

LES GUIDES TECHNIQUES  
DU COLLÈGE FRANÇAIS DE MÉTROLOGIE

# MESURE DE L'HUMIDITÉ DANS LES GAZ



**LES GUIDES TECHNIQUES**  
DU COLLÈGE FRANÇAIS DE MÉTROLOGIE

# MESURE DE L'HUMIDITÉ DANS LES GAZ





LES GUIDES TECHNIQUES  
DU COLLÈGE FRANÇAIS DE MÉTROLOGIE

# MESURE DE L'HUMIDITÉ DANS LES GAZ

© CFM et AFNOR Éditions 2017

Couverture : création AFNOR Éditions – Exécution : Atelier du Livre (Caroline Joubert)

Crédit photo © 2017 Adobe Stock

ISBN 978-2-12-465610-3



Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (loi du 1<sup>er</sup> juillet 1992, art. L 122-4 et L 122-5, et Code pénal, art. 425).

Collège Français de Métrologie  
1, rue Gaston Boissier  
75724 Paris Cedex 15  
Tél. : + 33 (0) 4 67 06 20 36  
[www.cfmetrologie.com/fr/bibliotheque](http://www.cfmetrologie.com/fr/bibliotheque)

AFNOR  
11, rue Francis de Pressensé  
93571 La Plaine Saint-Denis Cedex  
Tél. : + 33 (0) 1 41 62 80 00  
[www.afnor.org/editions](http://www.afnor.org/editions)



COLLÈGE FRANÇAIS DE  
**MÉTROLOGIE**

Le Collège Français de Métrologie (CFM) est une association à vocation industrielle qui rassemble tous les acteurs du monde de la mesure : utilisateurs de moyens de mesure dans l'industrie et les laboratoires, responsables de laboratoires et de centres techniques, fabricants et prestataires, universitaires et autres.

Fondé avec le soutien du Ministère chargé de l'Industrie, du Laboratoire National de Métrologie et d'Essais (LNE), du Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques (CETIAT) et de Peugeot Citroën Automobiles (PSA), le CFM rassemble aujourd'hui près de 500 adhérents.

Apporteur d'informations et de contenu technique, notre mission est de vous permettre d'améliorer et d'optimiser vos processus de mesure. Les professionnels de tous niveaux et de tous les secteurs d'activités sont concernés.

Le but est de vous faire gagner du temps et de vous permettre de répondre au plus vite à vos interrogations.

Grâce à sa bibliothèque technique et notamment à ses Guides, le CFM est devenu la référence de la documentation dans le monde de la mesure.

Le rapprochement avec AFNOR Éditions, qui est lui aussi est un autre référent mais de la Norme, permettra aux deux entités de se compléter l'un et l'autre tout en gardant leurs niveaux d'exigence et tout en continuant d'améliorer les connaissances.

Véritable pôle d'échange qui facilite les rencontres et le partage d'expériences, intégrez vous aussi notre réseau en devenant l'un de nos membres privilégiés !

Visitez notre site Internet et analysez toute notre offre sur [www.cfmometrologie.com](http://www.cfmometrologie.com).

**Prenez la mesure de votre avenir !  
Le CFM**

**afnor**  
ÉDITIONS

Vous ne connaissiez pas encore AFNOR en tant qu'éditeur ? Pourtant, depuis plusieurs années nous nous affirmons en tant qu'acteur de premier plan dans le paysage de la littérature professionnelle !

Face aux grandes tendances qui impactent votre environnement économique, nous vous offrons les meilleures solutions.

Dans un monde où les risques externes sont nombreux, AFNOR Éditions apporte de véritables solutions et méthodes pour aider les dirigeants dans leurs prises de décision.

Quels que soient votre secteur d'activité et votre fonction dans l'entreprise, nous vous proposons un ouvrage capable de satisfaire vos attentes. Pour répondre à vos problématiques, nous avons spécialement développé des collections pratiques. Celle coéditée avec le CFM est la dernière-née !

Cette collection vous assure les compétences des meilleurs experts et traite de l'ensemble des besoins auxquels vous êtes confrontés au quotidien.

Cette volonté d'accompagner votre développement et d'assurer votre pérennité est la marque de fabrique d'AFNOR Éditions. C'est notre mission.

Pour l'accomplir et la mener à bien, nous sélectionnons des auteurs experts et reconnus, ayant une véritable expérience de terrain.

Capables de transmettre simplement les outils, les méthodologies et les connaissances nécessaires, ils vous permettront d'aller de l'avant et d'améliorer vos performances.

Consultez sans tarder l'ensemble de notre catalogue de plus de 570 titres sur [www.boutique.afnor.org/livres](http://www.boutique.afnor.org/livres).

**Accédez au savoir en illimité !  
AFNOR Éditions**





# 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 CETIAT<sup>1</sup>, référence française de la chaîne d'étalonnage en hygrométrie du LNE<sup>2</sup> ont été progressivement mises au point, puis utilisées pour étalonner des capteurs d'humidité sous accréditation COFRAC<sup>3</sup>.

Cet ouvrage a été publié en 2000 dans les monographies du BNM<sup>4</sup> 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

---

<sup>1</sup> Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques

<sup>2</sup> Laboratoire national de métrologie et d'essais

<sup>3</sup> Comité Français d'Accréditation

<sup>4</sup> Bureau National de Métrologie

# SOMMAIRE

---

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
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
<b>2</b>	<b>NOTIONS DE BASE DE L'AIR HUMIDE</b>	<b>7</b>
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 ( $\rho_v$ )	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 $\theta_d$ ) et température de gelée ( $T_f$ ou $\theta_f$ )	5
2.2.13	Humidité relative de l'air humide ( $U, HR$ ou $RH$ )	5
2.2.14	Température humide ( $T_w$ ou $\theta_w$ )	7
2.2.15	Masse volumique de l'air humide ( $\rho_{ah}$ )	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
<b>3</b>	<b>LES DIFFÉRENTS TYPES D'HYGROMÈTRES</b>	<b>15</b>

<b>3.1</b>	<b>Présentation générale</b>	<b>15</b>
<b>3.2</b>	<b>Hygromètre à condensation</b>	<b>15</b>
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
<b>3.3</b>	<b>Hygromètre à variation d'impédance</b>	<b>23</b>
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
<b>3.4</b>	<b>Hygromètre à oxyde métallique</b>	<b>30</b>
3.4.1	Hygromètre à oxyde d'aluminium (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	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
<b>3.5</b>	<b>Psychromètre</b>	<b>34</b>
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
<b>3.6</b>	<b>Hygromètre mécanique</b>	<b>40</b>
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
<b>3.7</b>	<b>Hygromètre électrolytique</b>	<b>42</b>
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
<b>3.8</b>	<b>Autres hygromètres</b>	<b>44</b>
3.8.1	Hygromètre à sorption	44
3.8.2	Hygromètre piézo-électrique	45
3.8.3	Hygromètre à absorption infrarouge	46
<b>4</b>	<b>MISE EN ŒUVRE DES HYGROMÈTRES</b>	<b>47</b>
<b>4.1</b>	<b>Mesure dans un volume</b>	<b>47</b>
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

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

# 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  $E_0$  ; 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 $E_0$ (en volts)
Magnésium	-2,34
Aluminium	-1,67
Zinc	-0,76
Fer	-0,44
Nickel	-0,25
<b>Hydrogène</b>	<b>0 (par convention)</b>
Cuivre	+0,345
Platine	+1,2
Or	+1,68

Tableau 3 - Potentiel d'équilibre  $E_0$  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

avec présence d'oxygène constituent des plages protégées. On parle alors de corrosion localisée par aération différentielle.

Ce phénomène se produira lorsque, dans certaines conditions de température et d'humidité relative, la vapeur d'eau de l'air se condense et occupe des pores et des crevasses de dimensions qui peuvent être inférieures à 0,01  $\mu\text{m}$ .

### **1.2.5 Effet de l'humidité sur le bois**

Les propriétés physiques du bois dépendent énormément de sa teneur en humidité, et une modification du niveau d'humidité peut entraîner une perte de résistance ou de rigidité, une modification des dimensions, un gauchissement, une altération des propriétés électriques, etc. Pour atténuer ces modifications, le bois doit être séché.

Comme la plupart des matériaux organiques, le bois exposé à un environnement trop sec subit des modifications de volume et se fragilise. Les fibres cellulosiques, pour lesquelles l'eau absorbée agit comme un élément plastifiant, subissent une perte d'extensibilité. On observe alors un retrait et un fendillement du bois.

### **1.2.6 Effet de l'humidité sur les papiers et cartons**

Un papier ordinaire non imprégné perd sa résistance lorsqu'il est mouillé, cela étant dû au ramollissement de l'agglomérant gélatineux utilisé pour maintenir les fibres ensemble. Même si le papier n'est pas "*mouillé*", une humidité relative importante peut accentuer la détérioration du papier engendrée par d'autres agents tels que des gaz acides et des micro-organismes. Par ailleurs, un environnement trop sec engendre une désorption d'humidité et induit une fragilisation du papier.

L'imprégnation ralentit le taux de rétention d'humidité du papier lorsqu'il est utilisé comme isolant électrique ; cela tend à stabiliser ses propriétés électriques lorsqu'il est exposé à des fluctuations relativement rapides de l'humidité relative.

### **1.2.7 Effet de l'humidité sur les textiles**

Les fibres textiles peuvent être réparties en deux groupes principaux, à savoir les fibres naturelles et les fibres artificielles. Les fibres ayant des valeurs de rétention d'humidité importantes perdent généralement leur capacité de résistance à la déchirure et leurs propriétés d'extensibilité lors de l'absorption d'eau.

Dans la gamme des fibres naturelles végétales, le jute est extrêmement hygroscopique et a une capacité d'absorption d'eau allant jusqu'à 23 % de son propre poids. Le coton est très absorbant et possède la particularité d'acquiescer une résistance plus importante lorsqu'il est saturé d'eau. Les variations d'humidité modifient les caractéristiques des fils, comme la tension mécanique par exemple, ce qui peut modifier le comportement des machines dans l'industrie textile. Une humidité trop faible peut provoquer des décharges d'électricité statique dues aux frottements des fils.

### **1.2.8 Effet de l'humidité sur les caoutchoucs**

En tant qu'agent de détérioration des caoutchoucs naturels et synthétiques, l'humidité crée beaucoup moins de détérioration que l'ozone, la chaleur, l'oxygène et la lumière du soleil.

En effet, la réaction chimique des caoutchoucs à l'eau est limitée aux caoutchoucs contenant dans leur composition d'origine des groupes pouvant être hydrolysés, tels que les polyesters. Cependant, si une humidité importante et une température élevée sont des caractéristiques climatiques permanentes, la diffusion d'eau dans les composants en caoutchouc risque d'altérer de façon relativement importante les propriétés électriques.

### 1.2.9 Effet de l'humidité sur le verre

L'exposition du verre à une humidité importante risque d'engendrer une altération de ses propriétés électriques et optiques. L'altération des propriétés électriques du verre peut être due à la présence d'une pellicule d'humidité adsorbée ou être le résultat d'une réaction chimique réelle entre le verre et l'eau, la dégradation des qualités optiques étant une conséquence de cette réaction.

Le taux de ternissement dépend de la composition du verre, mais on a pu constater qu'un ternissement visible se produisait au bout d'un mois d'exposition dans un entrepôt tropical au cours de la saison des pluies.

### 1.2.10 Effet de l'humidité sur les revêtements organiques

L'humidité sous forme de vapeur d'eau ou de liquide est un facteur d'altération important dans la détérioration des revêtements organiques. Dans des régions tropicales et subtropicales, l'humidité joue un rôle essentiel. La décomposition photochimique de la peinture est accélérée par la présence d'humidité sous forme de pluie, de rosée ou de vapeur d'eau.

### 1.2.11 Le séchage industriel

Lors du séchage, le contrôle du bon déroulement du processus doit se faire au moyen d'un humidimètre pour déterminer la teneur en eau du produit. Mais dans les séchoirs à air chaud, le réglage des conditions de sortie de l'air est très important pour le bilan énergétique de l'installation. Pour diminuer la consommation d'énergie, il est nécessaire d'optimiser la capacité de l'air à provoquer l'évaporation de l'eau et à permettre son élimination : une humidité trop élevée est néfaste pour le déroulement du séchage, une humidité trop faible est le signe que l'air a été mal utilisé. Les mesures d'humidité ont un impact économique très fort ; elles nécessitent un soin particulier à cause de la température de l'air en général élevée et la présence fréquente de poussières qui peuvent endommager les capteurs.

### 1.2.12 La détection des traces de vapeur d'eau dans les gaz

Il s'agit d'un objectif très important dans certaines industries, pour lesquelles celles-ci, même très faibles, peuvent provoquer des réactions parasites. Le cas peut se rencontrer dans l'industrie nucléaire, en métallurgie, et surtout en micro-électronique. Dans ce secteur, les exigences sont devenues de plus en plus sévères pour la fabrication des composants électroniques, dont la fiabilité dépend étroitement de la présence de toutes sortes d'impuretés et en particulier de la vapeur d'eau. Il faut maintenant obtenir des teneurs en vapeur d'eau inférieures à  $10^{-9}$  soit de l'ordre du "ppb" (une partie par milliard), ce qui correspond à des températures de rosée d'environ -100 °C. Cela a obligé les industriels à développer de nouveaux capteurs et les laboratoires à étendre le domaine de fonctionnement des bancs d'étalonnage.

### 1.2.13 Le comportement des échangeurs thermiques

Certains types d'échangeurs thermiques font intervenir des transferts de masse par évaporation d'eau (tours de refroidissement, laveurs d'air) ou par condensation de vapeur d'eau (batteries froides, évaporateur de climatiseur ou de pompe à chaleur). Ces transferts dépendent étroitement de l'humidité de l'air, qu'il est donc nécessaire de mesurer, soit pour établir les caractéristiques thermiques de l'appareil, soit pour un contrôle sur site. La grandeur utile est la température humide pour le cas des échangeurs par évaporation, et la température de rosée pour ceux dans lesquels intervient une condensation de la vapeur d'eau.

### 1.3 LA SITUATION ACTUELLE DE L'HYGROMÉTRIE

Les exemples mentionnés ci-dessus, choisis parmi de nombreux autres, illustrent les besoins de l'industrie en matière de mesure de l'humidité. L'évolution des besoins, associée à des exigences normatives sectorielles, a demandé des progrès dans deux domaines : l'amélioration des capteurs d'une part et celle des moyens d'étalonnage d'autre part.

#### *a. Amélioration des capteurs de mesure*

- Accroissement du domaine d'utilisation vers les températures élevées (séchage), au voisinage de la saturation (conservation des aliments) et vers les très faibles teneurs (électronique).
- Amélioration de la stabilité des capteurs, nécessaire pour la conduite de certains procédés industriels consommateurs d'énergie.
- Remplacement des instruments à lecture directe par des appareils à sortie analogique ou numérique, permettant une transmission des données vers un système d'acquisition.
- Amélioration des qualités métrologiques des hygromètres, en particulier grâce à la mise en place chez les constructeurs d'hygromètres de bancs d'étalonnage ayant des performances proches de celles des laboratoires nationaux.

#### *b. Amélioration des moyens d'étalonnage*

- Extension du domaine de fonctionnement des bancs d'étalonnage vers les hautes températures de rosée (jusqu'à 90 °C), et vers les basses températures de rosée (jusqu'à -100 °C).
- Amélioration du temps de réponse et de la qualité métrologique des bancs d'étalonnage et mise au point de moyens de contrôle pour suivre l'évolution des capteurs entre deux étalonnages.

En France, le Bureau National de Métrologie s'est occupé de cette question dès sa création, au début des années 70, et a demandé au CETIAT d'être le pilote de la chaîne d'étalonnage dans ce domaine. Les moyens du laboratoire ont évolué au fil des années pour s'adapter à la demande industrielle et se positionner au niveau européen comme laboratoire de référence.

De 1994 à 1998, le laboratoire du CETIAT a piloté la première opération d'inter comparaison européenne, en collaboration avec le NPL<sup>5</sup> (Grande-Bretagne) et l'IMGC<sup>6</sup> (Italie), et à laquelle ont participé les huit laboratoires nationaux européens existant en 1994 [2]. Entre 2004 et 2007, il a participé à deux boucles de la comparaison européenne sur la plage de température de rosée de -50 °C à +20 °C, impliquant une vingtaine de laboratoires européens. L'évolution du nombre de laboratoires participant à cette comparaison montre qu'en moins de dix ans, la plupart des pays européens ont mis en place un laboratoire de référence pour la mesure de l'humidité de l'air, ce qui indique la dynamique sur le sujet.

---

<sup>5</sup> National Physical Laboratory

<sup>6</sup> Istituto de Metrologia G. Colonnetti, actuellement INRIM (Istituto nazionale di ricerca metrologica)

## 2 NOTIONS DE BASE DE L'AIR HUMIDE

### 2.1 INTRODUCTION

Comme pour toute mesure, l'obtention d'un résultat correct dépend avant tout du choix d'un capteur adapté, ensuite de son utilisation appropriée et enfin de l'analyse du résultat obtenu.

La particularité de l'air humide est d'être constitué d'un mélange gazeux, qui doit dans la plupart des cas être pris en compte dans l'interprétation du résultat : en effet dans le cas d'un fluide pur, l'état thermodynamique est entièrement caractérisé par la connaissance de deux grandeurs, par exemple la température et la pression, ou la pression et le volume, etc.

Dans le cas d'un mélange, la présence de deux constituants impose la connaissance d'un troisième paramètre pour caractériser l'état thermodynamique : pour l'air humide, ce troisième paramètre peut être l'une des nombreuses grandeurs utilisées pour définir l' "humidité" : rapport de mélange, humidité relative, température de rosée, température humide, etc.

Lorsqu'on connaît la température, la pression et l'un quelconque de ces paramètres, il est donc possible de déterminer tous les autres, ainsi que les différentes grandeurs caractérisant les propriétés du mélange : masse volumique, volume spécifique, enthalpie, etc.

Le but de ce chapitre est de donner les principales définitions et les relations à connaître pour effectuer les calculs permettant de passer d'une grandeur à l'autre. Ceux qui recherchent des connaissances plus approfondies sur la thermodynamique de l'air humide se reporteront aux références [3, 4].

### 2.2 DÉFINITIONS ET GRANDEURS DE BASE

Les développements suivants ne concernent que l'air humide. Pour des gaz autres que l'air, la démarche est exactement la même, mais on remplacera dans les relations mathématiques la masse molaire et les différentes propriétés physiques de l'air par celles du gaz considéré.

Pour les définitions et les notations employées, nous resterons conformes aux documents officiels qui ont été rédigés sur le sujet, et en particulier à la norme NF X 15-110 *Mesure de l'humidité de l'air : Paramètres hygrométriques* [5]. Les symboles et abréviations des paramètres définis dans ce chapitre sont présentés au chapitre 9.

#### 2.2.1 Composition de l'atmosphère type

D'après l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI), l'air sec type est défini sur les bases suivantes :

- l'air est considéré comme un gaz parfait ;
- il est exempt de vapeur d'eau.

La masse molaire de l'air sec de référence est  $M_a = 28,96455 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$ .

Les conditions pour définir l'air sec de référence sont prises au niveau de la mer : la pression atmosphérique est de 101 325 Pa, la température est de 15 °C et la masse volumique est égale à 1,226 kg/m<sup>3</sup>. Par ailleurs, la constante universelle des gaz parfaits est  $R = 8,3143 \text{ J/mol.K}$ .

#### 2.2.2 Air sec

L'air sec est un mélange de gaz contenant principalement de l'azote, de l'oxygène, de l'argon, du gaz carbonique et, en faibles quantités, un certain nombre d'autres gaz (néon, hélium, krypton, hydrogène, etc.). Les proportions de ces différents gaz, tout en variant légèrement en fonction du temps et du lieu, peuvent être considérées en première approximation comme constantes (air de référence) et sont reprises en annexe 1, tableau 24.

### 2.2.3 Air humide

L'air humide est un mélange en proportions variables d'air sec et de vapeur d'eau. Il est à noter que la vapeur d'eau étant de l'eau à l'état gazeux, la présence d'eau sous forme liquide en suspension (brouillard) n'intervient pas dans la notion d'air humide et n'entre pas dans le cadre de ce document ; la présence d'eau en suspension peut même constituer un élément perturbateur pour les mesures d'humidité.

### 2.2.4 Air saturé

L'air saturé correspond à un air humide, à une température et à une pression données, dont la quantité de vapeur d'eau est telle que toute quantité d'eau supplémentaire ne peut apparaître que sous forme liquide ou solide.

### 2.2.5 Fraction molaire de la vapeur d'eau d'un échantillon d'air humide ( $x_v$ )

En considérant l'air humide comme un mélange de deux constituants, air sec et vapeur d'eau, il est nécessaire de connaître trois paramètres pour le définir, parmi lesquels la température, la pression, et un paramètre décrivant les proportions de chacun des deux constituants dans le mélange. Ce paramètre est la fraction molaire de chacun des constituants.

La fraction molaire de la vapeur d'eau est :

$$x_v = \frac{n_v}{n_v + n_a} \quad (1)$$

où  $n_v$  est le nombre de moles de vapeur d'eau et  $n_a$  est le nombre de moles d'air sec.

La somme des fractions molaires de l'air sec et de la vapeur d'eau est égale à 1 :

$$x_v + x_a = 1 \quad (2)$$

### 2.2.6 Rapport de mélange ( $r$ )

C'est le rapport de la masse de vapeur d'eau  $m_v$  à la masse d'air sec  $m_a$  :

$$r = \frac{m_v}{m_a} \quad (3)$$

Ce rapport est un nombre sans dimension, il s'exprime en kg de vapeur d'eau par kg d'air sec.

### 2.2.7 Pression partielle de vapeur d'eau ( $e'$ )

Dans un mélange de gaz parfaits, la pression totale est la somme des pressions partielles des constituants du mélange (relation de Dalton) et les pressions partielles des constituants du mélange sont dans le rapport des fractions molaires. En considérant l'air humide comme le mélange d'air sec et de vapeur d'eau, et en supposant que ces deux gaz suivent le comportement d'un gaz parfait, on peut écrire que la pression totale de l'air humide est la somme de la pression partielle de la vapeur d'eau ( $e'$ ) et de la pression partielle de l'air sec ( $p_a$ ) :

$$p = p_a + e' \quad (4)$$

avec

$$e' = x_v \cdot p \quad \text{et} \quad p_a = x_a \cdot p \quad (5)$$



### 2.2.8 Humidité spécifique ( $q$ )

Rapport de la masse de vapeur d'eau à la masse de l'air humide dans laquelle la masse de vapeur d'eau est contenue :

$$q = \frac{m_v}{m_v + m_a} = \frac{r}{1 + r} \quad (6)$$

où :

$m_v$  est la masse de vapeur d'eau ;

$m_a$  est la masse d'air sec ;

$m_v + m_a$  est la masse d'air humide.

Ce rapport est un nombre sans dimension, il s'exprime en kg de vapeur d'eau par kg d'air humide.

### 2.2.9 Humidité absolue ( $\rho_v$ )

Rapport de la masse de vapeur d'eau au volume total d'air humide :

$$\rho_v = \frac{m_v}{V} \quad (7)$$

où :

$m_v$  est la masse de vapeur d'eau ;

$V$  est le volume total d'air humide ;

$\rho_v$  est exprimé en kg de vapeur d'eau par mètre cube d'air humide.

### 2.2.10 Pression de vapeur saturante en phase pure ( $e_w, e_i$ )

C'est la pression de vapeur dans un état d'équilibre indifférent avec une surface plane d'eau liquide ou de glace à la même température et à la même pression, en l'absence de tout autre composé ("*phase pure*"). En d'autres termes, c'est la valeur maximale que peut atteindre la pression partielle de la vapeur à cette température. Au-delà de cette valeur, il y a condensation.

Les indices "w" (water) et "i" (ice) permettent de distinguer les cas de l'équilibre au-dessus d'une surface d'eau liquide ou de glace.

Les pressions de vapeur saturante  $e_w$  et  $e_i$  s'expriment généralement en Pascal et ne dépendent que de la température.

Les valeurs de référence ont été initialement établies par A. Wexler en 1976 [6, 7], à partir de l'échelle EIPT-68<sup>7</sup> ; elles ont été recalculées par P. Huang [8] et par D. Sonntag pour l'échelle EIT-90<sup>8</sup> [9]. Les valeurs de D. Sonntag sont conventionnellement utilisées dans les tables de l'air humide et dans les calculs présentés ci-dessous. Ces valeurs sont indiquées dans les tableaux 4, 5 et 6 (de degré en degré) et en annexes 2 et 3 (de 0,1 °C en 0,1 °C).

<sup>7</sup> EIPT-68 : Echelle internationale pratique de température de 1968

<sup>8</sup> EIT-90 : Echelle internationale de température de 1990

$\theta$ °C	$e_w$ Pa	$\theta$ °C	$e_w$ Pa	$\theta$ °C	$e_w$ Pa	$\theta$ °C	$e_w$ Pa	$\theta$ °C	$e_w$ Pa
0	611,213	20	2 339,25	40	7 385,30	60	19 947,66	80	47 415,54
1	657,080	21	2 488,16	41	7 788,23	61	20 889,20	81	49 368,28
2	705,972	22	2 645,29	42	8 210,00	62	21 868,29	82	51 388,05
3	758,060	23	2 811,02	43	8 651,31	63	22 886,12	83	53 476,65
4	813,520	24	2 985,76	44	9 112,91	64	23 943,93	84	55 635,92
5	872,540	25	3 169,90	45	9 595,57	65	25 042,96	85	57 867,72
6	935,313	26	3 363,88	46	10 100,05	66	26 184,50	86	60 173,94
7	1 002,04	27	3 568,12	47	10 627,17	67	27 369,85	87	62 556,52
8	1 072,94	28	3 783,07	48	11 177,76	68	28 600,36	88	65 017,42
9	1 148,23	29	4 009,22	49	11 752,66	69	29 877,39	89	67 558,64
10	1 228,13	30	4 247,03	50	12 352,74	70	31 202,33	90	70 182,21
11	1 312,90	31	4 497,01	51	12 978,91	71	32 576,61	91	72 890,20
12	1 402,77	32	4 759,68	52	13 632,08	72	34 001,69	92	75 684,71
13	1 498,02	33	5 035,56	53	14 313,19	73	35 479,05	93	78 567,87
14	1 598,91	34	5 325,21	54	15 023,21	74	37 010,20	94	81 541,86
15	1 705,71	35	5 629,20	55	15 763,13	75	38 596,70	95	84 608,88
16	1 818,74	36	5 948,11	56	16 533,97	76	40 240,11	96	87 771,16
17	1 938,28	37	6 282,54	57	17 336,76	77	41 942,04	97	91 030,99
18	2 064,66	38	6 633,12	58	18 172,57	78	43 704,14	98	94 390,68
19	2 198,20	39	7 000,48	59	19 042,50	79	45 528,08	99	97 852,57
								100	101 419,04

**Tableau 4 - 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) – Températures positives**

$\theta$ °C	$e_w$ Pa	$\theta$ °C	$e_w$ Pa	$\theta$ °C	$e_w$ Pa	$\theta$ °C	$e_w$ Pa	$\theta$ °C	$e_w$ Pa
0	611,213	-10	286,521	-20	125,587	-30	51,031 6	-40	19,032 7
-1	568,208	-11	264,670	-21	115,181	-31	46,425 7	-41	17,156 5
-2	527,909	-12	244,320	-22	105,556	-32	42,199 0	-42	15,450 0
-3	490,169	-13	225,379	-23	96,660 7	-33	38,323 4	-43	13,899 3
-4	454,846	-14	207,763	-24	88,445 6	-34	34,772 8	-44	12,491 7
-5	421,804	-15	191,388	-25	80,864 5	-35	31,522 7	-45	11,215 1
-6	390,915	-16	176,179	-26	73,873 7	-36	28,550 4	-46	10,05 84
-7	362,056	-17	162,062	-27	67,432 4	-37	25,834 4	-47	9,011 59
-8	335,111	-18	148,967	-28	61,502 1	-38	23,355 0	-48	8,065 08
-9	309,968	-19	136,829	-29	56,046 4	-39	21,093 5	-49	7,210 17
								-50	6,438 81

**Tableau 5 - 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) – Températures négatives**