

Roger Cadiergues

MémoCad nE02.a

LES «AIRS» ET LEURS PROPRIÉTÉS

SOMMAIRE

- nE02.1.** L'air et ses formes
- nE02.2.** L'air sec
- nE02.3.** L'air moyen
- nE02.4.** L'air réel
- nE02.5.** L'air normé
- nE02.6.** Réchauffement/refroidissement de l'air
- nE02.7.** 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».

nE02.1. L'AIR ET SES FORMES

POURQUOI «LES AIRS»

L'air réel étant un mélange assez complexe (voir livret nE01a : *L'air et l'atmosphère*), afin de circonscrire les difficultés qui peuvent en résulter il est souvent commode 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 (voir nE01).
2. L'**air sec**. D'assez nombreux calculs du génie climatique, tentant d'éviter les difficultés, négligent l'humidité, et parlent «d'**air sec**». C'est le mélange des constituants qui sont dits «permanents» dans l'analyse de l'air (voir nE01), 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 «d'**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 «l'**air normé**» : il s'agit d'un air dont la masse volumique est exactement égale à 1,20 [kg/m³]. Cette convention est surtout utilisée pour définir les **débits 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/m³].

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 nE02.2),
- . la **masse volumique** et le **volume massique** de l'**air réel** (page nE02.2),
- . la **masse volumique** et le **volume massique** de l'**air moyen** (page nE02.2),
- . auxquels il faut ajouter l'état «**normé**», examiné page nE02.2 .

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/m³]. On utilise parfois son inverse, le **volume massique** mesuré en mètre cube par kilogramme [m³/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** [m³] de N **kilomoles** [kmol].
- . θ 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^* [m³/kg] :

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

nE02.2. 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 E02.A** (ci-dessous)
- 2/3. Ou bien vous faites appel aux **auxiliaires** qui vous seront présentés par la suite.

Encadré E02.A. L'AIR SEC : MASSE VOLUMIQUE/VOLUME MASSIQUE

pAt [Pa] = *pression* : normalement la pression atmosphérique normale (encadré **E01.A**)

TC [°C] = *température Celsius* ; $mVol$ [kg/m³] = *masse volumique* ;

$Vmass$ [m³/kg] = *volume massique*

$$\langle \mathbf{E02.A} \rangle \quad mVol = 0,003483 * pAt / (TC + 273,15)$$

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

nE02.3. L'AIR MOYEN

LA PREMIÈRE DÉFINITION DE L'AIR MOYEN

Les formules relatives à l'air réel (voir **nE02.4**) aboutissant à des expressions 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/m³] 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 E02.B** ci-dessous, mais vous pourrez également utiliser les **auxiliaires** qui vous seront présentés par la suite.

Encadré E02.B. L'AIR MOYEN : MASSE VOLUMIQUE/VOLUME MASSIQUE

pAt [Pa] = *pression* : normalement la pression atmosphérique normale (encadré **E01.A**)

TC [°C] = *température Celsius* ; $mVol$ [kg/m³] = *masse volumique* ; $Vmass$ [m³/kg] = *volume massique*

$$\langle \mathbf{E02.B1} \rangle \quad mVol = 0,003483 * \alpha * pAt / (TC + 273,15)$$

avec :

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

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

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

$$\langle \mathbf{E02.B2} \rangle \quad Vmass = 1 / mVol$$

nE02.4. 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**, ψ , mesurée en valeur absolue (et non en pourcent), variant de 0 à 1.

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 **mE01**),
- . et par sa **température** θ [°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* (**nE02.2**),
- . ψ (= 0 à 1) étant l'*humidité relative*,
- . Δ étant le *coefficient fourni par la table suivante*.

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

| | | | | | |
|----------------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| [°C] = Δ = | < -10 0 | -10 0,001 | -5 0,002 | 0 0,003 | 5 0,004 |
| [°C] = Δ = | 10 0,006 | 15 0,008 | 20 0,010 | 25 0,014 | 30 0,018 |
| [°C] = Δ = | 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 E02.C** (ci-dessous)

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

Encadré E02.C. L'AIR RÉEL : MASSE VOLUMIQUE/VOLUME MASSIQUE

pAt [Pa] = *pression* : normalement la pression atmosphérique normale (encadré **E01.A**)

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

$mVol$ [kg/m³] = *masse volumique* ; $Vmass$ [m³/kg] = *volume massique*

<**E02.C1**> Si l'humidité spécifique ($hspe$) connue :

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

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

<**E02.C2**> Si l'humidité relative ($hrel$) est connue, voyez les formules **E02.C1** ci-dessus.

nE02.5. 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/m³]. Il en est de même pour le volume massique (égal à 0,8333 [m³/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 **E02D**.

Encadré E02.D. ÉQUIVALENTS EN AIR NORMÉ DE L'AIR SEC ET DE L'AIR MOYEN

pAt [Pa] = pression : normalement la pression atmosphérique normale (encadré **E01.A**)

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

<**E02.D1**> Air sec équivalent : $TC = \{ 0,0029025 * pAt \} - 273,15$

<**E02.D2**> 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 α par approches successives (voir **E02.3**)

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 E02.E. PASSAGE AU DÉBIT NORMÉ

$mVol$ [kg/m³] = masse volumique ; qVh [m³/h] = débit horaire d'air réel

$qVhs$ [m³/h] = débit horaire d'air sec ; $qVhm$ [m³/h] = débit horaire d'air moyen

qN [m³/s] = débit normé ; A [m²] = section d'écoulement ; wN [m/s] = vitesse normée

<**E02.E1**> A partir du débit horaire en **air réel** (encadré **02.C**) :

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

<**E02.E1**> A partir du débit horaire en **air sec** (encadré **02.A**) :

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

<**E02.E1**> A partir du débit horaire en **air moyen** (encadré **02.B**) :

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

nE02.6. 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 E02.F. RÉCHAUFFEMENT ET REFROIDISSEMENT DE L'AIR

qh [m³/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)

<E02.F1> si la puissance est connue : $\Delta\theta = 3,575 * P / (mVol * qh)$

<E02.F2> si la variation de température est connue : $P = 0,297 * mVol * qh * \Delta\theta$

nE02.7. PROPRIÉTÉS COMPLÉMENTAIRES DE L'AIR

LA CAPACITÉ THERMIQUE

Comme indiqué à la fiche précédente (nE02.6) la **capacité thermique** de l'air peut être prise égale à :
 $c = 1,007$ [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 la valeur :

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

LA VISCOSITÉ CINÉMATIQUE

La **viscosité cinématique** de l'air varie également assez peu avec la température entre -20 et +40 [°C], : 12.10⁻⁶ à 17.10⁻⁶ [m²/s]. Nous adoptons ici la valeur :

$$\nu = 15.10^{-6}$$
 [m²/s]

REMARQUES GÉNÉRALES

Dans tous les encadrés, tels que le précédent (E02.A, où il y a présentation de formules :

* ... signifie «multiplier par ...»

/ ... signifie «diviser par ...»

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