

Roger Cadiergues

L'AIR ET L'AÉRAULIQUE



(Guide RefCad : nR41.a)



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».

TABLE DES MATIÈRES DU GUIDE

<i>Contenu</i>	<i>page</i>
1. L'aéraulique	3
1.1. L'aéraulique et ses subdivisions	3
1.2. Les installations aérauliques	3
1.3. Les grandeurs principales	3
1.4. La terminologie des airs	4
1.5. L'organisation de l'information	5
2. L'air	6
2.1. Rappels de base	6
2.2. L'atmosphère normale	7
2.3. La prise en compte de l'humidité	7
2.4. La pression de vapeur saturante	9
2.5. L	9
2.6. Les différentes «formes» de l'air	9
2.7. L'air sec	10
2.8. L'air réel	11
2.9. L'air moyen	12
2.10. L'air normé	12

<i>Contenu</i>	<i>page</i>
3. Les installations aérauliques	14
3.1. Perspectives d'ensemble	14
3.2. L'architecture des réseaux	14
3.3. Principes des réseaux	15
3.4. Ecoulements : débits et vitesses	16
3.5. Utilisation des débits	17
3.6. Vitesse moyenne et pressions	18
3.7. Réchauffement/refroidissement de l'air	19
3.8. Les formules de référence	19
4. L'atmosphère extérieure	20
4.1. La perméabilité à l'air	20
4.2. L'action du tirage	21
4.3. L'évaluation du tirage	21
4.4. La structure du vent	22
4.5. L'action du vent	22
4.6. Les aspects climatiques	23

Chapitre 1

1. L'AÉRAULIQUE

1.1. L'AÉRAULIQUE ET SES SUBDIVISIONS

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*».

LES BASES INDISPENSABLES

Pour étudier valablement les installations aérauliques (intérieures) il faut souvent :

- . bien connaître les propriétés de l'air (voir chapitre 2),
- . savoir analyser les réseaux aérauliques (voir chapitre 3 et tome 2),
- . prendre en compte les relations avec l'air extérieur, faisant appel à un certain nombre de notions fondamentales exposées au chapitre 4,

1.2. LES APPLICATIONS AÉRAULIQUES

L'aéraulique est fondamentale dans deux groupes d'applications :

1. les installations de **ventilation** relevant de techniques assez nombreuses présentées dans les guides de la classe **gV**, et les installations de **désenfumage**, présentées également dans les guides de la classe **gV**.

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 guides spécialisés :

- . le **chauffage à air chaud** (voir guides **gT**),
- . la **climatisation tout air ou air-eau** (voir guides **gC**).

1.3. LES GRANDEURS PRINCIPALES

LES PROPRIÉTÉS DE L'AIR

Pour analyser les systèmes aérauliques il faut souvent faire intervenir les propriétés de l'air, lesquelles impliquent fréquemment le recours à des calculs. Les principales unités sont indiquées ci-après, mais vous trouverez plus de détails au chapitre 2 (vous y trouverez, *en particulier*, les formules permettant les changements d'unité).

LES GRANDEURS NORMÉES

Pour éviter des calculs complexes une bonne partie des propriétés de l'air sont exprimées en «**valeurs normées**», ces dernières correspondant, non pas à l'état réel de l'air mais à l'état qu'il aurait si sa masse volumique était exactement égale à 1,20 [kg/m³]. C'est le cas de la grandeur fréquemment utilisée dans ce guide : le **débit normé**, exprimé en mètres cube par unité de temps.

LE CHOIX DE L'UNITÉ DE TEMPS

Dans beaucoup de calculs pratiques on utilise l'**heure** [h] comme unité de temps. Pour avoir une bonne homogénéité dans les calculs aérauliques nous conseillons d'utiliser la **seconde** [s]. C'est ainsi :

- . que nous évaluerons les **débites** en **mètre cube par seconde** [m³/s],
- . et les **vitesses** en **mètre par seconde** [m/s].

PRESSION ET GRANDEURS DÉRIVÉES

Les pressions, forces par unité de surface, seront ici exprimées en **pascal** [Pa], et ce bien que dans la pratique la plus classique on utilise souvent, pour les installations ici concernées, d'autres unités, et en particulier la «*hauteur d'eau*».

Lors de l'écoulement de l'air, dans les conduits ou appareils, les frottements provoquent généralement une **perte de charge** (ou *perte de pression*), exprimé en *pascal*, ou même en **pascal par mètre** [Pa/m] lorsqu'il s'agit de l'écoulement dans un conduit.

ENERGIE ET GRANDEURS DÉRIVÉES

Les grandeurs énergétiques font intervenir le rôle de la **température**, mesurée au moyen de deux unités : le degré Celsius [°C], le kelvin [K], avec la relation fréquente suivante :

$$[K] = [°C] + 273,15.$$

Nous n'utiliserons ici que l'échelle Celsius, mais, dans les formules, le «degré» d'écart de température sera souvent noté : [K].

Dans beaucoup d'appareils et de conduits la présence ou l'écoulement de l'air impliquent des aspects énergétiques. Pour les mesurer (en énergie par seconde) nous utiliserons le **watt** [W], l'équivalent du joule par seconde.

De multiples échanges énergétiques font intervenir les propriétés thermiques des matériaux ou des composants. C'est en particulier le cas de la conduction thermique à travers un matériau, laquelle est caractérisée la **conductivité thermique** de ce matériau, qui est mesurée en watt par mètre et par kelvin [W/m.K].

1.4. LA TERMINOLOGIE DES AIRS

LES DEUX SOLUTIONS

Il existe différentes terminologies à propos des airs :

- . une terminologie «*physique*» conduisant aux concepts d'**air sec**, d'**air moyen**, d'**air normé** et d'**air réel**, concepts définis au chapitre 2 ;
- . une première *terminologie fonctionnelle*, proposée par l'auteur en 1960, vue au paragraphe 1.3,
- . une deuxième *terminologie fonctionnelle*, celle proposée par la norme NF EN 12792, synthétisée dans l'encadré ci-dessous.

N.B. Nous ne fournissons cette dernière terminologie qu'à titre d'information : nous en déconseillons l'emploi - sauf pour les conventions de couleurs.

TERMINOLOGIE PROPOSÉE PAR LA NORME NF EN 12792

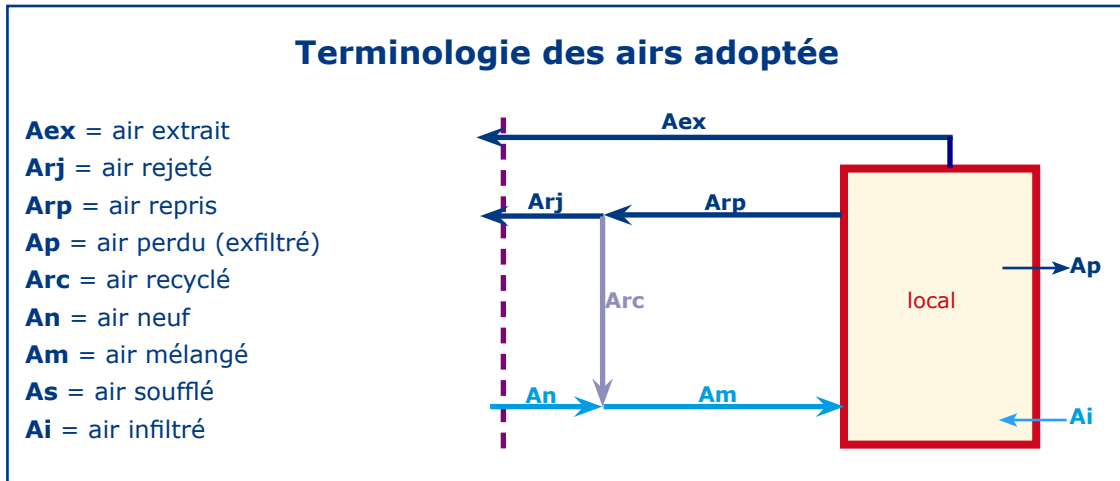
- *Air brassé* : air dominant dans un espace à traiter (codage jaune) ;
- *Air induit* : air secondaire induit par l'air primaire ;
- *Air fourni* : écoulement d'air entrant dans l'espace à traiter ou entrant dans le système après traitement quelconque (codage : vert sans traitement thermodynamique préalable ; rouge pour 1 traitement, bleu pour 2 ou 3 traitements, violet pour 4 traitements) ;
- *Air intérieur* : air dans la pièce ou la zone traitée (codage gris) ;
- *Air mélangé* : air qui contient deux écoulements d'air ou plus (codage gris) ;
- *Air neuf* : air contrôlé entrant dans le système ou par des ouvertures depuis l'extérieur avant tout traitement de l'air (codage vert) ;
- *Air normalisé* : air atmosphérique de masse volumique 1,2 kg/m³, 101325 Pa et d'humidité relative égale à 65 % ;
- . *Air primaire* : air entrant dans un espace à traiter (*exemple de mauvaise décision*) ;
- . *Air recyclé* : air repris qui est renvoyé à un caisson de traitement d'air (codage orange) ;
- . *Air rejeté* : écoulement d'air refoulé dans l'atmosphère (codage marron) ;
- . *Air repris* : écoulement d'air quittant l'espace à traiter (codage jaune) ;
- . *Air transféré* : air intérieur qui passe de la pièce à traiter à une autre pièce à traiter (codage gris).

LA TERMINOLOGIE PROPOSÉE PAR L'AUTEUR

En vue d'éviter les confusions l'auteur a tenté de fixer une terminologie que vous trouverez définie, par un schéma, page suivante. Notez toutefois que cette terminologie n'est pas forcément acceptée par tous, y compris dans les normes et règlements. Cette terminologie adopte les conventions présentées au schéma ci-dessous, les symboles (Aex, etc) permettant de définir les termes essentiels définis dans ce schéma.

N.B. Cette terminologie est surtout valable en ventilation (guides **gV**) et en climatisation (guides **gC**). Elle doit être, éventuellement, adaptée aux conditions particulières de l'opération, le schéma de la page suivante étant général.

Au schéma ci-dessous chaque abréviation, placée près d'un symbole de conduit, indique la «nature» de l'air transporté. Ce tableau définit deux «airs» accessoires au réseau aéraulique : l'air infiltré **Ai** (provenant directement de l'extérieur à travers les interstices de la construction) et l'air perdu **Ap**, dit aussi exfiltré, partant directement vers l'extérieur à travers les interstices de la construction. Tous les autres «airs» participent vraiment au réseau aéraulique : l'air neuf (**An**) qui, mélangé à de l'air recyclé (**Arc**) fournit l'air introduit dans les locaux (**As**), l'air évacué du local qui est soit extrait directement (**Aex**) soit repris (**Arp**) pour être pour partie rejeté à l'extérieur (**Arj**), pour partie recyclé (**Arc**).



1.5. L'ORGANISATION DE L'INFORMATION

LES TROIS TOMES **gA1**, **gA2** ET **gA3**

L'aéraulique est présentée dans les guides **gA** sous trois tomes :

- . tome 1 : **gA1, L'aéraulique 1** (le présent tome, consacré aux données de base sur l'air et l'aéraulique, y compris l'atmosphère extérieure)
- . tome 2 : **gA2, L'aéraulique 2**, tome consacré aux différents **composants** des réseaux aérauliques,
- . tome 3 : **gA3, L'aéraulique 3**, tome consacré aux **calculs des réseaux** aérauliques.

Chapitre 2

2. L'AIR

2.1. RAPPELS DE BASE

LES ATOMES ET MOLÉCULES EN JEU

♦ Les différents **atomes** (avec leurs masses atomiques m_{at}) intervenant dans la composition de l'air sont : . O (l'oxygène, $m_{at} = 15,9994$), N (l'azote, $m_{at} = 14,0067$), C (le carbone, $m_{at} = 12,01$), H (l'hydrogène, $m_{at} = 1,0080$), Ar (l'argon, $m_{at} = 39,95$), Ne (le néon, $m_{at} = 20,179$), He (l'hélium, $m_{at} = 4,0026$), Kr (le krypton, $m_{at} = 83,80$), Xe (le xénon, $m_{at} = 131,30$).

♦ 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	
<i>constituant</i>	<i>fraction molaire</i>	<i>constituant</i>	<i>fraction molaire</i>
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].



Finalement, en un point donné l'air sera 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**,

sous la forme et les désignations indiquées à la suite.

2.2. L'ATMOSPHÈRE NORMALE

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 plus loin).
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.
3. 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 fixer la pression atmosphérique normale, en fonction de l'altitude, vous disposez de trois méthodes.

1. Ou bien vous faites appel à la **table 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 A01.A**,
3. Ou bien vous faites appel aux **auxiliaires** (AuxiCad) qui vous seront présentés ultérieurement.

I. PRESSION ATMOSPHÉRIQUE NORMALE EN FONCTION DE L'ALTITUDE							
Altitude [m]	Pression [Pa]	Altitude [m]	Pression [Pa]	Altitude [m]	Pression [Pa]	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 A01.A. PRESSION ATMOSPHÉRIQUE NORMALE

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

$$\langle \mathbf{A01.A} \rangle \odot \quad pat = 101325 * (1 - 0,0000225577 * alt) ^ 5.2554876$$

2.3. LA PRISE EN COMPTE DE L'HUMIDITÉ

LE CONCEPT D'AIR SEC

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.

LES PRISES EN COMPTE DE L'HUMIDITÉ

Si l'on veut tenir compte de la teneur d'humidité, il vous faut faire la distinction entre :

- . le concept d'**air sec**, présenté page précédente,
- . et le concept d'**air humide**, *air réel* dont la teneur en humidité doit être fixée.

Pour fixer cette teneur en humidité nous disposons surtout de deux modes d'expression : l'**humidité spécifique** et l'**humidité relative**.

1. 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 :

- 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.
- Beaucoup d'auteurs utilisent, pour l'*humidité spécifique*, le gramme par kilogramme d'air sec : nous excluons ce mode d'expression.
- Très souvent, au lieu d'utiliser l'humidité spécifique on utilise l'humidité relative définie comme suit.

2. 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 $\psi = 55 \%$.

LA PRESSION DE VAPEUR SATURANTE

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

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

2.4. LA PRESSION DE VAPEUR SATURANTE

PRINCIPES DE L'ÉVALUATION

L'expression fondamentale de l'**humidité relative** (ψ), définie par la formule $\psi = p_v / p_{sat}$, 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 : $p_{sat,\theta}$ (voir définition de l'humidité relative). Vous disposez de 3 méthodes d'évaluation.

1. Ou bien vous faites appel à la **table** (page précédente) fournissant les valeurs de $p_{sat,\theta}$,
2. Ou bien vous faites appel (sur calculette ou autrement) à l'**encadré A01.B** ci-dessous,
3. Ou bien vous faites appel aux **auxiliaires** (AuxiCad) qui vous seront présentés au chapitre 4.

Encadré A01.B. PRESSION DE VAPEUR SATURANTE DE L'EAU

p_{sat} [Pa] = pression de vapeur saturante (de la vapeur d'eau) ; TC [°C] = température Celsius

<A01.B>©

$$p_{sat} = 10^u$$

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

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

2.5. LA CONVERSION DES TENEURS EN HUMIDITÉ

DE L'HUMIDITÉ SPÉCIFIQUE À L'HUMIDITÉ RELATIVE, ET VICE-VERSA

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 deux procédures suivantes :

1. Ou bien vous faites appel (sur calculette ou autrement) à l'**encadré A01.C** ci-dessous,
2. Ou bien vous faites appel aux **auxiliaires** qui vous seront présentés ultérieurement.

Encadré A01.C. HUMIDITÉ RELATIVE <-> HUMIDITÉ SPÉCIFIQUE

p_{sat} [Pa] = pression de vapeur saturante (fonction de la température TC [°C])

p_{At} [Pa] = pression atmosphérique normale (fonction de l'altitude alt [m])

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

<A01.C1> de l'humidité relative à l'humidité spécifique :

$$hspe = 0,6221 * hrel * p_{sat} / (p_{At} - hrel * p_{sat})$$

<A01.C2> de l'humidité spécifique à l'humidité relative :

$$hrel = hspe * p_{Ar} / \{ p_{sat} * (0,6221 + hspe) \}$$

2.6. 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», ce que nous allons examiner maintenant.

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. Sauf lorsqu'il faut se livrer à des analyses détaillées l'utilisation de l'air réel dans les calculs aérodynamiques est souvent mal commode.
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, 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 guide (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** (§ 2.7),
- . la **masse volumique** et le **volume massique** de l'**air réel** (§ 2.8),
- . la **masse volumique** et le **volume massique** de l'**air moyen** (§ 2.9),
- . auxquels il faut ajouter l'état «**normé**» (§ 2.10) .

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] :

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

FORMULES DE RÉFÉRENCE, CELLES DES 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] :

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

2.7. L'AIR SEC

LES RELATIONS FONDAMENTALES

Pour calculer la **masse volumique** et le **volume massique** de l'air sec deux gammes de procédures sont proposées :

1. Ou bien vous faites appel (sur une calculatrice ou autrement) aux formules de l'**encadré A01.D** de la page suivante,
2. Ou bien vous faites appel à l'**auxiliaire** que nous vous présenterons ultérieurement.

Encadré A01.D. L'AIR SEC : MASSE VOLUMIQUE/VOLUME MASSIQUE

pAt [Pa] = *pression* : normalement la pression atmosphérique normale (encadré **M01.F**)

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

$Vmass$ [m³/kg] = *volume massique*

<A01.D1> $mVol = 0,003483 * pAt / (TC + 273,15)$

<A01.D2> $Vmass = 1 / mVol = 287,1 * (TC + 273,15) / pAt$

2.8. L'AIR RÉEL

Pour travailler sur l'air réel, opérer comme suit.

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.

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 guide 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 **M01.x**),
- . et par sa **température** θ [°C], qui doit être fixée pour les calculs qui vont suivre.

3. PREMIÈRE SOLUTION : 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* (voir encadré **A01.D**),
- . 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. DEUXIÈME SOLUTION : 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.E** (donnée page suivante)

4.2. Ou bien vous faites appel à l'**auxiliaire** que nous présenterons ultérieurement.

Encadré A01.E. L'AIR RÉEL : MASSE VOLUMIQUE/VOLUME MASSIQUE

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

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

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

<**A01.E1**> Si l'humidité spécifique ($hspe$) est connue :

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

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

<**A01.E2**> Si l'humidité relative ($hrel$) est connue, voyez les formules **A01.E1** ci-dessus.

2.9. L'AIR MOYEN**PREMIÈRE DÉFINITION DE L'AIR MOYEN**

Les formules relatives à l'air réel 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) :

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

LA DÉFINITION FINALE DE L'AIR MOYEN

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

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

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 A01.K* ci-dessous, mais vous pourrez également utiliser l'*auxiliaire* publié ultérieurement.

Encadré A01.F. L'AIR MOYEN : MASSE VOLUMIQUE/VOLUME MASSIQUE

pAt [Pa] = *pression* : normalement la pression atmosphérique normale

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

<**A01.F1**> $mVol = 0,003483 * \alpha * pAt / (TC + 273,15)$

avec :

$$TC \leq -15 \text{ [°C]} : \alpha = 1,000$$

$$-15 < TC < 35 \text{ [°C]} : \alpha = 0,9982 - (0,00012 * T_{ce})$$

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

<**A01.F2**> $Vmass = 1 / mVol$

2.10. 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 **A01.G**.

Encadré A01.G. ÉQUIVALENTS EN AIR NORMÉ DE L'AIR SEC ET DE L'AIR MOYEN

pAt [Pa] = *pression* : normalement la pression atmosphérique normale

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

<A01.G1> Air sec équivalent : $TC = \{ 0,0029025 * pAt \} - 273,15$

<A01.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 α 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 (voir, éventuellement, l'encadré suivant : A01.H).

Encadré A01.H. 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*

<A01.H1> A partir du débit horaire en **air réel** :

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

<A01.H2> A partir du débit horaire en **air sec** :

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

<A01.H3> A partir du débit horaire en **air moyen** :

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

Chapitre 3

3. LES INSTALLATIONS AÉRAULIQUES

3.1. PERSPECTIVES D'ENSEMBLE

LES INSTALLATIONS AÉRAULIQUES

Les réseaux aérauliques sont constitués d'un certain nombre de composants, que nous classerons en trois catégories : les «*composants de base*», les «*composants complémentaires*», et les «*composants auxiliaires*». Tous ces composants sont présentés dans le guide :

gA2. L'aéraulique 2.

LES COMPOSANTS AÉRAULIQUES

1. Les **composants de base** sont les suivants.

- . Les **conduits d'air**, ou **conduits aérauliques**, constituent souvent l'essentiel des réseaux, et sont traités au chapitre **2** du guide **gA2**.
- . Les **ventilateurs**, servent à animer la circulation d'air dans ces réseaux, et sont traités au chapitre **3** du guide **gA2**.
- . Les **registres** et composants assimilés sont les organes de modulation des débits dans les réseaux : ils sont traités au chapitre **4** du guide **gA2**.
- . Les **bouches** et **diffuseurs**, servent à assurer dans les locaux desservis un comportement satisfaisant de l'air au soufflage comme à l'extraction. Ils sont traités aux chapitres **5** et **6** du guide **gA2**.

2. Les **composants complémentaires** sont les suivants, lorsque leur présence est nécessaire :

- . Les **caissons de traitement d'air**, destinés au traitement de l'air et à en modifier les caractéristiques (température, humidité, etc.), sont traités au chapitre **7** du guide **gA2**.
- . Les **filtres**, destinés à l'élimination des suspensions, des poussières ou des autres aérosols souvent présents dans l'air, sont traités au chapitre **8** du guide **gA2**.
- . Les **silencieux**, ou **atténuateurs de bruit**, (destinés à la réduction des bruits d'écoulement de l'air), et les antivibratiles (destinés à atténuer l'effet des vibrations) sont traités au chapitre **9** du guide **gA2**.
- . Les **échangeurs thermiques**, destinés au chauffage ou au rafraîchissement de l'air, ou aux échanges thermiques entre deux flux d'air, sont traités au chapitre **10** du guide **gA2**.

3. Les **composants auxiliaires** sont ceux qui viennent en complément des précédents : *ancrages et supports, accessoires divers de conduits, panneaux de commande, câbles et raccords*. Ils ne sont pas traités en détail hors des chapitres **2** à **10** (du guide **gA2**) signalés précédemment.

3.2. L'ARCHITECTURE DES RÉSEAUX

LES RÉSEAUX AÉRAULIQUES

Les réseaux doivent, chacun, faire l'objet d'un schéma graphique :

- . la trame essentielle étant fournie par la parcours des conduits,
- . les autres composants - multiples - ayant un rôle plus ponctuel.

LES SCHÉMAS AÉRAULIQUES

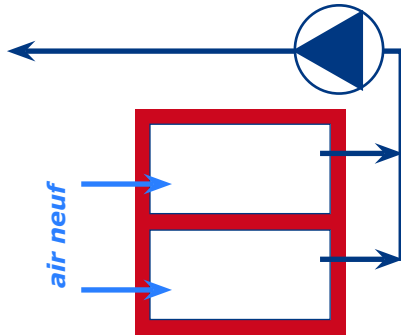
Les schémas varient selon l'application en cause :

- pour les installations de **ventilation** voir les guides **gV**, un exemple d'articulation des schéma étant fourni au paragraphe suivant,
- pour les installations de **chauffage à air chaud** voir les guides **gT**,
- pour les installations de **climatisation** tout-air ou air-eau voir les guides **gC**,

3.3. PRINCIPES DES RÉSEAUX. Exemple : LA VENTILATION

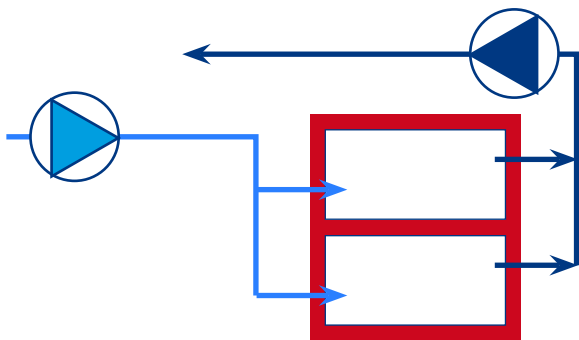
Les réseaux aérauliques de base sont ceux qui servent à la ventilation. Dans ce cas il s'agit :

- . ou bien des réseaux de **ventilation naturelle** où la circulation de l'air est «naturelle», par action du vent ou des différences de températures ou du vent),
- . ou bien des réseaux de **ventilation mécanique**, la circulation de l'air y étant assurée par un ou des ventilateurs). Les réseaux de ventilation mécanique - que nous prendrons ici pour base, appartiennent, généralement, à l'une des quatre configurations suivantes.



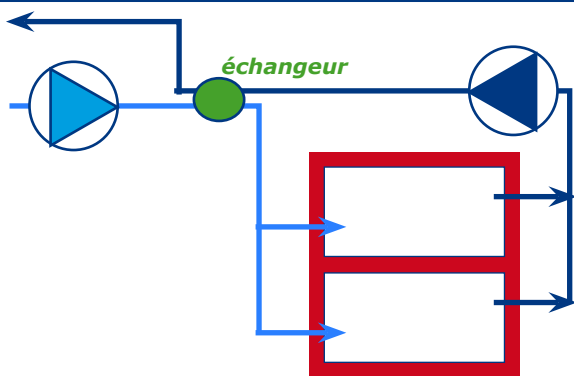
A. Système simple flux

Dans ce système l'air neuf est introduit dans les pièces principales par des bouches adéquates placées dans les parois extérieures, l'air étant extrait - généralement dans les pièces de service - par un réseau d'extraction animé par un ventilateur. C'est le système le plus simple, souvent utilisé dans les maisons individuelles. Dans les autres cas le système offre une maîtrise des débits d'air neuf qui ne sont pas toujours satisfaisants.



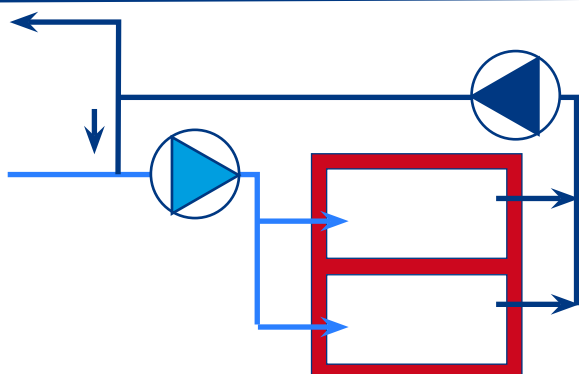
B. Système double flux (de base)

Dans ce système l'air neuf est introduit dans les locaux par un circuit d'air neuf animé par un ventilateur, l'air étant extrait - généralement dans les pièces de service - par un réseau d'extraction animé par un ventilateur. C'est le système qui maîtrise le mieux les débits d'air neuf, pouvant les moduler selon les besoins (par exemple par détection de CO₂ dégagé par les occupants, proportionnel à leur nombre)



C. Système double flux optimisé

Système en grande partie identique au système précédent (B), mais où un échangeur de chaleur permet de récupérer de la chaleur (en hiver) sur l'air extrait. Avec les soucis actuels, malgré son coût, c'est une source appréciable d'économie d'énergie en chauffage, domaine où la ventilation tend à devenir prédominante.



D. Système intégré

Dans ce système l'air de ventilation est mélangé avec l'air qui assure le chauffage ou le rafraîchissement. Le système est généralement à double flux (deux ventilateurs). Il permet de moduler les débits d'air neuf et d'air extrait. *Attention* : les débits adoptés doivent cumuler les exigences de ventilation et les exigences de chauffage-rafraîchissement.

3.4. 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

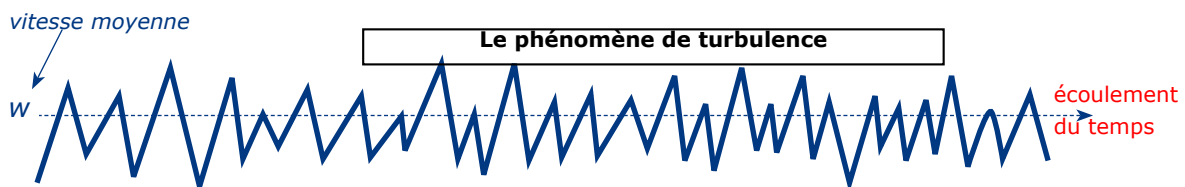
Il est courant, en France, d'utiliser ce que nous appelons le **débit normé**. C'est le débit qu'aurait l'air en cause si sa masse volumique était ramenée à 1,20 [kg/m³]. Si l'air possède la masse volumique ρ , avec les conventions françaises, le **débit normé** q_N [m³/h] vaut :

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

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

LES VITESSES

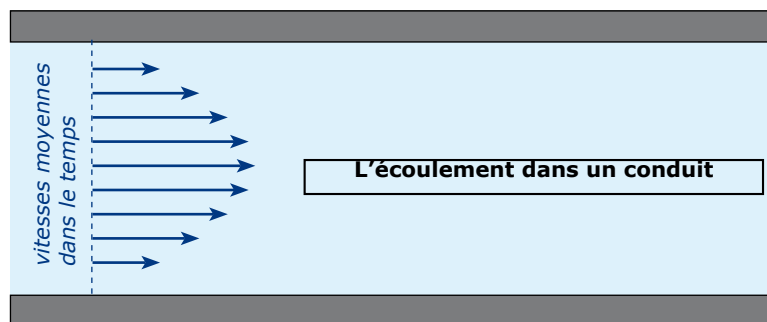
La *majorité des écoulement d'air sont turbulents*, en ce sens que la vitesse oscille en permanence. Dans ce cas ce qu'on appelle **vitesse de l'air** w [m/s] est la moyenne dans le temps (voir schéma ci-dessous) : la plupart du temps ce qu'on appelle la vitesse de l'air est en fait sa moyenne dans le temps en un point donné.



Lorsque l'air s'écoule dans un conduit, en dehors même du phénomène dessu. 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 formules 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.

3.5. UTILISATION DES DÉBITS

NOS 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**, mais on peut également utiliser le concept d'**air sec** (voir livret **nM03**).

LES «DIFFÉRENTS» DÉBITS

Les conventions diverses, plus certaines habitudes 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**).

Pour convertir les unités utilisez les formules de l'encadré **A01.J** (ci-dessous),

Encadré A01.J. CONVERSION DES DÉBITS

$mVol$ [kg/m³] = masse volumique ; 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

<A01.J>	$q = mVol * q_v$;	$q = (0.001 * mVol) * q_L$;	$q = (mVol / 3600) * q_h$
	$q_v = (1 / mVol) * q$;	$q_v = 0.001 * q_L$;	$q_v = (1 / 3600) * q_h$
	$q_L = (1000 / mVol) * q$;	$q_L = 1000 * q_v$;	$q_L = (1/3,6) * q_h$
	$q_h = (3600 / mVol) * q$;	$q_h = 3600 * q_v$;	$q_h = 3,6 * q_L$

LA VALEUR DE BASE UTILISÉE PAR LA SUITE

Dans la suite des guides sur l'aéraulique et le génie climatique nous utiliserons les débits normés, mais avec les conventions suivantes :

- pour les **calculs aérauliques** le débit d'**air normé** est exprimé en **mètre cube par seconde** [m³/s] ;
- pour les **calculs de génie climatique** (ventilation, chauffage, climatisation) le débit d'**air normé** est exprimé en **mètre cube par heure** [m³/h].

Si, partant des données «ventilation», vous devez effectuer des calculs aérauliques, il faut transformer les débits «ventilation» en débits «aérauliques» : l'encadré ci-dessous (**A01.K**) vous en fournit la formule pratique.

Encadré A01.K. TRANSFORMATION DES DÉBITS DE VENTILATION

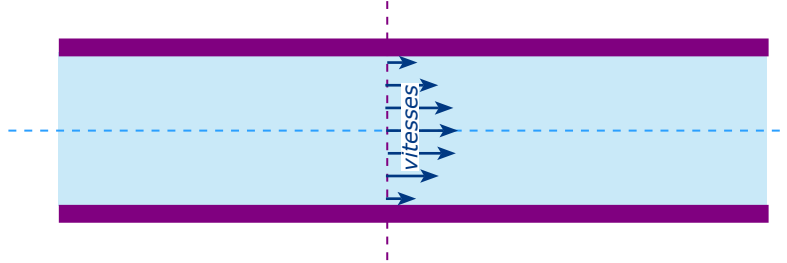
q_v [m³/h] = débit-ventilation ; q_a [m³/s] = débit-aéraulique

<A01.K> $q_a = q_v / 3600$

3.6. VITESSE MOYENNE 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 (**A01.L**) permet d'éviter toutes les difficultés.

Encadré A01.L. 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

<m51.L1>

$$w_A = q_A / A$$

<m51.L2>

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

LES TROIS TYPES DE PRESSION

Dans les écoulements l'expérience conduit à distinguer trois pressions :

- . la *pression statique*,
- . la *pression dynamique*,
- . la *pression totale*.

LA PRESSION (STATIQUE)

La pression de l'air, dans une enceinte ou dans un écoulement, peut être caractérisée par sa pression au sens strict, mesurée en pascal [Pa]. Dans la pratique on utilise plutôt la «**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 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, et w [m/s] la vitesse.

Elle permet de définir la «pression totale» (voir plus loin).

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.

3.7. 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 A01.M. 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)

<A01.M1> si la puissance est connue : $\Delta\theta = 3,575 * P / (mVol * qh)$

<A01.M2> si la variation de température est connue : $P = 0,297 * mVol * qh * \Delta\theta$

3.8. LES FORMULES DE RÉFÉRENCE

Toutes les formules de ce guide 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 :

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

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.

Chapitre 4

3. L'ATMOSPHÈRE EXTÉRIEURE

4.1. LA PERMÉABILITÉ À L'AIR

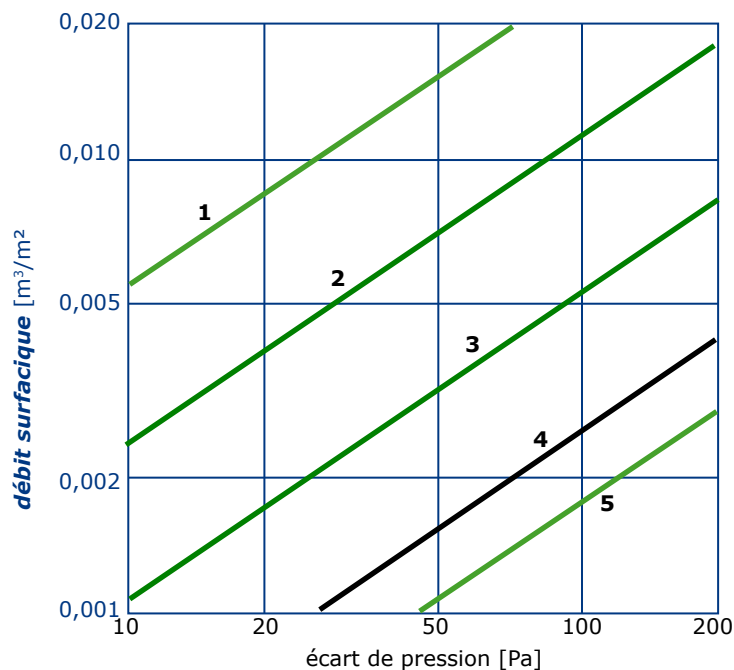
PRESSION EXTÉRIEURE ET PRESSION INTÉRIEURE

Bien que dans tous *les calculs* aérauliques la pression de l'air soit toujours prise égale à la pression atmosphérique normale (fonction de l'altitude) il peut exister entre différentes ambiances des écarts de pression de quelques pascals, sinon de quelques dizaines de pascals. C'est une donnée généralement importante, en particulier lorsqu'il s'agit d'évaluer la différence de pression existant entre l'extérieur et l'intérieur. Dans ce cas trois paramètres jouent un rôle fondamental :

- . la différence de pression («tirage») due à la **différence de température** entre l'intérieur et l'extérieur,
- . la différence de pression due à l'effet du **vent** sur les parois,
- . la plus ou moins grande **perméabilité à l'air** des parois extérieures (voir ci-dessous).

LA PERMÉABILITÉ AÉRAULIQUE

La manière la plus productive d'exprimer cette perméabilité des parois extérieures est d'utiliser un diagramme tel que celui figurant ci-dessous, reprenant statistiquement les données recueillies par J. Mouret et par l'auteur sur des constructions classiques.



Signification des symboles du schéma ci-dessus :

1. fenêtre moyenne classe A0 (ancienne norme)
2. fenêtre moyenne classe A1 (ancienne norme)
3. fenêtre moyenne classe A2 (ancienne norme)
4. paroi en bois assez peu étanche
5. fenêtre moyenne classe A3 (ancienne norme)

OBSERVATIONS PRATIQUES

D'une manière générale ce sont les fenêtres, les portes défailtantes, et surtout les coffres de rideaux mal surveillés qui sont à la source des inétanchéités les plus marquantes. D'une manière générale, la mauvaise étanchéité est due :

- . soit à des parois mal conçues ou mal réalisées,
- . soit à des parois ayant mal vieilli.

4.2. L'ACTION DU TIRAGE

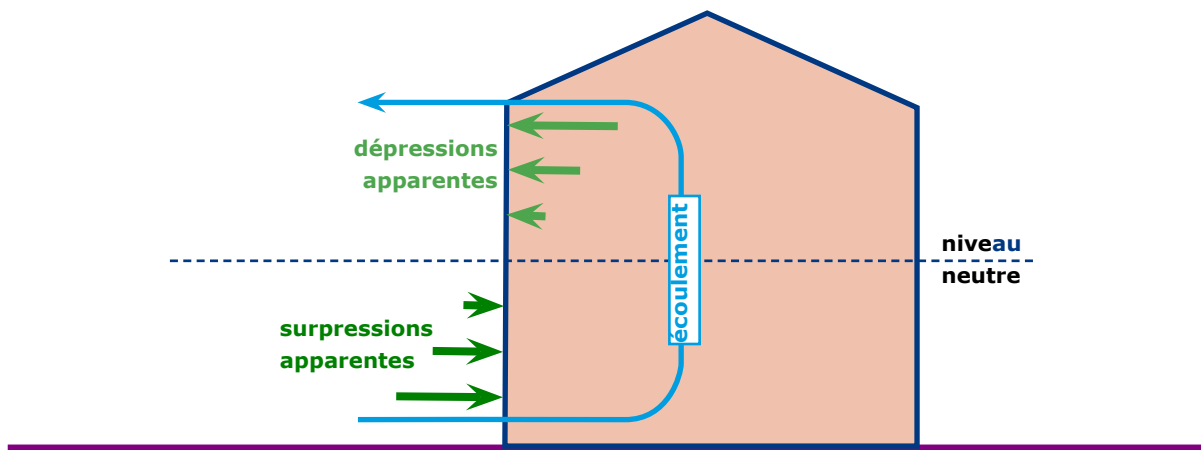
LE PHÉNOMÈNE DE TIRAGE

Les différences de pression entre l'intérieur et l'extérieur peuvent provenir, au moins en partie, des différences de densité dues aux différences de température. C'est cette situation qui crée le phénomène de **tirage**, aboutissant aux situations suivantes.

1. Dans le cas d'un local chauffé l'air extérieur s'évacue par les orifices supérieurs, ce qui entraîne un appel d'air vers l'intérieur par les orifices inférieurs (voir schéma ci-dessous). Ce phénomène qui dépend des hauteurs en cause (voir plus loin) est particulièrement important :

- . dans les locaux de grande hauteur,
- . dans les cages d'escalier des immeubles un peu hauts.

N.B. Dans certains cas, très particuliers, le même phénomène d'écart de densité peut exister entre deux faces d'un même bâtiment, mais cette situation est souvent négligée par suite de sa faible importance.



4.3. L'ÉVALUATION DU TIRAGE

LES EFFETS DU TIRAGE

Sur le plan pratique, pour déterminer les pressions dues au tirage vous pouvez utiliser :

- . soit les valeurs types de la table ci-dessous, la valeur indiquée correspondant à la différence globale de pression (bas+haut), en valeur moyenne,
- . soit les formules de l'encadré **A01.N** (page suivante),
- . soit les procédures fournies par l'*auxiliaire* Auxiair.

III. PRESSIONS DUES AU TIRAGE						
écart de température intérieur-extérieur	hauteur de bâtiment					
	5 m	10 m	15 m	20 m	25 m	30 m
± 5 [K]	1	2	3	4	5	6
± 10 [K]	2	4	6	9	11	13
± 15 [K]	3	6	10	13	16	19
± 20 [K]	4	9	13	17	22	26
± 25 [K]	5	11	16	22	27	32
± 30 [K]	6	13	19	26	32	39

Les pressions sont indiquées en pascal [Pa]

SI VOUS VOULEZ UTILISER DIRECTEMENT LES FORMULES, par exemple à la calculatrice

adoptez celles fournies à l'encadré **A01.N** de la page suivante, mais en faisant attention à la procédure d'évaluation des masses volumiques (mVol [kg/m³]) :

- . soit en **air sec** (encadré **A01.H**),
- . soit en **air réel** (encadré **A01.J**),
- . soit en **air moyen** (encadré **A01.K**).

Prenez la même procédure pour l'intérieur et l'extérieur.

Encadré A01.N. ÉVALUATION DU TIRAGE

$mVoli$ [kg/m³] = masse volumique intérieure ; $mVole$ [kg/m³] = masse volumique extérieure ;

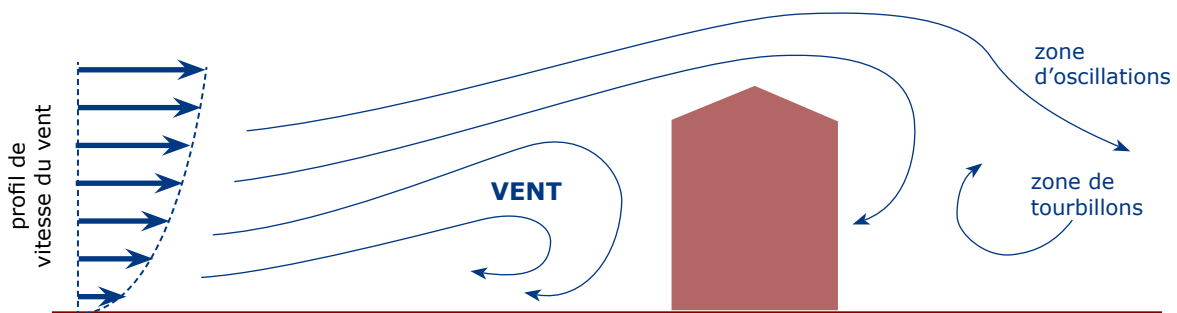
h [m] = hauteur de tirage ; tir [Pa] = tirage (extérieur sur intérieur)

<A01.N> $tir = 9,806\ 65 * (mVole - mVoli) * h$

4.4. LA STRUCTURE DU VENT

LA VITESSE DU VENT

D'une manière générale la vitesse du vent croît au fur et à mesure qu'on s'éloigne du sol, mais le profil dépend du relief et des obstacles rencontrés. En rase campagne le profil se présente comme suit.



Afin d'éviter les confusions, par définition la vitesse du vent est celle qui règne à 10 [m] au-dessus du sol. Les valeurs types de cette vitesse, mesurées en site météorologique, sont indiquées à la table suivante.

IV. CLASSEMENT TYPE DES INTENSITÉS DU VENT			
Echelle Beaufort	Nom	Vitesse du vent [m/s]	Manifestations
0	calme	moins de 0,45	fumées s'élevant verticalement
1	brise très légère	de 0,45 à 1,34	direction du vent = direction des fumées (pas les girouettes)
2	brise légère	de 0,8 à 3,1	vent perçu au visage, frémissement des feuilles, girouette ordinaire
3	petite brise	de 3,6 à 5,4	agitation des feuilles et petites branches, déploiement drapeaux légers
4	jolie brise	de 5,8 à 8	poussières et papiers soulevés,
5	bonne brise	de 8,5 à 10,7	début de balancement arbres feuillus, petites vagues (eaux intérieures)
6	vent frais	de 11,2 à 13,9	grandes branches agitées, sifflements fils télégraphiques
7	grand frais	de 14,3 à 17	arbres agités en entier, marche contre le vent assez difficile
8	coup de vent	de 17,4 à 20,6	bris de rameaux, marche contre le vent très difficile

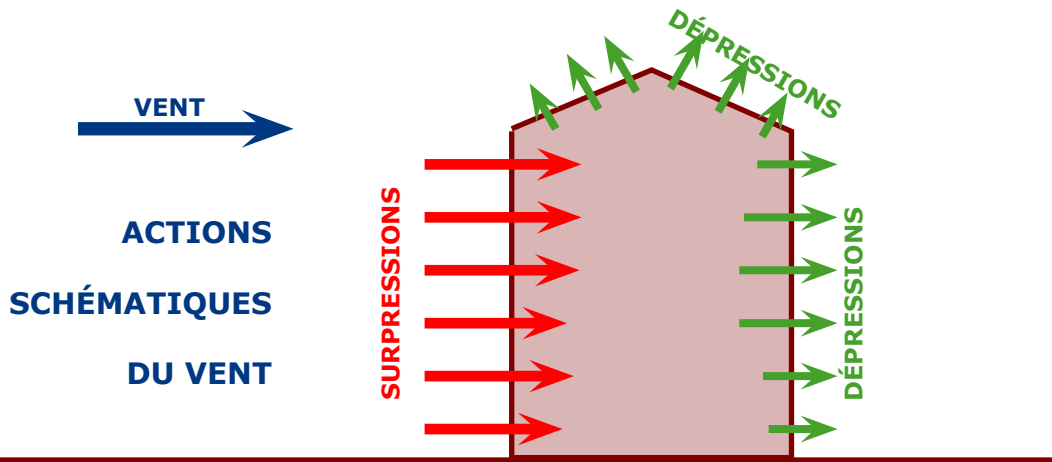
4.5. L'ACTION DU VENT

LES PRESSIONS DUES AU VENT

Dans le cas d'un corps de bâtiment relativement isolé, situé en plaine, l'écoulement global de l'air (voir le schéma en haut de page suivante) est fortement affecté, mais crée généralement :

- . une **surpression** sur la façade place au vent,
- . des **dépressions** sur les autres faces.

Mais ceci n'est qu'une remarque générale, les pressions étant distribuées de façon souvent très complexe, de sorte qu'il est très difficile d'en faire une évaluation valable. Si vous devez néanmoins évaluer les effets (de façon un peu approximative) vous pouvez utiliser, en première approche, le raisonnements, le schéma et la page suivante.



LES DÉMARCHES PROPOSÉES

A. LA VITESSE DU VENT

Comme indiqué précédemment la vitesse du vent est celle prise à 10 [m] au-dessus du sol. Nous la nommons ici : w_w . Elle est mesurée en mètre par seconde [m/s].

B. LES SURPRESSIONS ET DÉPRESSIONS

1. Les façades situées **face au vent** subissent une **surpression** partout sensiblement égale à :

$$0,6 w_w^2$$

2. Les façades **sous le vent** connaissent une **dépression** assez variable, valant :

$$\text{de } 0,2 w_w^2 \text{ à } 0,4 w_w^2$$

avec une valeur moyenne égale à $0,3 w_w^2$.

Pour des vitesses de vent assez fréquentes de 5 m/s (= 18 km/h) la surpression est de l'ordre de 15 [Pa], la dépression moyenne sous le vent étant de l'ordre de 5 à 10 [Pa].

C. LE CHOIX DES VALEURS DE RÉFÉRENCE

Pour choisir la valeur de référence nous vous proposons deux solutions :

1. Ou bien adopter une valeur type, comme celle indiquée dans la table ci-dessous, fournissant directement la pression due au vent **en fonction du site et de la hauteur du bâtiment**, toutes régions confondues ;
2. Ou bien utiliser les formules (surpression et dépressions) fournies en **B**, avec une **vitesse de vent** (moyenne climatique) dépendant de la région tout autant que de l'exposition, selon les indications du paragraphe 3.6.

V. PRESSIONS DUES AU VENT						
Site	hauteur de bâtiment					
	5 m	10 m	15 m	20 m	25 m	30 m
Ile ou sommet en altitude :	112	136	154	167	178	188
Zone côtière :	41	51	57	62	66	70
Plateau très dégagé :	41	51	57	62	66	70
Plaine dégagée :	24	29	33	36	38	40
Petite ville :	6	8	10	12	14	15
Zone suburbaine	6	8	10	12	14	15
Centre urbain :	4	5	6	8	10	10

Les pressions sont indiquées en pascal [Pa]

4.6. LES ASPECTS CLIMATIQUES

1. LA FORMULE DE BASE : L'INFLUENCE DU SITE ET DE LA HAUTEUR

La vitesse «météorologique» w_{met} [m/s] étant celle mesurée à 10 [m] au-dessus du sol (*fournie page suivante*), vous pourrez en déduire la vitesse w [m/s] à une hauteur z [m] au-dessus du sol grâce à la formule :

$$w = b (z/d)^a \cdot w_{\text{met}}$$

les paramètres **b**, **d**, **a** étant fixés à la page suivante.

N.B. Cette formule permet, en particulier, de calculer la vitesse au niveau du toit ou de la terrasse.

Les paramètres **b**, **d**, **a** peuvent, en première approche, être évalués au moyen de la table suivante.

site	b	d	a
. grande ville où au moins la moitié des immeubles sont de grande hauteur (> 20 m) . au voisinage (à moins de 2 km) de grande ville	3,54	460	0,33
. zone urbaine ou suburbaine, ou au voisinage (< 2 km) . zone boisée ou avec de nombreux obstacles, ou au voisinage (< 2 km)	2,21	370	0,22
. terrain dégagé ou très faibles obstructions (moins de 10 m)	1,59	270	0,14
. zone très exposée au vent (île, etc)	1,36	210	0,10

2. L'ÉVALUATION DE LA VITESSE MÉTÉOROLOGIQUE

La table ci-dessous permettent d'évaluer les vitesses météorologiques types : w_{met} [m/s].

VI. VITESSES MÉTÉOROLOGIQUES					
01. Ain	3,5	33. Gironde	4,0	65. Hautes Pyrénées	3,0
02. Aisne	4,5	34. Hérault	5,0	66. Pyrénées Orientales	5,5
03. Allier	4,0	35. Ille et Vilaine	5,0	67. Bas Rhin	3,0
04. Alpes de Haute Provence	4,0	36. Indre	4,0	68. Haut Rhin	3,0
05. Hautes Alpes	4,0	37. Indre et Loire	4,0	69. Rhône	3,5
06. Alpes Maritimes	4,0	38. Isère	3,5	70. Haute Saône	3,5
07. Ardèche	3,5	39. Jura	3,0	71. Saône et Loire	3,5
08. Ardennes	4,0	40. Landes	4,0	72. Sarthe	4,0
09. Ariège	3,0	41. Loir et Cher	4,0	73. Savoie	3,5
10. Aube	3,5	42. Loire	4,0	74. Haute Savoie	3,5
11. Aude	5,5	43. Haute Loire	4,0	75. Paris	4,0
12. Aveyron	4,5	44. Loire Atlantique	4,5	76. Seine Maritime	5,0
13. Bouches du Rhône	5,0	45. Loiret	4,0	77. Seine et Marne	4,0
14. Calvados	5,0	46. Lot	3,5	78. Yvelines	4,0
15. Cantal	4,0	47. Lot et Garonne	3,5	79. Deux Sèvres	4,5
16. Charente	4,0	48. Lozère	4,0	80. Somme	4,5
17. Charente Maritime	4,0	49. Maine et Loire	4,0	81. Tarn	3,5
18. Cher	4,0	50. Manche	5,5	82. Tarn et Garonne	3,0
19. Corrèze	4,0	51. Marne	4,0	83. Var	4,5
20. Corse	5,5	52. Haute Marne	4,0	84. Vaucluse	4,0
21. Côte d'Or	3,5	53. Mayenne	4,0	85. Vendée	4,5
22. Côtes d'Armor	5,0	54. Meurthe et Moselle	3,5	86. Vienne	4,0
23. Creuse	4,0	55. Meuse	3,5	87. Haute Vienne	4,0
24. Dordogne	4,0	56. Morbihan	5,0	88. Vosges	3,0
25. Doubs	3,0	57. Moselle	3,5	89. Yonne	3,5
26. Drôme	4,5	58. Nièvre	4,0	90. Territoire de Belfort	3,0
27. Eure	4,0	59. Nord	5,0	91. Essonne	4,0
28. Eure et Loir	4,0	60. Oise	4,0	92. Hauts de Seine	4,0
29. Finistère	5,0	61. Orne	4,5	93. Seine Saint Denis	4,0
30. Gard	5,0	62. Pas de Calais	5,0	94. Val de Marne	4,0
31. Haute Garonne	4,0	63. Puy de Dôme	4,0	95. Val d'Oise	4,0
32. Gers	3,0	64. Pyrénées Atlantiques	4,0		