

**Roger Cadiergues**

**MémoCad nF01.a**

# **LES PROPRIÉTÉS DE L'AIR**

## **SOMMAIRE**

- nF01.1.** La composition de l'air
- nF01.2.** L'atmosphère
- nF01.3.** De l'air sec à l'air humide
- nF01.4.** Les conversions des humidités
- nF01.5.** Les différentes «formes» de l'air
- nF01.6.** L'air sec
- nF01.7.** L'air moyen
- nF01.8.** L'air réel
- nF01.9.** L'air normé
- nF01.10.** Réchauffement/refroidissement de l'air
- nF01.11.** Propriétés complémentaires de l'air



La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part que les «copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective», et d'autre part que les analyses et courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration «toute reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite».

## nF01.1. LA COMPOSITION DE L'AIR

### LES ATOMES EN JEU

Les différents atomes intervenant dans la composition de l'air sont les suivants, indiqués avec leurs masses atomiques  $m_{at}$  :

- . O (oxygène) :  $m_{at} = 15,9994$  ; N (azote) :  $m_{at} = 14,0067$  ; C (carbone) :  $m_{at} = 12,01$  ;
- . H (hydrogène) :  $m_{at} = 1,0080$  ; Ar (argon) :  $m_{at} = 39,95$  ; Ne (néon) :  $m_{at} = 20,179$  ;
- . He (hélium) :  $m_{at} = 4,0026$  ; Kr (krypton) :  $m_{at} = 83,80$  ; Xe (xénon) :  $m_{at} = 131,30$ .

### LES MOLÉCULES PRÉSENTES DANS L'AIR

Les molécules présentes dans l'air, caractérisées par leur **masse molaire**  $m_{mol}$  [kg/kmol], sont :

- Soit des *molécules simples*, constituées d'un ou deux atomes : O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, Ar, etc., les principales étant les suivantes : N<sub>2</sub> (azote),  $m_{mol} = 28,0134$  ; O<sub>2</sub> (oxygène),  $m_{mol} = 31,9988$  ;
- . Ar (argon),  $m_{mol} = 39,95$  ; les autres étant relativement négligeables ;
- Soit des *molécules composées* qui sont - pour l'essentiel - les suivantes :
  - . CO<sub>2</sub> (dioxyde de carbone),  $m_{mol} = 44,0088$  ; CH<sub>4</sub> (méthane),  $m_{mol} = 16,042$  ;
  - . N<sub>2</sub>O (monoxyde d'azote),  $m_{mol} = 44,1128$  ; H<sub>2</sub>O (vapeur d'eau) :  $m_{mol} = 18,0154$ .

### LA COMPOSITION DE L'AIR

L'air est un *mélange* de différents gaz ou vapeurs qu'il est habituel de classer en deux catégories :

1. les **constituants permanents**) qui sont toujours présents dans l'air, et ce en proportions fixes,
2. les **constituants variables**) présents en proportions variant avec le temps et avec le lieu.

Leurs concentrations types sont indiquées par les tableaux suivants.

CONSTITUANTS PERMANENTS		CONSTITUANTS VARIABLES	
constituant	fraction molaire	constituant	fraction molaire
azote (N <sub>2</sub> )	0,781 10	eau (extérieur) (H <sub>2</sub> O)	de 0 à 0,07
oxygène (O <sub>2</sub> )	0,209 53	dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> )	de 0,001 à 0,0001
argon (Ar)	0,009 34	dioxyde de soufre (SO <sub>2</sub> )	de 0 à 0,000 001
néon (Ne)	0,000 01818	ozone (O <sub>3</sub> )	de 0 à 0,000 000 1
hélium (He)	0,000 00524	dioxyde d'azote (NO <sub>2</sub> )	traces
krypton (Kr)	0,000 00114		
xénon (Xe)	0,000 000 087		
hydrogène (H <sub>2</sub> )	0,000 000 5		
méthane (CH <sub>4</sub> )	0,000 002		
monoxyde d'azote (N <sub>2</sub> O)	0,000 000 5		

### LE MODÈLE DE BASE

La modélisation classique consiste à écrire symboliquement :

$$\langle \text{AIR RÉEL} \rangle = \langle \text{AIR SEC} \rangle + \langle \text{HUMIDITÉ} \rangle$$

1. C'est le **mélange de constituants permanents** qui constitue ce qu'on appelle «l'air sec». C'est un **gaz parfait** dont la *masse molaire équivalente* est prise égale à **28,960** [kg/kmol].

2. Parmi les **constituants variables**, le seul généralement pris en compte est l'**humidité**, supposée à l'état de vapeur. Cette vapeur peut se comporter comme un gaz imparfait lorsque sa teneur est forte, mais ici - dans ce livret - nous la considérerons généralement comme un gaz parfait de masse molaire égale à **18,0154** [kg/kmol].



L'**air réel** est, pour la plupart des calculs de base, considéré comme un mélange simple de deux gaz : l'**air sec** et la **vapeur d'eau** :

$$\langle \text{AIR RÉEL} \rangle = \langle \text{AIR SEC} \rangle + \langle \text{HUMIDITÉ} \rangle$$

En un point donné l'air est caractérisé :

- . par sa **pression**, les pressions étant toujours, ici, exprimées en **pascal** [Pa],
- . par sa **température**, en **degré Celsius** [°C],
- . par sa **teneur en humidité**, qui peut être exprimée de différentes manières (voir plus loin).

## nF01.2. L'ATMOSPHERE

### LES CONVENTIONS GENERALES

1. Dans tous les calculs aérodynamiques (ce qui distingue ce domaine de celui de l'air comprimé) la pression de l'air est la **pression atmosphérique normale**.
2. Dans les calculs aérodynamiques, l'humidité de l'air - lorsqu'elle est prise en compte - peut être exprimée de différentes manières comme indiqué plus loin.

### L'ATMOSPHERE NORMALE

La pression variant avec le temps les organisations internationales ont convenu d'une valeur moyenne dite «normale», définie pour l'atmosphère suivante :

- . au niveau de la mer ( $z = 0$ ) :  $\theta = 15$  [°C] ;  $p = 101325$  [Pa],
- . la température décroît linéairement avec l'altitude (gradient de  $- 0,0065$  [K/m]),
- . l'air est supposé sec, de masse molaire 28,9645,
- . l'intensité de la pesanteur :  $g = 9,80665$  [N/kg].

### LA PRESSION ATMOSPHERIQUE NORMALE

Partant de ces hypothèses, en supposant l'atmosphère en équilibre, on peut calculer la pression à différents niveaux, qui est dite «**pression atmosphérique normale**», une grandeur **qui ne dépend que de l'altitude**.

Pour calculer la pression atmosphérique normale, en fonction de l'altitude, vous disposez de quatre méthodes.

1. Ou bien vous faites appel à la **table F01.I** ci-dessous qui fournit directement les valeurs principales.
2. Ou bien vous faites appel (sur calculette ou autrement) à la formule indiquée à l'**encadré F01.A** ci-dessous
- 3/4. Ou bien vous faites appel aux **auxiliaires** qui vous seront présentés ultérieurement.

#### F01.I. PRESSION ATMOSPHERIQUE NORMALE EN FONCTION DE L'ALTITUDE

Altitude [m]	Pression [Pa]						
0	101 325	700	93 194	1400	85 599	2100	78 515
100	100 129	800	92 076	1500	84 556	2200	77 541
200	98 945	900	90 970	1600	83 524	2300	76 580
300	97 773	1000	89 875	1700	82 501	2400	75 626
400	96 611	1100	88 790	1800	81 489	2500	74 684
500	95 461	1200	87 716	1900	80 487	2600	73 749
600	94 322	1300	86 652	2000	79 495	2800	71 910
700	93 194	1400	85 599	2100	78 515	3000	70 108

### Encadré F01.A. PRESSION ATMOSPHERIQUE NORMALE

$pat$  [Pa] = pression atmosphérique (normale) ;  $alt$  [m] = altitude

$$\langle \mathbf{F01.A} \rangle \odot \quad pat = 101325 * (1 - 0,000\ 225577 * alt) ^ 5.2554876$$

### REMARQUES GENERALES

Dans tous les encadrés, tels que le précédent (V10.A) où il y a présentation de formules :

\* ... signifie «multiplier par ...»

/ ... signifie «diviser par ...»

^ ... signifie «mettre à la puissance ...»

## nF01.3. DE L'AIR SEC À L'AIR HUMIDE

### LES CONCEPTS DE BASE

Les calculs (physiques) sur l'air étant souvent compliqués par les incertitudes sur l'humidité il est habituel d'utiliser les deux concepts suivants :

- . celui d'**air sec**, supposant que l'air ne contient pas du tout d'humidité,
- . celui d'**air humide**, *air réel* dont la teneur en humidité doit être fixée (voir plus loin).

On parle également «d'air sec» **quand on veut simplifier les calculs** et ne prendre en compte que la fraction (essentielle) de l'air hors toute humidité.

L'avantage du concept d'air sec tient à ce que les propriétés ne dépendent que de deux paramètres :

- . la *pression* (l'altitude),
- . la *température*,

alors que l'air réel fait intervenir un troisième paramètre (souvent difficile à fixer) : la *teneur en humidité*. Pour éviter cette complication l'auteur conseille d'utiliser le concept d'**air moyen**, défini plus loin : l'humidité ne dépend alors que de la température, et l'air n'est caractérisé que par deux paramètres, au lieu de trois : la *pression* (l'**altitude**) et la **température**.

### PREMIÈRE FORME DE MESURE DE L'HUMIDITÉ : L'HUMIDITÉ SPÉCIFIQUE

Le concept le plus rationnel pour caractériser la teneur en humidité de l'air consiste à utiliser la notion d'**humidité spécifique**, égale à la masse d'humidité contenue dans la fraction «sèche» de l'air. L'*humidité spécifique* est exprimée en **kilogramme d'humidité par kilogramme d'air sec** [ $\text{kg}_h/\text{kg}_a$ ].

**ATTENTION :**

1. Beaucoup d'auteurs utilisent le terme d'*humidité absolue* à la place de celui d'humidité spécifique : nous excluons ce terme, non conforme aux conventions.
2. Beaucoup d'auteurs utilisent, pour l'*humidité spécifique*, le gramme par kilogramme d'air sec : nous excluons ce mode d'expression.
3. Très souvent, au lieu d'utiliser l'humidité spécifique on utilise l'humidité relative définie comme suit.

### DEUXIÈME FORME DE MESURE DE L'HUMIDITÉ : L'HUMIDITÉ RELATIVE

L'humidité de l'air peut être également caractérisée par son **humidité relative** au lieu de l'être par l'*humidité spécifique*. Notée ici  $\psi$  (lire «psi») l'humidité relative est définie par la formule :

$$\psi = p_v / p_{\text{sat}}$$

- . où  $p_v$  est la pression de vapeur d'eau [Pa] dans l'air,
- . et  $p_{\text{sat}}$  la **pression de vapeur saturante** [Pa] qui varie avec la température de l'air, cette pression étant définie et analysée à la fiche suivante.

**ATTENTION :**

Beaucoup d'auteurs expriment l'*humidité relative en pourcent* alors qu'ici nous utilisons la valeur directe (et non pas le pourcent). Quand nous écrivons  $\psi = 0,55$ , certains textes diront que  $\psi = 55 \%$ .

### CONVERSION DES TENEURS EN HUMIDITÉ

L'expression fondamentale de l'**humidité relative** ( $\psi$ ), définie par la formule  $\psi = p_v / p_{\text{sat}}$ , fait intervenir :

1. une première valeur, celle de la pression de vapeur d'eau  $p_v$  [Pa], à fixer ;
2. une deuxième valeur, celle de  $p_{\text{sat}}$ , la **pression de vapeur saturante** [Pa], qui ne dépend que de la température [°C] (voir fiche suivante).

L'*humidité ne peut exister à l'état de vapeur que si sa pression est inférieure à la pression de vapeur saturante* :  $p_{\text{sat},0}$  (voir définition de l'humidité relative). Vous disposez de 4 méthodes d'évaluation.

1. Ou bien vous faites appel à la **table F01.II** (page suivante) fournissant les valeurs de  $p_{\text{sat},0}$ ,
2. Ou bien vous faites appel (sur calculette ou autrement) à l'**encadré F01.B** de la page suivante,
3. Ou bien vous faites appel aux **auxiliaires** qui vous seront présentés par la suite.

Dans un grand nombre de cas la valeur de l'**humidité relative** est connue, ou supposée telle. S'il n'en est rien c'est que le grandeur connue est l'**humidité spécifique**. Si vous devez convertir une **humidité relative** en **humidité spécifique** (ou inversement) vous pouvez faire appel à l'une des trois procédures suivantes :

1. Ou bien vous faites appel (sur calculette ou autrement) à l'**encadré F01.C** de la page suivante,
- 2/3. Ou bien vous faites appel aux **auxiliaires** qui vous seront présentés par la suite.

## nF01.4. LES CONVERSIONS DES HUMIDITÉS

### LA PRESSION DE VAPEUR SATURANTE

Dite aussi, parfois, pression de saturation, ses valeurs sont fournies à la table suivante.

#### F01.II. PRESSION DE SATURATION (EAU) EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE

Température [°C]	Pr. de vapeur saturante [Pa]	Température [°C]	Pr. de vapeur saturante [Pa]	Température [°C]	Pr. de vapeur saturante [Pa]	Température [°C]	Pr. de vapeur saturante [Pa]
-29	42,17	-9	283,93	11	1312,7	31	4495,9
-28	46,73	-8	309,98	12	1402,6	32	4758,5
-27	51,74	-7	338,19	13	1497,8	33	5034,3
-26	57,25	-6	368,74	14	1598,75	34	5323,9
-25	63,29	-5	401,76	15	1705,5	35	5627,8
-24	69,91	-4	437,47	16	1818,4	36	5946,6
-23	77,16	-3	476,06	17	1938,0	37	6281,0
-22	85,10	-2	517,72	18	2064,3	38	6631,5
-21	93,78	-1	562,67	19	2197,8	39	6998,7
<b>-20</b>	<b>103,26</b>	<b>0</b>	<b>611,15</b>	<b>20</b>	<b>2338,8</b>	<b>40</b>	<b>7383,5</b>
-19	113,62	1	657,1	21	2487,7	41	7786,3
-18	124,92	2	706,0	22	2644,8	42	8208,0
-17	137,25	3	758,0	23	2810,4	43	8649,2
-16	150,68	4	813,5	24	2985,1	44	9110,7
-15	165,30	5	872,5	25	3169,2	45	9593,2
-14	181,22	6	935,3	26	3363,1	46	10097,6
-13	198,52	7	1002,0	27	3567,3	47	10624,6
-12	217,32	8	1072,8	28	3782,2	48	11175,1
-11	237,74	9	1148,1	29	4008,3	49	11750,0
<b>-10</b>	<b>259,90</b>	<b>10</b>	<b>1228,0</b>	<b>30</b>	<b>4246,0</b>	<b>50</b>	<b>12349,9</b>

### Encadré F01.B. PRESSION DE VAPEUR SATURANTE DE L'EAU

$psat$  [Pa] = pression de vapeur saturante (de la vapeur d'eau) ;  $TC$  [°C] = température Celsius

<F01.B>©

$$psat = 10^u$$

$TC$  compris entre -30 et 0 °C :  $u = 2,7862 + \{ (9,7561 * TC) / (272,67 + TC) \}$

$TC$  compris entre 0 et 50 °C :  $u = 2,7862 + \{ (7,5526 * TC) / (239,21 + TC) \}$

### Encadré F01.C. HUMIDITÉ RELATIVE <-> HUMIDITÉ SPÉCIFIQUE

$psat$  [Pa] = pression de vapeur saturante (fonction de la température  $TC$  [°C] : encadré A01.B)

$pAt$  [Pa] = pression atmosphérique normale (fonction de l'altitude  $alt$  [m] : encadré A01.A)

$hspe$  [kg/kg] = humidité spécifique ;  $hrel$  = humidité relative

<F01.C1> de l'humidité relative à l'humidité spécifique :

$$hspe = 0,6221 * hrel * psat / (pAt - hrel * psat)$$

<F01.C2> de l'humidité spécifique à l'humidité relative :

$$hrel = hspe * pAr / \{psat * (0,6221 + hspe)\}$$

## nF01.5. LES DIFFÉRENTES «FORMES» DE L'AIR

### POURQUOI PARLER DES «AIRS»

L'air réel étant un mélange assez complexe, afin de circonscrire les difficultés qui peuvent en résulter il est souvent commode, et relativement traditionnel, de se référer à des mélanges types, ce qui conduit à définir différents «airs».

### LES AIRS DE RÉFÉRENCE

Nous en distinguerons cinq, qui sont les suivants.

1. L'**air réel**. C'est celui généralement défini par sa température, sa pression (souvent atmosphérique) et sa teneur en humidité.
2. L'**air sec**. D'assez nombreux calculs du génie climatique, tentant d'éviter les difficultés, négligent l'humidité, et parlent de «**air sec**». C'est le mélange des constituants qui sont dits «permanents» dans l'analyse de l'air, les constituants variables (tels que l'humidité) étant négligés.
3. L'**air moyen**. Lorsqu'il n'est pas possible - pour une raison quelconque - de spécifier l'humidité de l'air l'habitude s'est souvent prise d'utiliser l'air sec. Pour éviter les légers défauts inhérents à ce choix l'auteur a proposé d'utiliser le concept d'air «moyen», qui correspond à une humidité spécifique moyenne, variable avec la température (voir plus loin).
4. L'**air humide**. Dans toutes les applications où il est nécessaire de tenir compte de l'humidité de l'air, et en particulier quand cette humidité joue un rôle important - en génie climatique par exemple - on parle de «**air humide**», qui n'est pas autre chose que l'air réel, le terme «air humide» servant simplement à souligner qu'il ne s'agit pas d'air sec et qu'on étudie le comportement précis de l'humidité. L'air humide n'est pas examiné ici, mais dans un livret (à paraître) consacré à l'*air humide*.
5. L'**air normé**. Les caractéristiques de l'air dépendant, non seulement de la température, de l'humidité et de la pression (qui varie avec l'altitude) une convention s'est établie, en matière de ventilation, qui définit le «**air normé**» : il s'agit d'un air dont la masse volumique est exactement égale à 1,20 [kg/m<sup>3</sup>]. Cette convention est surtout utilisée pour définir les **débites normés**, le débit normé étant celui qui serait constaté si l'air en cause était porté à des conditions physiques telles que la masse volumique soit exactement égale à 1,20 [kg/m<sup>3</sup>].

### LES PROPRIÉTÉS DES DIFFÉRENTS AIRS

Dans ce livret nous allons indiquer comment évaluer :

- . la **masse volumique** et le **volume massique** de l'**air sec** (page nF01.6),
- . la **masse volumique** et le **volume massique** de l'**air réel** (page nF01.7),
- . la **masse volumique** et le **volume massique** de l'**air moyen** (page nF01.8),
- . auxquels il faut ajouter l'état «**normé**», examiné page nF01.9 .

### LES PROPRIÉTÉS EXAMINÉES À LA SUITE

Parmi toutes les propriétés de l'air la plus importante est sa **masse volumique**, mesurée ici en *kilogramme par mètre cube* [kg/m<sup>3</sup>]. On utilise parfois son inverse, le **volume massique** mesuré en mètre cube par kilogramme [m<sup>3</sup>/kg].

La méthode de calcul adoptée considère que l'air (sec, moyen, ou réel) est un gaz parfait, suivant les lois classiques de ces gaz. Pour ce faire on adopte les valeurs suivantes des **masses molaires**  $m^M$ , exprimées en kilogramme par kilomole [kg/kmol], avec les valeurs suivantes :

- . *air sec* :  $m^M = 28,960$  [kg/kmol],
- . *humidité (eau)* :  $m^M = 18,0154$  [kg/kmol].

### FORMULES DE BASE : LES GAZ PARFAITS

Les **airs** étant considérés comme des **gaz parfaits**, respectent les deux lois suivantes :

$$p V = 8314,41 N (\theta + 273,25) ; m = N m^M$$

- .  $p$  étant la **pression** en pascal [Pa],  $V$  le **volume** [m<sup>3</sup>] de  $N$  **kilomoles** [kmol].
- .  $\theta$  la **température** [°C],  $m^M$  [kg/kmol] la **masse molaire**.

Ce qui conduit aux valeurs suivantes, au travers de formules systématiquement utilisées par la suite :

- . pour la **masse volumique**  $m'''$  :  

$$m''' = (m^M / 8314,41) p / (\theta + 273,15) ;$$
- . pour le **volume massique**  $V^*$  [m<sup>3</sup>/kg] :  

$$V^* = (\theta + 273,15) / \{(8314,41 / m^M) p\}.$$

## nF01.6. L'AIR SEC

### LES RELATIONS FONDAMENTALES

Pour calculer la **masse volumique** et le **volume massique** de l'air sec trois procédures sont, ou seront disponibles.

1. Ou bien vous faites appel (sur une calculette ou autrement) à la formule de l'**encadré A01.D** (ci-dessous)
- 2/3. Ou bien vous faites appel aux **auxiliaires** qui vous seront présentés par la suite.

### Encadré F01.D. L'AIR SEC : MASSE VOLUMIQUE/VOLUME MASSIQUE

$pAt$  [Pa] = *pression* : normalement la pression atmosphérique normale (encadré **F01.A**)

$TC$  [°C] = *température Celsius* ;  $mVol$  [kg/m<sup>3</sup>] = *masse volumique* ;

$Vmass$  [m<sup>3</sup>/kg] = *volume massique*

<**F01.D**>  $mVol = 0,003483 * pAt / (TC + 273,15)$

$Vmass = 1 / mVol = 287,1 * (TC + 273,15) / pAt$

## nF01.7. L'AIR MOYEN

### LA PREMIÈRE DÉFINITION DE L'AIR MOYEN

Les formules relatives à l'air réel aboutissant à des expressions un peu compliquées, l'auteur a finalement adopté une définition voisine, plus simple et suffisante. L'air moyen est un concept propre à l'auteur, qui utilise la convention selon laquelle l'humidité de l'air est de l'ordre de grandeur de sa valeur moyenne en France (à l'extérieur des locaux). L'humidité spécifique  $r_s$  [kg/kg] prend, avec cette convention, les valeurs suivantes,  $T_{ce}$  [°C] étant la température (notations classiques) :

$T_{ce} \leq -15$  [°C],  $r_s = 0,00$  ;  $-15 < T_{ce} < 35$  [°C],  $r_s = 0,003 + 0,0002 T_{ce}$ ;  $T_{ce} \geq 35$  [°C],  $r_s = 0,010$

### LA DÉFINITION FINALE DE L'AIR MOYEN

L'auteur a finalement adopté une définition voisine, plus commode, avec :

$T_{ce} \leq -15$  [°C],  $\alpha = 1,000$  ;  $-15 < T_{ce} < 35$  [°C] :  $\alpha = 0,9982 + 0,00012 T_{ce}$ ;  $T_{ce} \geq 35$  [°C] :  $\alpha = 0,994$

Ce qui donne la masse volumique  $m'''$  [kg/m<sup>3</sup>] pour l'**air moyen** (notations classiques) :

$$m''' = 0,0034836 \alpha p / (T_{ce} + 273,15).$$

Dans ces conditions la masse volumique (et le volume massique) de l'air moyen sont fournis par l'**encadré A01.E** ci-dessous, mais vous pourrez également utiliser les **auxiliaires** qui vous seront présentés par la suite.

### Encadré F01.E. L'AIR MOYEN : MASSE VOLUMIQUE/VOLUME MASSIQUE

$pAt$  [Pa] = *pression* : normalement la pression atmosphérique normale (encadré **A01.A**)

$TC$  [°C] = *température Celsius* ;  $mVol$  [kg/m<sup>3</sup>] = *masse volumique* ;  $Vmass$  [m<sup>3</sup>/kg] = *volume massique*

<**F01.E1**>  $mVol = 0,003483 * \alpha * pAt / (TC + 273,15)$

avec :

$TC \leq -15$  [°C] :  $\alpha = 1.000$

$-15 < TC < 35$  [°C] :  $\alpha = 0,9982 - (0.00012 * T_{ce})$

$TC \geq 35$  [°C] :  $\alpha = 0,994$

<**F01.E2**>  $Vmass = 1 / mVol$

## nF01.8. L'AIR RÉEL

### 1. CARACTÉRISER LA TENEUR EN HUMIDITÉ

Comme indiqué au chapitre précédent la teneur en humidité peut se mesurer de multiples manières, les deux modes d'expression ici retenus étant :

- . l'**humidité spécifique**, ici notée  $r_s$ , mesurée en kilogramme d'eau par kilogramme d'air sec [kg/kg],
- . l'**humidité relative**,  $\psi$ , mesurée en valeur absolue (et non en pourcent), variant de 0 à 1.

**Attention** à cette dernière remarque, à la fois :

- pour l'exploitation des formules qui suivent,
- et pour l'exploitation des formules plus détaillées sur «l'air humide» qui sont présentées dans un livret ultérieur.

### 2. LES AUTRES CARACTÉRISTIQUES DE L'AIR RÉEL

Outre sa teneur en humidité, définie ci-dessus, l'air réel doit être caractérisé :

- . par sa **pression**  $p$  [Pa], qui est normalement la *pression atmosphérique*, laquelle ne dépend que de l'altitude (voir **nA01.2**),
- . et par sa **température**  $\theta$  [°C], qui doit être fixée pour les calculs qui vont suivre.

### 3. L'ÉVALUATION SIMPLIFIÉE DES CARACTÉRISTIQUES

La **masse volumique de l'air réel**  $m'''$  peut être évaluée à partir de la **masse volumique de l'air sec** au moyen de la formule suivante :

$$m''' = m_a''' - \psi \Delta,$$

- .  $m_a'''$  étant la *masse volumique de l'air sec* **nF01.6**,
- .  $\psi$  (= 0 à 1) étant l'*humidité relative*,
- .  $\Delta$  étant le *coefficient fourni par la table suivante*.

Il est également possible de procéder à un calcul plus puissant (voir **4**).

[°C] = $\Delta$ =	< -10 0	-10 0,001	-5 0,002	0 0,003	5 0,004
[°C] = $\Delta$ =	10 0,006	15 0,008	20 0,010	25 0,014	30 0,018
[°C] = $\Delta$ =	35 0,024	40 0,031	45 0,040	50 0,050	55 0,063

### 4. L'ÉVALUATION DÉTAILLÉE DES CARACTÉRISTIQUES

L'air réel étant assimilé à un mélange de gaz parfaits (d'air sec et de vapeur d'eau), la **masse volumique** et le **volume massique** peuvent être évalués au moyen de l'une des trois procédures suivantes :

4.1. Ou bien vous faites appel (sur une calculette ou autrement) à la formule de l'**encadré A01.F** (ci-dessous)

4.2/4.3. Ou bien vous faites appel aux **auxiliaires** qui vous seront présentés par la suite.

### Encadré F01.F. L'AIR RÉEL : MASSE VOLUMIQUE/VOLUME MASSIQUE

$pAt$  [Pa] = *pression* : normalement la pression atmosphérique normale (encadré **F01.A**)

$TC$  [°C] = *température Celsius* ;  $hspe$  [kg/kg] = *humidité spécifique* ;  $hrel$  = *humidité relative*

$mVol$  [kg/m<sup>3</sup>] = *masse volumique* ;  $Vmass$  [m<sup>3</sup>/kg] = *volume massique*

<**F01.F1**> Si l'humidité spécifique ( $hspe$ ) est connue :

$$mVol = 0,003483 * \{ (1 + hspe) / (1 + 1,6078 * hspe) \} * \{ pAt / (TC + 273,15) \}$$

$$Vmass = 1 / mVol = 287,055 * (TC + 273,15) * \{ (1 + 1,6078 * hspe) / (1 + hspe) \} / pAt$$

<**F01.F2**> Si l'humidité relative ( $hrel$ ) est connue, voyez les formules **F01.E1** ci-dessus.

## nF01.9. L'AIR NORMÉ

### LES CARACTÉRISTIQUES DE L'AIR NORMÉ

Il est, bien entendu, inutile de rechercher la masse volumique de l'air normé puisqu'elle est, par définition, égale à 1,20 [kg/m<sup>3</sup>]. Il en est de même pour le volume massique (égal à 0,8333 [m<sup>3</sup>/kg]). Par contre il est possible de calculer la température de cet air normé, en supposant connue l'altitude, c'est à dire la pression atmosphérique.

Le résultat est différent quand on aboutit : soit à l'air sec, soit à l'air moyen. Le calcul est également possible quand on aboutit à l'air réel, mais il faut alors connaître l'humidité spécifique - ce qui est rarement le cas. Pour toutes les évaluations utilisez l'encadré **F01.G**.

### Encadré F01.G. ÉQUIVALENTS EN AIR NORMÉ DE L'AIR SEC ET DE L'AIR MOYEN

$pAt$  [Pa] = *pression* : normalement la pression atmosphérique normale (encadré **F01.A**)

$TC$  [°C] = *température Celsius* ;  $hspe$  [kg/kg] = *humidité spécifique*

<**F01.G1**> Air sec équivalent :  $TC = \{ 0,0029025 * pAt \} - 273,15$

<**F01.G2**> Air moyen équivalent :

1. Calculer d'abord :  $TC = \{ 0,0029025 * pAt \} - 273,15$

2. Si  $TC \leq -15$  [°C], conservez le résultat.

3. Sinon si  $TC > 35$  [°C],  $TC = \{ 0,002885 * pAt \} - 273,15$

4. Sinon :  $TC = \{ 0,0029025 * \alpha * pAt \} - 273,15$

et évaluer  $\alpha$  par approches successives.

### L'APPLICATION AUX DÉBITS ET À LA VITESSE

Bien qu'il soit possible de traiter beaucoup de problèmes en assimilant l'air à de l'air sec ou en tenant compte de l'état réel (pression et humidité), cette procédure entraîne généralement des complications inutiles étant donné les précisions en cause. C'est la raison pour laquelle, par la suite, nous recommandons systématiquement l'utilisation de l'air normé pour tous les calculs.

### Encadré F01.H. PASSAGE AU DÉBIT NORMÉ

$mVol$  [kg/m<sup>3</sup>] = *masse volumique* ;  $qVh$  [m<sup>3</sup>/h] = *débit horaire d'air réel*

$qVhs$  [m<sup>3</sup>/h] = *débit horaire d'air sec* ;  $qVhm$  [m<sup>3</sup>/h] = *débit horaire d'air moyen*

$qN$  [m<sup>3</sup>/s] = *débit normé* ;  $A$  [m<sup>2</sup>] = *section d'écoulement* ;  $wN$  [m/s] = *vitesse normée*

<**F01.H1**> A partir du débit horaire en **air réel** (fiche **nF01.8**) :

$$qN = 0,000\ 231 * mVol * qVh$$

<**F01.H2**> A partir du débit horaire en **air sec** (fiche **nF01.6**) :

$$qN = 0,000\ 231 * mVol * qVhs$$

<**F01.H3**> A partir du débit horaire en **air moyen** (fiche **nF01.7**) :

$$qN = 0,000\ 231 * mVol * qVhm$$

## nF01.10. RÉCHAUFFEMENT/REFROIDISSEMENT DE L'AIR

### LA CONVENTION IMPORTANTE

Dans l'expression qui suit la **capacité thermique massique** de l'air (ex «chaleur massique», sinon «chaleur spécifique») est prise égale à 1,007 [J/kg K], alors qu'en réalité elle est comprise entre 1,006 et 1,008 selon la température (entre 0 et 40 °C) : *cette influence est négligée.*

### Encadré F01.J. RÉCHAUFFEMENT ET REFROIDISSEMENT DE L'AIR

$qh$  [m<sup>3</sup>/h] = débit horaire (français) d'air réel, sec ou moyen

$P$  [W] = puissance transmise à l'air (positive si réchauffement, négative si refroidissement)

$\Delta\theta$  [K] = variation de température (positive si réchauffement, négative si refroidissement)

<F01.J1> si la puissance est connue :  $\Delta\theta = 3,575 * P / (mVol * qh)$

<F01.J2> si la variation de température est connue :  $P = 0,297 * mVol * qh * \Delta\theta$

## nF01.11. PROPRIÉTÉS COMPLÉMENTAIRES DE L'AIR

### LA CAPACITÉ THERMIQUE

Comme nous l'avons indiqué à la fiche précédente (nA01.10) la **capacité thermique** de l'air peut être prise égale à :

$$c = 1,007 \text{ [J/kg K]}$$

### LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE

La **conductivité thermique** de l'air varie également assez peu avec la température, de 21 à 27 [W/m K] environ entre -20 et +40 [°C]. Nous adoptons ici - sauf précision contraire - la valeur :

$$\lambda = 24,0 \text{ [W/m K]}$$

### LA VISCOSITÉ CINÉMATIQUE

La **viscosité cinématique** de l'air varie également assez peu avec la température entre -20 et +40 [°C], : 12.10<sup>-6</sup> à 17.10<sup>-6</sup> [m<sup>2</sup>/s]. Nous adoptons ici - sauf précision contraire - la valeur :

$$\nu = 15.10^{-6} \text{ [m}^2\text{/s]}$$

### REMARQUES GÉNÉRALES

Dans tous les encadrés, tels que le précédent, où il y a présentation de formules :

\* ... signifie «multiplier par ...»

/ ... signifie «diviser par ...»

^ ... signifie «mettre à la puissance ...»