

**Roger Cadiergues**

**MémoCad nE03.a**

# L'AIR ET L'AÉRAULIQUE

## SOMMAIRE

- nE03.1.** Les applications de l'aéraulique
- nE03.2.** L'utilisation des débits
- nE03.3.** Ecoulements : débits et vitesses
- nE03.4.** Vitesses et pressions
- nE03.5.** Les pressions dans les écoulements
- nE03.6.** Réchauffage et refroidissement de l'air
- nE03.7.** Formules de référence



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».

## nE03.1. LES APPLICATIONS DE L'AÉRAULIQUE

### LES BASES INDISPENSABLES

Le présent livret suppose acquises un certain nombre de notions définies dans les bases suivantes.

. Pour la *composition de l'air*, la *pression atmosphérique*, l'*air humide face à l'air sec*, consultez le livret :

**nE01. L'air et l'atmosphère.**

. Pour la définition de l'air sec, de l'air moyen, de l'air réel et de l'air normé, ainsi que de leurs conversions, consultez le livret :

**nE02. Les airs et leurs propriétés.**

### CE QU'EST L'AÉRAULIQUE

C'est au cours des années 1930 que Roger Goenaga a forgé le terme «**aéraulique**» afin de couvrir toutes les techniques (ventilation, etc.) utilisant et manipulant l'air à une pression très voisine de la pression atmosphérique. Ce qui distingue ce domaine de ceux de l'*air comprimé* ou des techniques «*sous vide*».

Pour étudier valablement les installations aérauliques (intérieures) il faut souvent prendre en compte les relations avec l'air extérieur, faisant appel à un certain nombre de notions fondamentales qui sont exposées dans le livret :

**nE04. L'aéraulique et l'atmosphère extérieure**

### LES INSTALLATIONS AÉRAULIQUES

L'aéraulique fait appel à un certain nombre de **composants**, le principaux étant les suivants :

. les **bouches** et **diffuseurs** traités dans le livret :

**nE06. La diffusion de l'air**

. les **conduits d'air** traités dans le livret :

**nE07. Les conduits d'air**

. les **ventilateurs** traités dans le livret :

**mE08. Les ventilateurs**

. les **filtres** traités dans le livret :

**nE09. La filtration de l'air**

### UN COMPLÉMENT ESSENTIEL : LA QUALITÉ DE L'AIR

Dans ce livret nous classons à part, et en complément, tout ce qui concerne les problèmes de *qualité de l'air intérieur*, un ensemble très varié (livrets **mE10** à **mE17**) présentés dans le livret de synthèse :

**nE20. La qualité de l'air intérieur**

suivi d'un certain nombre de livrets (**nE21** et la suite) consacrés aux différents aspects de la qualité de l'air intérieur (contamination gazeuse, monoxyde de carbone, composés organiques volatils, odeurs, particules, biocontaminants, radon, ...).

### LES APPLICATIONS DE L'AÉRAULIQUE

L'aéraulique est le domaine fondamental :

. des installations de *ventilation* et *désenfumage*, relevant de techniques très nombreuses présentées au livret :

**nE40. La ventilation,**

. des installations de *chauffage à air chaud* et de *climatisation utilisant l'air*, techniques présentées dans des livrets ultérieurs.

## nE03.2. L'UTILISATION DES DÉBITS

### NOS CONVENTIONS ESSENTIELLES

Avant tout examen de détail il convient de noter trois conventions essentielles.

1. Nous utilisons le plus souvent possible, les **débites normés**, définis comme les débits-volume de l'air en cause si sa masse volumique était portée à exactement 1,20 [kg/m<sup>3</sup>].
2. Nous utilisons de préférence les débits en **mètre cube par seconde** [m<sup>3</sup>/s], et à la rigueur - et par dérogation - les débits horaires [m<sup>3</sup>/h] d'usage hélas fréquent en France, réglementation comprise.
3. Nous utilisons, en principe, le concept d'**air moyen**, défini au livret nE02 (§ nE02.3), mais on peut également utiliser le concept d'**air sec** (voir livret nE02).

### LES «DIFFÉRENGTS» DÉBITS

Les conventions diverses, plus certaines habitudes typiquement françaises font que les **débites** peuvent s'exprimer de *différentes* manières. Voici les débits utilisés ici ou là, avec les symboles utilisés par la suite, *dans le texte* :

- .  $q$  [kg/s] est le *débit-masse*,
- .  $q_v$  [m<sup>3</sup>/s] est le *débit-volume* au sens normal (au plan international, l'unité de temps est la seconde),
- .  $q_L$  [L/s] le débit-volume mesuré en *litre par seconde*,
- .  $q_h$  [m<sup>3</sup>/h] le *débit horaire* (débit-volume **par heure**).

Il peut en résulter des confusions, ce qui nous incite à vous recommander de toujours indiquer les unités.

### Encadré E03.A. CONVERSION DES DÉBITS

$mVol$  [kg/m<sup>3</sup>] = *masse volumique* (encadrés **2.x**) ;  $q$  [kg/s] = *débit-masse*

$q_v$  [m<sup>3</sup>/s] = *débit-volume* ;  $q_L$  [L/s] = *débit en litre par seconde* ;  $q_h$  [m<sup>3</sup>/h] = *débit horaire*

<E03.A>	$q = mVol * q_v$ ;	$q = (0.001 * mVol) * q_L$ ;	$q = (mVol / 3600) * q_h$
	$q_v = (1 / mVol) * q$ ;	$q_v = 0.001 * q_L$ ;	$q_v = (1 / 3600) * q_h$
	$q_L = (1000 / mVol) * q$ ;	$q_L = 1000 * q_v$ ;	$q_L = (1/3,6) * q_h$
	$q_h = (3600 / mVol) * q$ ;	$q_h = 3600 * q_v$ ;	$q_h = 3,6 * q_L$

### LA VALEUR DE BASE DANS MÉMOCAD

Dans la suite des livrets sur l'aéraulique et la ventilation :

- nous utiliserons pour les **calculs aérauliques** les débits d'**air normé**, exprimés en **mètre cube par seconde** [m<sup>3</sup>/s], notés  $q_A$  ;
- nous utiliserons pour les **calculs de ventilation** (en je regrettant) les débits d'**air normé** exprimés en **mètre cube par heure** [m<sup>3</sup>/h], notés  $q_v$ .

Dans le cas où, partant des données «ventilation», vous devez effectuer des calculs aérauliques, il faut transformer les débits «ventilation» en débits «aérauliques» : l'encadré ci-dessous en fournit la formule pratique.

### Encadré E03.B. TRANSFORMATION DES DÉBITS DE VENTILATION

$q_v$  [m<sup>3</sup>/h] = *débit-ventilation* ;  $q_A$  [m<sup>3</sup>/s] = *débit-aéraulique*

<E03.B>  $q_A = q_v / 3600$

## nE03.3. ÉCOULEMENTS : DÉBITS ET VITESSES

### LES DÉBITS

Normalement les débits d'air devraient être mesurés en **mètre cube par seconde** [m<sup>3</sup>/s], mais en France l'habitude s'est prise (dans notre secteur) de les exprimer en **mètre cube par heure** [m<sup>3</sup>/h]. La relation que nous utiliserons par la suite est la suivante :

$$[\text{m}^3/\text{s}] = [\text{m}^3/\text{h}] / 3600.$$

#### \* Les autres expressions du débit d'air

Il est fréquent que les débits soient exprimés différemment, les autres expressions utilisées, ainsi que les symboles que nous adoptons, sont les suivants.

. **débit horaire** [m<sup>3</sup>/h] :  $q_h$

. **débit** (de référence) [m<sup>3</sup>/s] :  $q_v (= q_h / 3600)$

. **débit-masse** [kg/s] :  $q (= \rho q_v)$ ,  $\rho$  étant la masse volumique de l'air [kg/m<sup>3</sup>].

A ces grandeurs il faut ajouter le **débit normé**.

#### \* Le débit normé

Il est courant, en France, d'utiliser ce que nous appelons le **débit normé**. C'est le débit qu'aurait l'air en cause si sa masse volumique était ramenée à 1,20 [kg/m<sup>3</sup>]. Si l'air possède la masse volumique  $\rho$ , avec les conventions françaises, le **débit normé**  $q_N$  [m<sup>3</sup>/h] vaut :

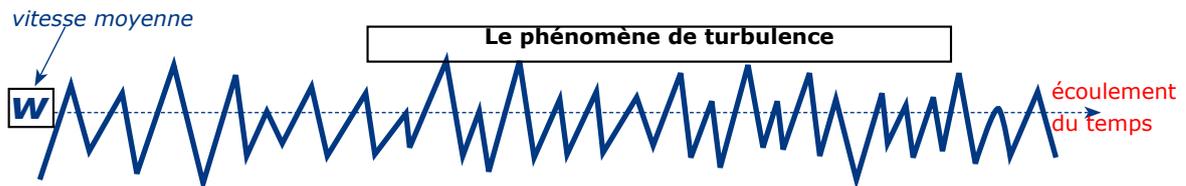
$$q_N = (\rho / 1,20) q_h$$

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] étant la *masse volumique réelle* de l'air, et  $q_h$  le *débit horaire réel* [m<sup>3</sup>/h].

### LES VITESSES

La majorité des écoulements d'air sont turbulents, en ce sens que la vitesse oscille en permanence.

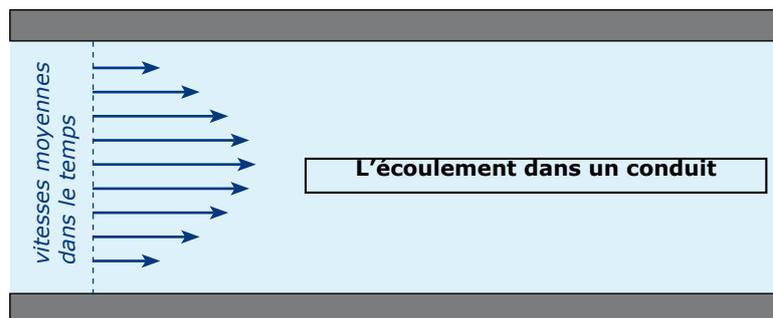
Dans ce cas ce qu'on appelle **vitesse de l'air**  $w$  [m/s] est la moyenne dans le temps (voir schéma ci-dessous) : la plupart du temps ce qu'on appelle la vitesse de l'air est en fait sa moyenne dans le temps en un point donné.



Lorsque l'air s'écoule dans un conduit, en dehors même du phénomène dessous. Dans ce cas, et par convention la **vitesse moyenne**  $w$  [m/s] **dans le conduit** est la valeur définie par la relation suivante,  $q_v$  étant le débit [m<sup>3</sup>/s] :

$$w = q_v / A$$

$A$  [m<sup>2</sup>] étant la section du conduit.



En principe la vitesse moyenne est la moyenne des vitesses constatées sur les différents filets, mais il vaut mieux utiliser la formule divisant le débit par la section.

Attention, cette définition est tout à fait conventionnelle, et ne doit être utilisée qu'avec précaution.

Dans bien des cas le débit est connu et c'est la formule suivante qu'il faut utiliser :  $w = q_v / A$ .

Attention également au fait que, dans la formule précédente, le débit doit être exprimé en mètres cube par seconde. Or :

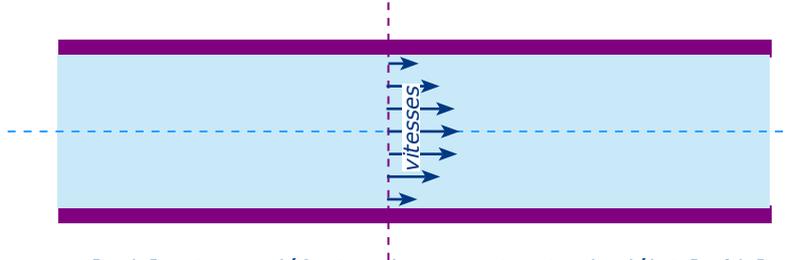
. en France, de tels débits sont souvent exprimés en mètres cube par heure,

. et parfois, dans *certains pays*, en litres par seconde.

## nE03.4. VITESSES ET PRESSIONS

### DES VITESSES RÉELLES À LA VITESSE MOYENNE

Dans le cas le plus simple, celui d'un conduit rectiligne, les vitesses varient comme indiqué au schéma ci-dessous, allant de la valeur maximale dans l'axe à une valeur nulle sur les bords. Malgré cette variation il est habituel d'utiliser un concept simplifié : la **vitesse moyenne**.



Cette vitesse moyenne  $w$  [m/s] est, par définition le rapport entre le débit [m<sup>3</sup>/s] et la section [m<sup>2</sup>]. La difficulté de principe est qu'il faut faire intervenir la vitesse réelle  $w$  alors que le débit dont nous allons tenir compte est le débit aéraulique que nous prenons ici, théorique parce que correspondant à l'état normé et non pas à l'état réel. L'encadré ci-dessous (nE03.C) permet d'éviter toutes les difficultés.

### Encadré E03.C. CALCUL DE LA VITESSE RÉELLE

$w_A$  [m/s] = vitesse-aéraulique ;  $q_A$  [m<sup>3</sup>/s] = débit-aéraulique ;  $A$  [m<sup>2</sup>] = section du conduit  
 $mvol$  [kg/m<sup>3</sup>] = masse volumique de l'air (voir E02.C) ;  $w$  [m/s] = vitesse réelle

<E03.C1>

$$w_A = q_A / A$$

<E03.C2>

$$w = (1,2 / mvol) w_A$$

## nE03.5. LES PRESSIONS DANS LES ÉCOULEMENTS

### LA PRESSION DYNAMIQUE

La **pression dynamique** dans un écoulement, notée ici  $p_{dyn}$  [Pa], est définie par la formule suivante :

$$p_{dyn} = 0,5 \rho w^2$$

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] étant la *masse volumique réelle* de l'air (voir § 1.02), et  $w$  [m/s] la vitesse (§ 1.05). Elle permet de définir la «pression totale» (voir plus loin).

### LA PRESSION (STATIQUE)

La pression de l'air, dans une enceinte ou dans un écoulement, peut être caractérisée par sa pression au sens strict (§ 1.03), mais elle est souvent exprimée en «**pression efficace**»  $p_{ef}$  [Pa], définie par la relation suivante :

$$p_{ef} = p - p_{at}$$

$p$  [Pa] étant la pression (dite «statique») vraie,

$p_{at}$  [Pa] étant la pression atmosphérique.

### LA PRESSION TOTALE

Avec les conventions précédentes la **pression totale** en un point, pression notée  $p_{tot}$  [Pa], vaut :

$$p_{tot} = p_{ef} + p_{dyn} = p_{ef} + 0,5 \rho w^2$$

Cette pression totale (souvent appelée «charge» par erreur) sert à l'étude des réseaux aérauliques, et en particulier à la conception et au dimensionnement des installations de ventilation.

## nE03.6. RÉCHAUFFEMENT ET REFROIDISSEMENT DE L'AIR

### LA FORMULE DE BASE

Les calculs de réchauffement, ou refroidissement, reposent sur l'utilisation de la **capacité thermique massique**  $C^*$  [J/kg K]. Cette capacité (jadis appelée «*chaleur massique*» ou «*chaleur spécifique*») varie entre 1004 et 1006 [J/kg K]. Nous adoptons ici la valeur moyenne de 1005, cette approximation étant très largement suffisante dans le cas considéré.

La formule que nous adoptons repose sur les notations suivantes :

- .  $P$  [W] est la **puissance**, en watt, transmise à l'air, positive s'il s'agit d'un réchauffement, négative s'il s'agit d'un refroidissement,
- .  $\Delta\theta$  [K] représente l'**évolution de température** (positive dans le cas de réchauffement, négative dans le cas de refroidissement).

La formule de base est la suivante :

$$\Delta\theta = P / (1005 m''' q_v)$$

où  $m'''$  [kg/m<sup>3</sup>] est la **masse volumique** et  $q_v$  [m<sup>3</sup>/s] le **débit-volume**.

### L'EMPLOI DE LA FORMULE

La formule de base peut être :

- . utilisée directement pour calculer  $\Delta\theta$  quand on connaît la puissance  $P$  mise en jeu (*attention aux conventions de signe*),
- . ou inversée pour calculer la puissance à fournir  $P$  quand on connaît l'évolution de température  $\Delta\theta$  recherchée :

$$P = 1005 m''' q_v \Delta\theta$$

Si le débit connu n'est pas  $q_v$ , mais d'autres débits il faut utiliser les formules de la fiche **mE01.07** pour déterminer d'abord  $q_v$ .

## nE03.7. FORMULES DE RÉFÉRENCE

Toutes les formules de ce livret reposent sur les principes suivants.

### ÉLÉMENTS DE BASE : LES GAZ PARFAITS

Dans toutes les formules qui précèdent l'**air sec** aussi bien que la **vapeur d'eau** sont considérés comme des **gaz parfaits**. Ils suivent, de ce fait, les lois suivantes, lois qui fixent la **pression**  $p$  en pascal [Pa] et la **masse**  $m$  en kilogramme [kg] occupant le **volume**  $V$  [m<sup>3</sup>] et contenant  $N$  **kilomoles** [kmol] de gaz,  $\theta$  étant la **température** [°C] et  $m^M$  [kg/kmol] la **masse molaire** du gaz (28,9645 [kg/kmol]):

$$p V = 8314,41 N (\theta + 273,25)$$

$$m = N m^M$$

On en déduit aisément que le **volume massique**  $V^*$  [m<sup>3</sup>/kg], égal au rapport  $V/m$ , vaut :

$$V^* = (8314,41/m^M) \cdot (\theta + 273,15) / p = 287,055 (\theta + 273,15) / p$$

la **masse volumique**  $m'''$  [kg/m<sup>3</sup>] étant l'inverse ( $= 1/V^*$ ) :

$$m''' = 0,0034837 p / (\theta + 273,15)$$

L'application au mélange d'air sec et de vapeur d'eau (mélange de gaz parfaits) oblige à tenir compte de ce que l'air sec et l'humidité sont un mélange. Ce qui conduit aux conclusions suivantes.

### APPLICATIONS À L'AIR SEC ET À LA VAPEUR D'EAU

Dans la limite où l'air sec et la vapeur d'eau sont des gaz parfaits, on peut considérer que chaque composant correspond aux pressions partielles suivantes :

- .  $p_a$  [Pa] pour l'air sec,
- .  $p_v$  [Pa] pour la vapeur d'eau.

L'ensemble étant à la pression atmosphérique  $p_{at}$  [Pa] on peut également prendre  $p_v$  (la vapeur d'eau) comme paramètre, la pression de l'air sec s'en déduisant automatiquement par la relation suivante :

$$p_a = p_{at} - p_v$$

D'où, finalement, compte tenu des lois des gaz parfaits :

- . pour l'**air sec** ( $m^M = 28,9645$  [kg/kmol]) :
- $$V_a^* = 287,055 (\theta + 273,15) / (p_{at} - p_v)$$
- . pour la **vapeur d'eau** ( $m^M = 18,01528$  [kg/kmol])
- $$V_h^* = 461,520 (\theta + 273,15) / p_v$$

le volume massique de l'air humide  $V^*$  [m<sup>3</sup>/kg] valant :

$$V^* = V_a^* + V_h^* = [ \{ 287,055 / (p_{at} - p_v) \} + \{ 461,520 / p_v \} ] (\theta + 273,15)$$

Toutes les formules faisant intervenir l'humidité avec précision reposent sur cette relation.