Caractéristiques métrologiques	729
17.5. Hygromètres à variation d'impédance	730
17.5.1. Hygromètre résistif	730
17.5.2. Hygromètre capacitif à diélectrique polymère	732
17.5.3. Hygromètre capacitif à diélectrique en oxyde d'aluminium	733
17.6. Hygromètre électrolytique	735
17.6.1. Principe et réalisation	735
17.6.2. Caractéristiques métrologiques	736
17.7. Psychromètre	737
17.7.1. Principe de mesure - Equation du psychromètre	737
17.7.2. Réalisation d'un psychromètre à aspiration électrique	739
17.7.3. Caractéristiques métrologiques	740
17.8. Etalonnage	741
17.8.1. La méthode de référence : le banc gravimétrique	741
17.8.2. Méthode des solutions salines saturées	741
17.9. Hygrométrie des solides par G. Asch	743
17.9.1. Mesure diélectrique	743
17.9.2. Mesure optique	744
17.9.3. Résonance magnétique nucléaire (RMN)	745
Bibliographie	746
Annexe : Pression de vapeur saturante de l'eau	746
Annexe : Pression de vapeur saturante au-dessus d'une surface plane de glace	746
<b>18. Capteurs électrochimiques</b>	749
<i>par P. Livrozet et J. Tacussel</i>	
18.1. Classification des capteurs électrochimiques	749
18.2. Capteurs potentiométriques	751
18.2.1. Potentiomètre - Principes généraux	751
18.2.2. Electrodes pour la mesure du potentiel d'oxydo-réduction	757

18.2.3. Electrodes de verre pour la mesure du pH	758
18.2.4. Electrodes spécifiques	763
18.2.5. ISFET par N. Jaffrezic	770
<b>18.3. Capteurs ampérométriques</b>	<b>773</b>
18.3.1. Principe de mesure	773
18.3.2. Capteurs redox	774
18.3.3. Electrode à gaz	774
18.3.4. Electrodes enzymatiques	774
<b>18.4. Capteurs conductimétriques</b>	<b>775</b>
18.4.1. Mesure de la conductance des électrolytes	775
18.4.2. Différents types de capteurs conductimétriques	775
<b>Bibliographie</b>	<b>778</b>
<b>19. Capteurs de composition gazeuse</b>	<b>779</b>
<i>par J. Fouletier</i>	
<b>19.1. Capteurs à électrolyte solide</b>	<b>780</b>
19.1.1. Capteurs potentiométriques	780
19.1.2. Capteurs ampérométriques	789
<b>19.2. Capteurs à variation d'impédance</b>	<b>791</b>
19.2.1. Mesure de la conductivité massique	791
19.2.2. Mesure de la conductivité superficielle	791
19.2.3. Mesure de la capacité électrique	792
<b>19.3. Capteur à quartz piézoélectrique</b>	<b>793</b>
<b>19.4. Capteurs catalytiques</b>	<b>795</b>
<b>19.5. Catharomètres</b>	<b>795</b>
<b>19.6. Capteurs paramagnétiques</b>	<b>797</b>
19.6.1. Principes physiques	797
19.6.2. Différentes réalisations	797
<b>19.7. Analyseurs optiques</b>	<b>800</b>
19.7.1. Principes physiques	800
19.7.2. Principales réalisations	801
19.7.3. Applications	803
<b>19.8. GAZ-FET</b>	<b>804</b>
<b>19.9. Réseaux des capteurs</b>	<b>804</b>
<b>19.10. Conclusions</b>	<b>805</b>
19.10.1. Synthèses	805
19.10.2. Perspectives	807
<b>Bibliographie</b>	<b>807</b>
<b>20. Biocapteurs</b>	<b>809</b>
<i>par L. Blum</i>	
<b>20.1. Les biorécepteurs</b>	<b>810</b>
20.1.1. Structures protéiques	810
20.1.2. Cellules entières	812
20.1.3. Immobilisation du matériel biologique	813
<b>20.2. Biocapteurs électrochimiques</b>	<b>814</b>
20.2.1. Electrodes à enzyme(s)	814
20.2.2. Transistors à effet de champ enzymatiques (ENFET)	817
<b>20.3. Biocapteurs à quartz piézoélectrique</b>	<b>817</b>

