

Roger Cadiergues

MémoCad nE01.a

L'AIR ET L'ATMOSPHERE

SOMMAIRE

nE01.1. La composition de l'air

nE01.2. L'atmosphère

nE01.3. De l'air sec à l'air humide

nE01.4. Conversion des humidités



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».

nE01.1. 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 : O₂, N₂, H₂, Ar, etc., les principales étant les suivantes : N₂ (azote), $m_{mol} = 28,0134$; O₂ (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 :
 - . CO₂ (dioxyde de carbone), $m_{mol} = 44,0088$; CH₄ (méthane), $m_{mol} = 16,042$;
 - . N₂O (monoxyde d'azote), $m_{mol} = 44,1128$; H₂O (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 ₂)	0,781 10	eau (extérieur) (H ₂ O)	de 0 à 0,07
oxygène (O ₂)	0,209 53	dioxyde de carbone (CO ₂)	de 0,001 à 0,0001
argon (Ar)	0,009 34	dioxyde de soufre (SO ₂)	de 0 à 0,000 001
néon (Ne)	0,000 01818	ozone (O ₃)	de 0 à 0,000 000 1
hélium (He)	0,000 00524	dioxyde d'azote (NO ₂)	traces
krypton (Kr)	0,000 00114		
xénon (Xe)	0,000 000 087		
hydrogène (H ₂)	0,000 000 5		
méthane (CH ₄)	0,000 002		
monoxyde d'azote (N ₂ 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).

nE01.2. L'ATMOSPHÈRE

LES CONVENTIONS GÉNÉRALES

1. Dans tous les calculs aérauliques (ce qui distingue ce domaine de celui des l'air comprimé) la pression de l'air est la **pression atmosphérique normale** (voir fiche nE01.4).
2. Dans les calculs aérauliques, l'humidité de l'air - lorsqu'elle est prise en compte - peut être exprimée de différentes manières comme indiqué plus loin.

L'ATMOSPHÈRE 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 ATMOSPHÉRIQUE 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 E01.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 E01.A** ci-dessous
- 3/4. Ou bien vous faites appel aux **auxiliaires** qui vous seront présentés par la suite.

E01.I. PRESSION ATMOSPHÉRIQUE 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 E01.A. PRESSION ATMOSPHÉRIQUE NORMALE

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

<E01.A>© $pat = 101325 * (1 - 0,0000 225577 * alt) ^ 5.2554876$

REMARQUES GÉNÉRALES

Dans tous les encadrés, tels que le précédent (E01.A) où il y a présentation de formules :

* ... signifie «multiplier par ...»

/ ... signifie «diviser par ...»

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

nE01.3. 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** [kg_h/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 ψ (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_{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** (ψ), 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_{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 : $p_{\text{sat},\theta}$ (voir définition de l'humidité relative). Vous disposez de 4 méthodes d'évaluation.

1. Ou bien vous faites appel à la **table E01.II** (page suivante) fournissant les valeurs de $p_{\text{sat},\theta}$,
2. Ou bien vous faites appel (sur calculatrice ou autrement) à l'**encadré E01.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 calculatrice ou autrement) à l'**encadré E01.C** de la page suivante,
- 2/3. Ou bien vous faites appel aux **auxiliaires** qui vous seront présentés par la suite.

nE01.4. CONVERSIONS DES HUMIDITÉS

LA PRESSION DE VAPEUR SATURANTE

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

E01.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
-20	103,26	0	611,15	20	2338,8	40	7383,5
-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
-10	259,90	10	1228,0	30	4246,0	50	12349,9

Encadré E01.B. PRESSION DE VAPEUR SATURANTE DE L'EAU

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

<E01.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 E01.C. HUMIDITÉ RELATIVE <-> HUMIDITÉ SPÉCIFIQUE

$psat$ [Pa] = pression de vapeur saturante (fonction de la température TC [°C] : encadré E01.B)

pAt [Pa] = pression atmosphérique normale (fonction de l'altitude alt [m] : encadré E01.A)

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

<E01.C1> de l'humidité relative à l'humidité spécifique :

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

<E01.C2> de l'humidité spécifique à l'humidité relative :

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

