

Roger Cadiergues

MémoCad nF00.a

L'AÉRAULIQUE

SOMMAIRE

- nF00.1.** L'aéraulique et ses applications
- nF00.2.** Terminologie des airs et calculs aérauliques
- nF00.3.** L'utilisation des débits
- nF00.4.** Ecoulements : débits et vitesses
- nF00.5.** Vitesses et pressions
- nF00.6.** Les pressions dans les écoulements
- nF00.7.** Réchauffage et refroidissement de l'air
- nF00.8.** 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».

nF00.1. L'AÉRAULIQUE ET SES APPLICATIONS

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 :

nF01. Les propriétés de l'air .

Ce livret définit ce que sont : l'air sec, l'air moyen, l'air réel et l'air normé. Il indique également comment réaliser les conversions.

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 :

nF02, L'aéraulique et l'atmosphère extérieure

LES INSTALLATIONS AÉRAULIQUES

Les réseaux aérauliques sont constitués d'un certain nombre de composants, que nous classerons en deux catégories : les «composants de base» et les «composants complémentaires».

1. Les composants de base sont les suivants :

. les **bouches** et **diffuseurs**, servant à assurer dans les locaux desservis un comportement satisfaisant de l'air au soufflage comme à l'extraction, traités dans le livret :

nF03, La diffusion de l'air

. les **conduits d'air**, ou **conduits aérauliques**, constituant souvent l'essentiel des réseaux, qui sont traités dans le livret :

nF04. Les conduits d'air

. les **ventilateurs**, servant à animer la circulation d'air dans les réseaux, traités dans le livret :

nF05. Les ventilateurs.

2. Les composants complémentaires sont les suivants :

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

nF06. La filtration de l'air

. les **échangeurs thermiques** traités dans le livret :

nF07. Les échangeurs thermiques sur l'air

LES APPLICATIONS DE L'AÉRAULIQUE

L'aéraulique est, surtout, le domaine fondamental dans deux groupes d'applications :

1. les installations de **ventilation** relevant de techniques très nombreuses présentées dans les livrets de la classe **V**,

. et les installations de **désenfumage**, présentées également dans les livrets de la classe **V**.

2. L'aéraulique est également le domaine de base d'un certain nombre de techniques plus larges, pour l'essentiel, avec une présentation dans les livrets spécialisés :

. le **chauffage à air chaud**,

. la **climatisation** (systèmes tout air ou air-eau).

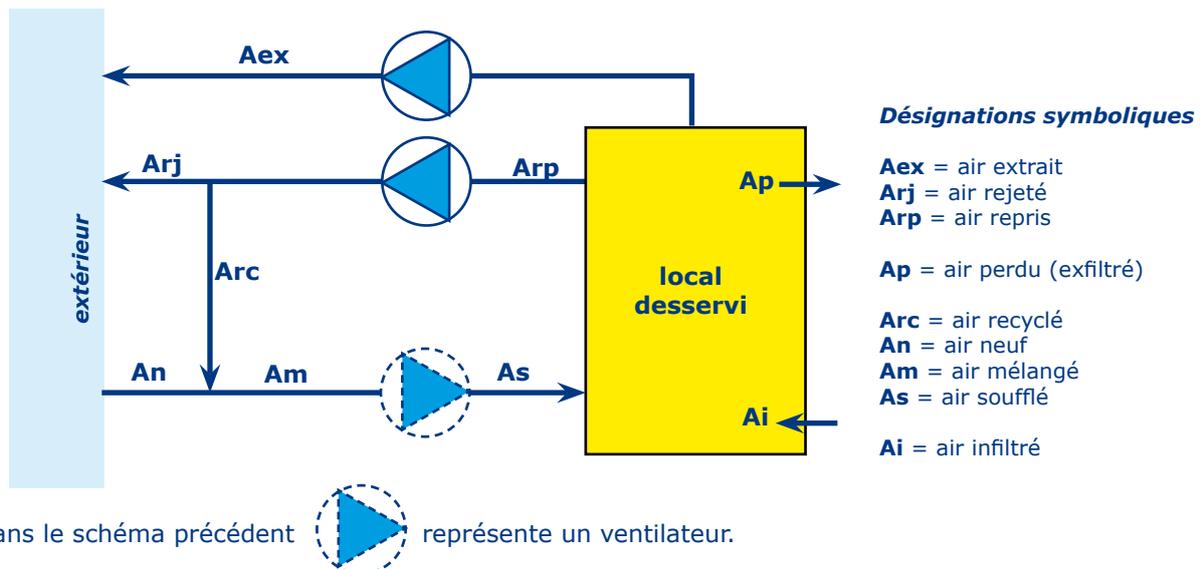
UN COMPLÉMENT : LA QUALITÉ DE L'AIR

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 couvert par des livrets de la classe **V**, livrets consacrés aux différents aspects de la qualité de l'air intérieur (contamination gazeuse, monoxyde de carbone, composés organiques volatils, odeurs, particules, biocontaminants, radon, ...).

nF00.2. TERMINOLOGIE DES AIRS ET CALCULS AÉRAULIQUES

LES RÉSEAUX AÉRAULIQUES

La conception correcte des réseaux aérauliques implique une **terminologie** précise, en particulier quand on met en jeu les aspects «ventilation». Cette terminologie varie beaucoup selon les pays et selon les auteurs. La terminologie que nous adopterons, mise au point par l'auteur, est celle qui est généralement utilisée en France. Elle s'appuie sur la définition des différents «airs» indiquée au schéma symbolique suivant.



Notez que le schéma général précédent vise à regrouper tous les airs existant alors que dans les applications pratiques - sauf exception - seuls certains «airs» sont présents.

LE CALCUL DES RÉSEAUX

Le dimensionnement des ensembles aérauliques peut être assez laborieux, s'effectuant normalement comme suit dans le cas le plus général.

1. Les débits d'air en cause sont d'abord déterminés selon les besoins, (pouvant se cumuler) :
 - . les *débits de ventilation* (voir **nV20**), fixés pour des raisons d'hygiène ou de confort,
 - . les débits permettant de satisfaire aux *charges thermiques d'hiver* (voir **nH20**) et/ou aux *charges thermiques d'été* (voir **nC20**).
2. On dimensionne alors les *filtres* (voir **nV16**) et les *échangeurs* (voir **nV17**) placés sur le réseau.
3. On dimensionne ensuite le réseau, en fait les conduits (leur section) en fonction des débits précédemment calculés, ce dimensionnement faisant intervenir, sous une forme indiquée plus loin :
 - . les *pertes de charge* dans le réseau,
 - . les *bruits* engendrés par la circulation d'air.

LE RÔLE DE LA CHARGE

La **pression totale** (ou **charge**) p_{tot} [Pa] dans une section d'écoulement, s'écrit traditionnellement :

$$p_{\text{tot}} = p + m_{\text{vol}} \cdot w^2 / 2$$

p [Pa] étant la pression, m_{vol} [kg/m³] étant la masse volumique de l'air, et w [m/s] sa vitesse.

La charge, normalement exprimée en pascal, est en fait une énergie volumique [J/m³]. Par suite de frottements divers cette énergie se consume progressivement dans l'écoulement ; c'est la «*perte de charge*». C'est en dimensionnant (et configurant) le réseau aéraulique que l'on maîtrise cette perte de charge, son calcul permettant de déterminer le **ventilateur**.

LE RÔLE DE L'ACOUSTIQUE

Si l'on se limite au dimensionnement précédent, basé uniquement sur la charge, on néglige un deuxième aspect du bon fonctionnement : le **bruit** créé par la circulation de l'air. De ce fait le dimensionnement correct implique une prise en compte acoustique, traitée au livret **nV18**.

nF00.3. 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/m³].
2. Nous utilisons de préférence les débits en **mètre cube par seconde** [m³/s], et à la rigueur - et par dérogation - les débits horaires [m³/h] d'usage hélas fréquent en France, réglementation comprise.
3. Nous utilisons, en principe, le concept d'**air moyen**, défini au livret nF10 (§ nF10.3), mais on peut également utiliser le concept d'**air sec** (voir livret nF10).

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 [m³/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 [m³/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 F00.A. CONVERSION DES DÉBITS

$mVol$ [kg/m³] = *masse volumique* (voir nF10) ; q [kg/s] = *débit-masse*

q_v [m³/s] = *débit-volume* ; q_L [L/s] = *débit en litre par seconde* ; q_h [m³/h] = *débit horaire*

<F00.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 le **calculs aérauliques** les débits d'**air normé**, exprimés en **mètre cube par seconde** [m³/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** [m³/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 F00.B. TRANSFORMATION DES DÉBITS DE VENTILATION

q_v [m³/h] = *débit-ventilation* ; q_A [m³/s] = *débit-aéraulique*

<F00.B> $q_A = q_v / 3600$

nF00.4. ÉCOULEMENTS : DÉBITS ET VITESSES

LES DÉBITS

Normalement les débits d'air devraient être mesurés en **mètre cube par seconde** [m³/s], mais en France l'habitude s'est prise (dans notre secteur) de les exprimer en **mètre cube par heure** [m³/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** [m³/h] : q_h

. **débit** (de référence) [m³/s] : $q_v (= q_h / 3600)$

. **débit-masse** [kg/s] : $q (= \rho q_v)$, ρ étant la masse volumique de l'air [kg/m³].

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/m³]. Si l'air possède la masse volumique ρ , avec les conventions françaises, le **débit normé** q_N [m³/h] vaut :

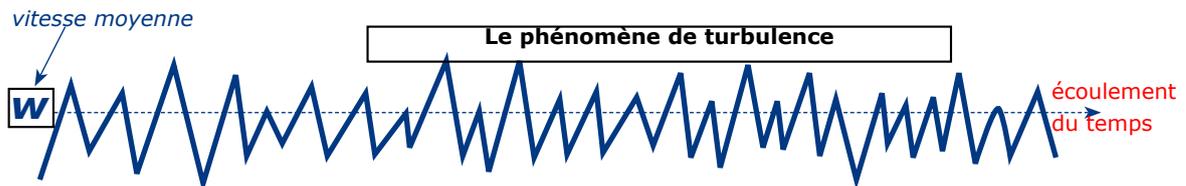
$$q_N = (\rho / 1,20) q_h$$

ρ [kg/m³] étant la *masse volumique réelle* de l'air, et q_h le *débit horaire réel* [m³/h].

LES VITESSES

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

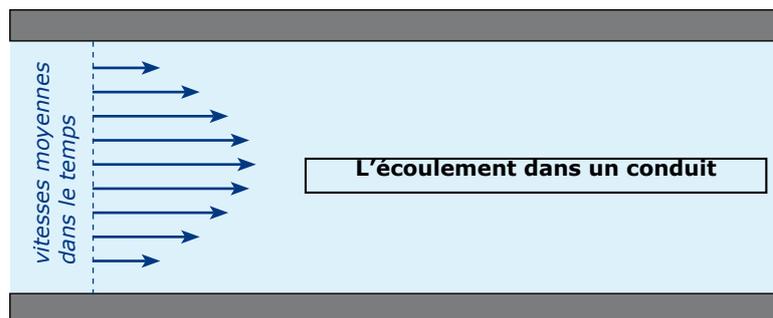
Dans ce cas ce qu'on appelle **vitesse de l'air** w [m/s] est la moyenne dans le temps (voir schéma ci-dessous) : la plupart du temps ce qu'on appelle la vitesse de l'air est en fait sa moyenne dans le temps en un point donné.



Lorsque l'air s'écoule dans un conduit, en dehors même du phénomène dessiné. 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 [m³/s] :

$$w = q_v / A$$

A [m²] 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 :

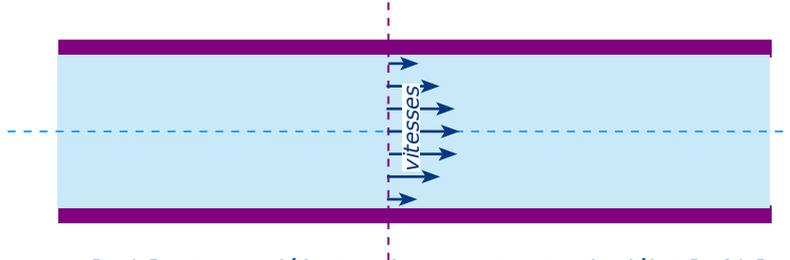
. en France, de tels débits sont souvent exprimés en mètres cube par heure,

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

nF00.5. 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 [m³/s] et la section [m²]. 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 (**nW11.C**) permet d'éviter toutes les difficultés.

Encadré F00.C. CALCUL DE LA VITESSE (MOYENNE) RÉELLE

w_A [m/s] = vitesse-aéraulique ; q_A [m³/s] = débit-aéraulique ; A [m²] = section du conduit
 $mvol$ [kg/m³] = masse volumique de l'air ; w [m/s] = vitesse réelle

<F00.C1>

$$w_A = q_A / A$$

<F00.C2>

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

nF00.5. 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 :

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

ρ [kg/m³] 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.

nF00.7. 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, approximation très largement suffisante dans le cas considéré. Les formules adoptées reposent sur les conventions 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).

Encadré F00.D. 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)

<F00.D1> si la puissance est connue : $\Delta\theta = 3,575 * P / (mVol * qh)$

<F00.D2> si la variation de température est connue : $P = 0,297 * mVol * qh * \Delta\theta$

nF00.8. 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 [m³] et contenant N **kilomoles** [kmol] de gaz, θ 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^* [m³/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/m³] 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^* [m³/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.

