

1	Introduction	11
1.1	Généralités	11
1.2	Quelques exemples d'application	11
1.2.1	Le conditionnement de l'air	11
1.2.2	Les applications industrielles	12
1.2.3	Le comportement des échangeurs thermiques	13
1.3	La situation actuelle de l'hygrométrie	14
1.3.1	Amélioration des capteurs de mesure	14
1.3.2	Amélioration des moyens d'étalonnage	14
2	Notions de base sur l'air humide	15
2.1	Introduction	15
2.2	Définitions et grandeurs de base	15
2.2.1	Air sec	16
2.2.1	Air humide	16
2.2.1	Air saturé	16
2.2.4	Fraction molaire de la vapeur d'eau d'un échantillon d'air humide (x_v)	16
2.2.5	Rapport de mélange (r)	17
2.2.6	Pression partielle de vapeur d'eau (e')	17
2.2.7	Humidité spécifique (q)	17
2.2.8	Humidité absolue (ρ_v)	18
2.2.9	Pression de vapeur saturante en phase pure (e_w, e_i)	18
2.2.10	Pression de vapeur saturante dans l'air humide ; facteur d'augmentation (f_w, f_i)	22
2.2.11	Température de rosée (T_d) ou (θ_d) et température de gelée (T_f) ou (θ_f)	23
2.2.12	Humidité relative de l'air humide (U, hr ou rh)	23
2.2.13	Température humide (T_w) ou (θ_w)	25
2.2.14	Masse volumique de l'air humide (ρ_{ah})	25
2.2.15	Volume spécifique de l'air humide (V_s)	25
2.2.16	Enthalpie spécifique (i)	26
2.3	Relations entre les grandeurs de base de l'air humide	27
2.3.1	Introduction	27
2.3.2	Relation entre le rapport de mélange et la température de rosée	27
2.3.3	Relation entre l'humidité relative, la température de rosée et la température sèche	28
2.3.4	Relation entre la température humide et la température de rosée	29

2.3.5	Relation entre le volume spécifique et le rapport de mélange	29
2.3.6	Relation entre la masse volumique et le volume spécifique	29
2.4	Représentation de ces relations sur un diagramme	30
2.5	Coefficient de sensibilité	31
2.6	Exemples de détermination de T_d et U_w avec différents types d'hygromètres	33
3	Les différents types d'hygromètres	35
3.1	Présentation générale	35
3.2	Hygromètre à condensation	36
3.2.1	Hygromètre à condensat permanent	36
3.2.2	Hygromètres à condensation fonctionnant suivant d'autres principes	45
3.3	Hygromètre à variation d'impédance pour la mesure de l'humidité relative	47
3.3.1	Principe de la mesure	47
3.3.2	Hygromètre "résistif"	47
3.3.3	Hygromètre "capacitif"	50
3.3.4	Hygromètre à sonde interchangeable	53
3.3.5	Utilisation à des températures supérieures à 100 °C	53
3.3.6	Utilisation d'un diagramme des EMG	54
3.3.7	Quelques modèles d'hygromètres à variation d'impédance	55
3.4	Hygromètre à variation d'impédance pour la mesure de la température de rosée	57
3.4.1	Hygromètre à oxyde d'aluminium (Al_2O_3)	57
3.4.2	Hygromètre à oxyde de silicium	60
3.4.3	Quelques modèles d'hygromètres à oxyde métallique	60
3.5	Psychromètre	61
3.5.1	Principe de la mesure	61
3.5.2	Définition de la température humide	61
3.5.3	Équation du psychromètre idéal	61
3.5.4	Influence de la pression atmosphérique	62
3.5.5	Les psychromètres à aspiration	63
3.5.6	Domaine d'utilisation, EMG et temps de réponse	65
3.5.7	Avantages et inconvénients	66
3.5.8	Précautions particulières	67
3.5.9	Quelques modèles de psychromètres	68

3.6	Hygromètre mécanique	69
3.6.1	Principe de fonctionnement	69
3.6.2	Domaine d'utilisation, EMG et temps de réponse	70
3.6.3	Avantages, inconvénients, précautions d'emploi	71
3.6.4	Procédure de régénération d'un hygromètre mécanique	71
3.6.5	Étalonnage	73
3.6.6	Quelques modèles d'hygromètres mécaniques	73
3.7	Hygromètre électrolytique	74
3.7.1	Principe de fonctionnement	74
3.7.2	Domaine de mesure, EMG et temps de réponse	75
3.7.3	Précautions d'emploi	75
3.8	Autres hygromètres	75
3.8.1	Hygromètre à sorption	75
3.8.2	Hygromètre piézo-électrique	78
3.8.3	Hygromètre à absorption infrarouge	79
4	Mise en œuvre des hygromètres	80
4.1	Mesure dans un volume	80
4.1.1	Choix de l'emplacement	80
4.1.2	Protection des capteurs	81
4.1.3	Influence de l'opérateur et de l'environnement	81
4.1.4	Utilisation du capteur dans des conditions particulières	81
4.2	Mesure sur un process industriel	82
4.2.1	Montages des capteurs	82
4.2.2	Exceptions	83
4.3	Mesure par prélèvement	84
4.3.1	Principales difficultés	84
4.3.2	Précautions de mise en œuvre	86
4.4	Choix du matériel	87
4.4.1	Filtre coalesceur	87
4.4.2	Filtre	87
4.4.3	Tuyauterie de prélèvement	87
5	Étalonnage des hygromètres	89
5.1	Introduction	89
5.1.1	Les raisons de l'étalonnage	89
5.1.2	Les principaux moyens d'étalonnage	90

5.2	La méthode de référence primaire : le banc gravimétrique	90
5.3	Les installations à générateurs d'air humide	93
5.3.1	Le générateur à recirculation : la méthode de référence française du CETIAT, laboratoire associé du BNM	93
5.3.2	Générateurs à recirculation partielle	100
5.3.3	Le générateur à mélange	100
5.3.4	Le générateur à mélange pour les très basses températures de rosée	103
5.3.5	Le générateur à deux pressions	107
5.3.6	Le générateur à deux températures à circuit ouvert	110
5.3.7	Inter comparaison des générateurs d'air humide des laboratoires nationaux européens	111
5.4	Les solutions salines	114
5.4.1	Les solutions salines saturées	114
5.4.2	Les solutions salines diluées	120
6	Utilisation d'un hygromètre	123
6.1	Étalonnage des hygromètres	125
6.2	Évaluation de l'incertitude de mesure	125
6.2.1	Incertitude de mesure de l'hygromètre	126
6.2.2	Évaluation de l'incertitude sur l'humidité relative calculée	126
6.2.3	Exploitation statistique des résultats d'étalonnage d'hygromètres à condensation et à variation d'impédance effectués au CETIAT entre 1986 et 1997.	129
6.3	La chaîne nationale d'étalonnage BNM/COFRAC en hygrométrie et ses possibilités	131
6.3.1	Structure d'une chaîne d'étalonnage	131
6.3.2	Cas particulier de la chaîne hygrométrie	132
6.3.3	Laboratoires de la chaîne hygrométrie du BNM/COFRAC	135
7	Normalisation	136
8	Principaux constructeurs d'hygromètres distribués en France	137
9	Notations et symboles	138
10	Références bibliographiques	139

ANNEXES

141

Annexe 1 : composition de l'air sec

142

Annexe 2 : pression de vapeur saturante en phase pure au-dessus d'une surface d'eau d'après A. Wexler (1976) EIPT-68 corrigée par D. Sonntag EIT-90

143

Annexe 3 : pression de vapeur saturante en phase pure au-dessus d'une surface de glace d'après A. Wexler (1976) EIPT-68 corrigée par D. Sonntag EIT-90

150

Annexe 4 : température de gelée en fonction de la température de rosée

154

Annexe 5 : valeurs du facteur f_w pour différentes pressions et températures

155

Annexe 6 : valeurs du facteur f_i pour différentes pressions et températures

156

Annexe 7 : détermination des paramètres hygrométriques en fonction de la nature des paramètres mesurés

157

Annexe 8 : courbes des valeurs de l'humidité relative au-dessus de solutions salines saturées en fonction de la température

159

Annexe 9 : valeurs du point fixe d'humidité relative pour différentes solutions salines saturées

160