

AVANT PROPOS

La mesure de l'humidité dans les gaz peut être effectuée dans des conditions très variées, et pour des applications très différentes.

Cette grandeur a la réputation justifiée d'être délicate à mesurer, mais avec un capteur convenablement choisi, étalonné et utilisé correctement, il est possible d'obtenir des résultats fiables.

Nous avons voulu guider l'utilisateur vers la solution de son problème de mesure de l'humidité dans un gaz, en décrivant les différents types d'hygromètres disponibles sur le marché, avec leurs particularités d'emploi, et en fournissant les notions de base sur l'air humide, nécessaires pour une bonne interprétation des valeurs obtenues.

La rédaction de cet ouvrage est l'aboutissement de trente années de travaux, au cours desquelles les installations d'étalonnage du CETIAT¹, référence française de la chaîne d'étalonnage en hygrométrie du LNE² ont été progressivement mises au point, puis utilisées pour étalonner des capteurs d'humidité sous accréditation COFRAC³.

Cet ouvrage a été publié en 2000 dans les monographies du BNM⁴ sous le numéro 18 et sa publication est reprise en 2010 par le Collège Français de Métrologie (CFM).

Nous en profitons donc pour effectuer une mise à jour de ce document et remercions l'équipe du LNE-DRST (anciennement le BNM) qui nous a aidés et encouragés tout au long de cette période passionnante.

Les auteurs

Bertrand BLANQUART, Bernard CRÉTINON, Jacques MÉRIGOUX

¹ Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques

² Laboratoire national de métrologie et d'essais

³ Comité Français d'Accréditation

⁴ Bureau National de Métrologie

SOMMAIRE

1	INTRODUCTION	1
1.1	Généralités	1
1.2	Effet de l'humidité de l'air et quelques exemples d'application	1
1.2.1	Effet de l'humidité sur l'activité et le confort des humains	1
1.2.2	Le conditionnement d'air	2
1.2.3	L'industrie alimentaire	2
1.2.4	Effet de l'humidité sur les matériaux métalliques	3
1.2.5	Effet de l'humidité sur le bois	4
1.2.6	Effet de l'humidité sur les papiers et cartons	4
1.2.7	Effet de l'humidité sur les textiles	4
1.2.8	Effet de l'humidité sur les caoutchoucs	4
1.2.9	Effet de l'humidité sur le verre	5
1.2.10	Effet de l'humidité sur les revêtements organiques	5
1.2.11	Le séchage industriel	5
1.2.12	La détection des traces de vapeur d'eau dans les gaz	5
1.2.13	Le comportement des échangeurs thermiques	5
1.3	La situation actuelle de l'hygrométrie	6
2	NOTIONS DE BASE DE L'AIR HUMIDE	7
2.1	Introduction	7
2.2	Définitions et grandeurs de base	7
2.2.1	Composition de l'atmosphère type	7
2.2.2	Air sec	7
2.2.3	Air humide	8
2.2.4	Air saturé	8
2.2.5	Fraction molaire de la vapeur d'eau d'un échantillon d'air humide (x_v)	8
2.2.6	Rapport de mélange (r)	8
2.2.7	Pression partielle de vapeur d'eau (e')	8
2.2.8	Humidité spécifique (q)	1
2.2.9	Humidité absolue (ρ_v)	1
2.2.10	Pression de vapeur saturante en phase pure (e_w, e_i)	1
2.2.11	Pression de vapeur saturante dans l'air humide et facteur d'augmentation (f_w, f_i)	4
2.2.12	Température de rosée (T_d ou θ_d) et température de gelée (T_f ou θ_f)	5
2.2.13	Humidité relative de l'air humide (U, HR ou RH)	5
2.2.14	Température humide (T_w ou θ_w)	7
2.2.15	Masse volumique de l'air humide (ρ_{ah})	7
2.2.16	Volume spécifique de l'air humide (V_s)	7
2.2.17	Enthalpie	7
2.3	Relations entre les grandeurs de base de l'air humide	8
2.3.1	Introduction	8
2.3.2	Relation entre le rapport de mélange et la température de rosée	9
2.3.3	Relation entre l'humidité relative, la température de rosée et la température	10
2.3.4	Relation entre la température humide et la température de rosée	10
2.3.5	Relation entre le volume spécifique et le rapport de mélange	10
2.3.6	Relation entre la masse volumique et le volume spécifique	10
2.4	Représentation des paramètres de l'air humide sur un diagramme	11
2.4.1	Température de rosée à partir de la température et de l'humidité relative	11
2.4.2	Humidité relative à partir de la température et de la température de rosée	12
2.4.3	Température de rosée à partir de la température et de la température humide	13
3	LES DIFFÉRENTS TYPES D'HYGROMÈTRES	15

3.1	Présentation générale	15
3.2	Hygromètre à condensation	15
3.2.1	Principe de mesure	15
3.2.2	Fonctionnement de l'hygromètre	15
3.2.3	Principales caractéristiques	17
3.2.4	Domaine d'utilisation	19
3.2.5	Erreur de justesse garantie par les constructeurs	19
3.2.6	Temps de réponse	20
3.2.7	Exemples d'hygromètres à condensation	20
3.2.8	Retour d'expérience du CETIAT	22
3.3	Hygromètre à variation d'impédance	23
3.3.1	Principe de mesure	23
3.3.2	Hygromètre capacitif	23
3.3.3	Hygromètre résistif	25
3.3.4	Hygromètre à sonde interchangeable	26
3.3.5	Utilisation à des températures supérieures à 100 °C	26
3.3.6	Utilisation d'un diagramme des erreurs de justesse	27
3.3.7	Quelques modèles d'hygromètres à variation d'impédance	27
3.3.8	Retour d'expérience du CETIAT	30
3.4	Hygromètre à oxyde métallique	30
3.4.1	Hygromètre à oxyde d'aluminium (Al ₂ O ₃)	30
3.4.2	Hygromètre à oxyde de silicium	32
3.4.3	Hygromètre à support polymère	32
3.4.4	Quelques modèles d'hygromètres à oxyde métallique	33
3.5	Psychromètre	34
3.5.1	Principe de mesure	34
3.5.2	Définition de la température humide	34
3.5.3	Équation du psychromètre idéal	34
3.5.4	Influence de la pression atmosphérique	34
3.5.5	Les psychromètres à aspiration	35
3.5.6	Domaine d'utilisation, erreur de justesse et temps de réponse	36
3.5.7	Avantages et inconvénients	36
3.5.8	Précautions particulières	37
3.5.9	Quelques modèles de psychromètres	38
3.5.10	Retour d'expérience du CETIAT	39
3.6	Hygromètre mécanique	40
3.6.1	Principe de fonctionnement	40
3.6.2	Domaine d'utilisation, erreur de justesse et temps de réponse	40
3.6.3	Avantages, inconvénients, précautions d'emploi	40
3.6.4	Procédure de régénération d'un hygromètre mécanique	41
3.6.5	Étalonnage	41
3.7	Hygromètre électrolytique	42
3.7.1	Principe de fonctionnement	42
3.7.2	Domaine de mesure, erreur de justesse et temps de réponse	43
3.7.3	Précautions d'emploi	43
3.8	Autres hygromètres	44
3.8.1	Hygromètre à sorption	44
3.8.2	Hygromètre piézo-électrique	45
3.8.3	Hygromètre à absorption infrarouge	46
4	MISE EN ŒUVRE DES HYGROMÈTRES	47
4.1	Mesure dans un volume	47
4.1.1	Choix de l'emplacement	47
4.1.2	Protection des capteurs	47
4.1.3	Influence de l'opérateur et de l'environnement	48
4.1.4	Utilisation du capteur dans des conditions particulières	48

4.2	Mesure sur un process industriel	49
4.2.1	Montages des capteurs	49
4.2.2	Exceptions	50
4.3	Mesure par prélèvement	50
4.3.1	Principales difficultés	50
4.3.2	Précautions de mise en œuvre	52
4.4	Choix du matériel	53
4.4.1	Filtre coalesceur	53
4.4.2	Filtre	53
4.4.3	Tuyauterie de prélèvement	53
5	ÉTALONNAGE DES HYGROMÈTRES	55
5.1	Introduction	55
5.1.1	Les raisons de l'étalonnage	55
5.1.2	Les principaux moyens d'étalonnage	55
5.2	La méthode gravimétrique	56
5.3	Les générateurs d'air humide	57
5.3.1	Le générateur à deux températures	58
5.3.2	Le générateur à deux pressions	58
5.3.3	Le générateur à mélange	61
5.4	Les solutions salines	64
5.4.1	Solutions salines saturées	65
5.4.2	Solutions salines diluées	69
5.5	Les enceintes climatiques	71
5.5.1	Principe de fonctionnement	71
5.5.2	Domaine de mesure	72
5.6	La chaîne nationale d'étalonnage en hygrométrie	73
5.6.1	Structure de la chaîne d'étalonnage en hygrométrie	73
5.6.2	Laboratoire de référence de la chaîne hygrométrie	73
5.6.3	Laboratoires accrédités	77
6	GUIDE DE CHOIX DES HYGROMÈTRES	79
6.1	Introduction	79
6.2	Estimation des incertitudes de mesure	80
6.2.1	Coefficient de sensibilité	81
6.2.2	Conclusions	82
6.3	Détermination de l'humidité relative à partir de la température de rosée	83
6.3.1	Calcul de l'humidité relative	83
6.3.2	Exemples d'application	87
6.4	Application aux enceintes climatiques	88
6.4.1	Introduction	88
6.4.2	Caractérisation et vérification d'une enceinte climatique	89
6.4.3	Conformité	90
6.5	Application à des mesures sur des installations d'air comprimé équipées de sécheur	92
7	NORMALISATION	95
8	PRINCIPAUX CONSTRUCTEURS	97
9	NOTATIONS ET SYMBOLES	99
10	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	101
11	ANNEXES	103

1 INTRODUCTION

1.1 GÉNÉRALITÉS

L'air atmosphérique est constitué d'un mélange d'air sec et de vapeur d'eau.

L'air sec est lui-même un mélange de gaz, contenant principalement de l'azote et de l'oxygène ; en plus faible quantité il contient également de l'argon et du gaz carbonique, et en quantité encore inférieure d'autres gaz tels que néon, krypton, xénon, etc. Les concentrations de ces différents constituants peuvent varier très légèrement dans le temps et dans l'espace, mais pour la plupart des mesures à effectuer sur l'air humide, il est possible de les considérer comme constantes. L'air sec sera donc considéré dans ce qui suit comme un gaz pur de masse volumique bien déterminée (§ 2.2.2).

La concentration de vapeur d'eau est par contre essentiellement variable, et ses variations ont une influence notable sur un certain nombre de phénomènes physiques, comme l'évaporation de l'eau, la condensation ou le givrage. A leur tour, ces phénomènes jouent un rôle dans de nombreux secteurs, comme le confort thermique dans l'habitat, l'évolution des conditions climatiques, la conservation des aliments, des produits pharmaceutiques ou électroniques, ou le fonctionnement de certains processus thermiques.

La mesure d'humidité a donc une grande importance industrielle ; les exigences dans ce domaine deviennent de plus en plus sévères, ce qui explique le grand nombre de travaux qui ont été effectués ces dernières années, aussi bien pour la mise au point d'instruments de mesure de bonne qualité que pour le développement de moyens d'étalonnages performants.

1.2 EFFET DE L'HUMIDITÉ DE L'AIR ET QUELQUES EXEMPLES D'APPLICATION

L'effet de l'humidité de l'air peut être direct, sur le corps humain ou sur certains composés organiques.

1.2.1 Effet de l'humidité sur l'activité et le confort des humains

La difficulté d'un travail dans des conditions d'humidité et de chaleur, et la perte d'efficacité en résultant, sont bien connues [1]. Des travaux physiques difficiles, même avec des vêtements légers, deviennent très difficiles lorsque la température humide (définie au § 2.2.14) est supérieure à 29 °C, et ils deviennent pratiquement impossibles au-delà de 32 °C. Des travaux peu difficiles sont possibles jusqu'à une température humide de 31 °C lorsqu'il n'y a pas de courant d'air, ou jusqu'à 34 °C avec une légère brise.

Une humidité élevée, pendant une vague de chaleur torride, augmente la température apparente à des niveaux dangereux. L'humidité élevée diminue l'évaporation de la transpiration, laquelle refroidit le corps, donnant une impression de chaleur plus importante.

Dans le tableau 1 (tiré de [1]), la température apparente perçue par le corps humain se trouve à l'intersection de la colonne correspondant à la température réelle et de la ligne donnant l'humidité relative.

		Température de l'air (°C)										
		21 °C	24 °C	27 °C	29 °C	32 °C	35 °C	38 °C	41 °C	43 °C	46 °C	49 °C
Humidité relative (% HR)	30 %	19	23	26	29	32	36	40	45	51	57	64
	35 %	19	23	26	29	33	37	42	48	54	62	
	40 %	20	23	26	30	34	38	43	51	58	66	
	45 %	20	23	27	31	35	40	46	54	62		
	50 %	21	24	27	31	36	42	49	57	66		
	55 %	21	24	27	32	37	43	52	61			
	60 %	21	24	28	32	38	46	56	65			
	65 %	21	24	28	33	39	48	59				
	70 %	21	25	29	34	41	51	62				
	75 %	21	25	30	35	43	54					
	80 %	22	26	30	36	45	58					
	85 %	22	26	31	37	47						
	90 %	22	26	31	39	50						
	95 %	22	26	32	41							
100 %	22	27	32	43								

	Conditions de confort
	Conditions difficiles
	Conditions dangereuses

Tableau 1 - Température apparente en fonction de la température et de l'humidité relative

1.2.2 Le conditionnement d'air

L'humidité de l'air est l'un des paramètres à contrôler pour l'obtention des conditions de confort dans un local climatisé. La norme américaine ASHRAE 55-1992 recommande de maintenir l'humidité relative dans une plage comprise entre 30 % HR et 60 % HR. Une valeur inférieure peut provoquer une irritation de l'appareil respiratoire, une valeur supérieure conduit à une atténuation néfaste de la transpiration. Cette exigence n'est toutefois pas très contraignante, et pendant longtemps on s'est contenté de moyens sommaires pour contrôler l'humidité relative. Mais si l'on s'intéresse à la consommation d'énergie, un calcul rapide montre qu'il est important de veiller à une bonne régulation. Supposons par exemple que l'on souhaite maintenir dans un local 40 % d'humidité relative et une température de 19 °C, pour une température extérieure de 0 °C ; si, par suite d'une dérive de l'hygromètre de régulation, l'humidité relative est de 60 % HR, la consommation d'énergie est augmentée de 25 %. Dans ces conditions, l'acquisition d'un hygromètre de bonne qualité devient rapidement rentable, de même que son contrôle régulier pour éviter les risques de dérive.

1.2.3 L'industrie alimentaire

L'humidité de l'air est un paramètre essentiel pour la conservation des produits. Le tableau 2, extrait d'un document de l'Institut International du Froid, indique les conditions recommandées pour un certain nombre de produits alimentaires : la température est en général voisine de 0 °C et l'humidité relative très élevée, entre 85 % et 90 % HR. Dans tous les cas, cette valeur doit rester très stable, car une dérive vers une valeur supérieure peut conduire à des moisissures, alors qu'une dérive vers une valeur inférieure conduit à une perte de poids par évaporation.

Conditions de stockage recommandées		
	Température (°C)	Humidité relative (% HR)
Pommes	+3 à +4	85 à 90
Avocats	+5 à +10	90
Raisins	-1 à 0	85 à 90
Laitues	0	90 à 95
Poires	-1,5 à +1	85 à 90
Viandes		
- bœuf, porc	-1,5 à 0	90
- poulet	-1 à 0	95

Tableau 2 - Extrait de "*Refrigeration applications to fish, fruit and vegetables in South East Asia*" (doc. I.I.F.)

1.2.4 Effet de l'humidité sur les matériaux métalliques

Lorsqu'ils sont exposés à la vapeur de l'eau, tous les métaux adsorbent, c'est-à-dire retiennent superficiellement une ou plusieurs couches moléculaires d'eau. Cette pellicule invisible d'humidité adsorbée est suffisante pour entraîner une corrosion électrochimique.

Tout métal recouvert d'une solution d'électrolyte tend à mettre en solution ses ions, qui sont électropositifs, et à rester lui-même chargé négativement. Il se forme donc une électrode dont le potentiel dépend du métal considéré.

Le tableau 3, tiré de [1], donne un classement des métaux selon leur potentiel E_o ; ce potentiel normal d'équilibre est mesuré par rapport à l'électrode normale à hydrogène, à 25 °C. Les métaux nobles ont un potentiel positif, les métaux non nobles ont un potentiel négatif.

Métal	Potentiel d'équilibre E_o (en volts)
Magnésium	-2,34
Aluminium	-1,67
Zinc	-0,76
Fer	-0,44
Nickel	-0,25
Hydrogène	0 (par convention)
Cuivre	+0,345
Platine	+1,2
Or	+1,68

Tableau 3 - Potentiel d'équilibre E_o de différents métaux

A ce processus de dissolution du métal peut s'opposer un autre processus qui se déroule sur des parties plus nobles du même métal recouvert du même électrolyte. Cette électrode plus noble détermine la formation d'une différence de potentiel dans le milieu et la production d'un courant électrique qui entretient la réaction de dissolution de l'électrode métallique, ou corrosion.

Plus la concentration en oxygène est élevée, plus le potentiel est élevé. Un défaut d'irrigation en oxygène d'un élément du métal le rend corrodable par rapport au reste de la surface. Des dépôts de toutes natures qui, en freinant la diffusion d'oxygène vers les surfaces sous-jacentes, y développent des zones corrodables. Les zones du métal exemptes d'oxygène, telles les creux de filetage, les anfractuosités, les fissures constituent des plages corrodables tandis que les zones