

## R01 – Propriétés physiques de l'air – Notions indispensables

L'air qui nous entoure sur notre planète n'est pas sec, il contient une quantité variable de vapeur d'eau, généralement invisible. On dit qu'il est "humide". En plus de la vapeur d'eau, l'air peut contenir des gouttelettes d'eau ou des particules de glace, visibles dans ce cas. C'est de l'air **sursaturé** (ou brouillard et brouillard givrant).

Ses évolutions conditionnent la vie animale et végétale. Les propriétés physiques, dimensionnelles, mécaniques et chimiques de nombreux produits varient en fonction de l'humidité de l'atmosphère avec laquelle ils sont en contact.

La sensation humaine de bien-être est sous la dépendance (dans de larges limites) de l'humidité de l'air.

Les prévisions météorologiques, le séchage, le conditionnement d'air : trois activités dans lesquelles l'air humide prend une part importante.

On conçoit donc que la maîtrise des ambiances nécessite la parfaite connaissance d'une "technique de l'air humide", qui régit ses évolutions.

Nous nous bornerons ici aux **notions indispensables** à la conception des installations de conditionnement de l'air. Puis nous étudierons la **construction du diagramme de l'air humide** et une application : **le mélange de deux airs**.

Les évolutions de l'air que subit une transformation élémentaire seront étudiées au chapitre 5.

### 1. L'air humide

Le Larousse dit : " **air = fluide gazeux que nous respirons**"

Nous : **L'air atmosphérique est le facteur essentiel de notre environnement intérieur et extérieur. Il est composé d'un certain nombre de gaz, d'humidité, de poussières et de bactéries.**

Nous appellerons :

**"AIR SEC"** : **L'air pur ne contenant aucune poussière ou bactérie et totalement dépourvu d'humidité**.

**Composition volumique :**

CONSTITUANTS		COMPOSITION VOLUMIQUE EN %
Azote (N <sub>2</sub> ) = 28		78,09
Oxygène (O <sub>2</sub> ) = 32		20,84
IMPURETES	Gaz carbonique (CO <sub>2</sub> ) = 44	{ 0,03 (variable)
	Oxyde de carbone (CO) = 28	
	Anhydrique sulfureux (SO <sub>2</sub> ) = 64	
	Anhydrique sulfurique (SO <sub>3</sub> ) = 80	
GAZ RARES	Argon (A) = 40	{ 0,93 traces
	Xénon (Xe)	
	Krypton (Kr)	
	Hélium (He)	

Il a par conséquent une teneur + ou - élevée en impuretés gazeuses. L'air absolument sec se rencontre rarement dans notre environnement immédiat (> 10 km d'altitude).

→ **Conception théorique.**

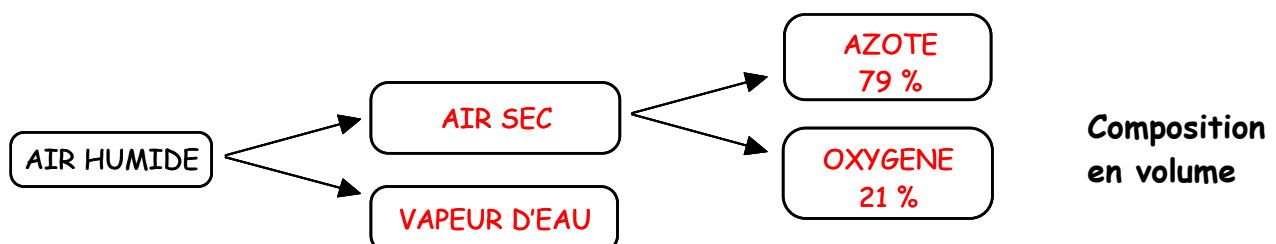
**"AIR HUMIDE" :** mélange d'air sec + humidité

L'humidité de l'air se présente sous la forme de :

- vapeur d'eau,
- de gouttelettes d'eau en suspension dans l'air (brume, brouillard, pluie),
- de particules de glace (givre ou neige).

En pratique dans les calculs de conditionnement de l'air, on considère que l'air est un air humide, composé d'air sec et de vapeur d'eau.

L'air sec étant composé (par simplification) de 79 % d'azote et de 21 % d'oxygène.



## 2. Caractéristiques de l'air humide

L'état de l'air humide n'est parfaitement défini que si l'on connaît sa pression totale  $P$ , sa température sèche ( $\theta_s$ ) et l'une quelconque de ses autres valeurs :

- pression partielle de vapeur d'eau :  $P_v$ ,
- humidité relative  $\phi$ ,
- humidité absolue  $r$ ,
- température de rosée  $\theta_r$ ,
- enthalpie spécifique  $h_s$ ,
- température humide  $\theta_h$ ,
- volumique spécifique  $v$ .

Les caractéristiques sont liées entre elles par des lois physiques traduites par des équations.

→ Utiles si calculs informatisés.

L'usage habituel d'un "diagramme de l'air humide" permet lors de déterminations "manuelles" de ne pas avoir recours à ces équations.

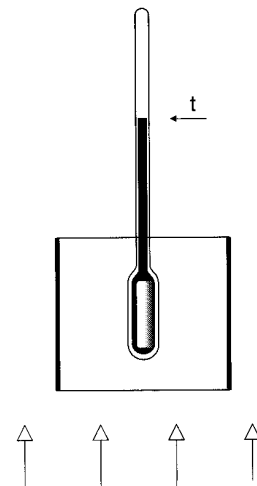
### 2.1. Températures caractéristiques de l'air humide

#### Température sèche de l'air ( $\theta_s$ )

C'est celle du mélange air-humidité. Les spécialistes la désignent simplement par température de l'air.

C'est la température indiquée par un thermomètre ordinaire à l'abri du rayonnement solaire (quelquefois appelée température du bulbe sec).

Thermomètre (sec).  
Ventilé et protégé du rayonnement par  
une « lanterne » cylindrique

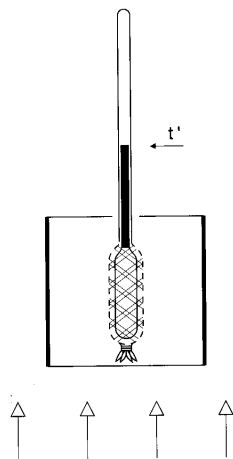


#### Température humide ( $\theta_h$ )

C'est la température atteinte par l'air non saturé lorsqu'il le deviendrait (au bout d'un temps infini) au contact d'eau déjà à cette température. C'est aussi par conséquent, la température indiquée par un "thermomètre humide", rapidement en régime.

La température humide est donc une valeur de repérage des caractéristiques de l'air.

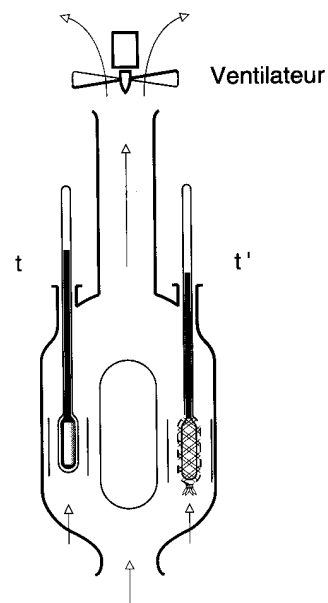
Un thermomètre humide et un thermomètre sec sont les composantes d'un psychromètre : appareil de base du contrôle de l'air humide.



Thermomètre humide.

Ventilé et protégé du rayonnement.

Le peu d'eau qui imprègne la « mèche humide » est rapidement en régime



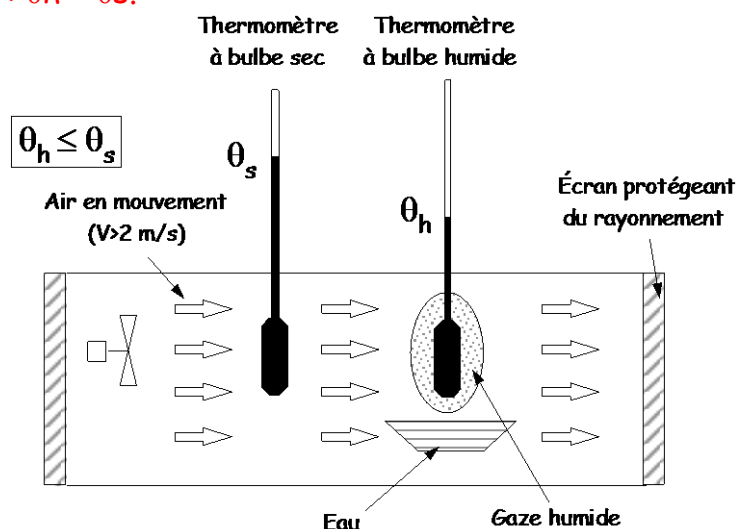
Principe du psychromètre ventilé

### Principe :

C'est la température indiquée par un thermomètre dont le bulbe est entouré d'une gaze mouillée, balayé par de l'air en mouvement et protégée du rayonnement.

A la surface du thermomètre à bulbe humide, l'eau se vaporise, l'air s'humidifie. La chaleur nécessaire à la vaporisation est prélevée sur l'air qui se refroidit.  $\theta_h \leq \theta_s$ .

Pour un air saturé :  $\theta_h = \theta_s$ .



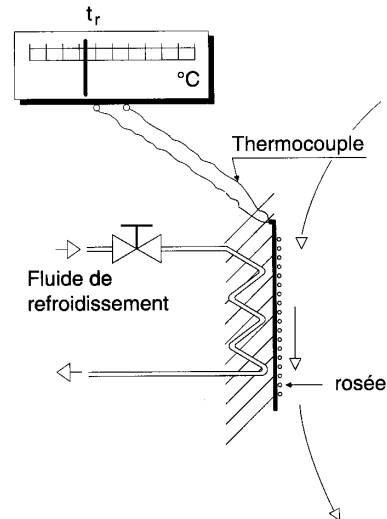
La température humide dépend de la température sèche de l'air et de l'humidité comprise dans cet air.

$\theta_h \leq \theta_s$  et cet écart est d'autant plus grand que l'air est éloigné des conditions de saturation.

## Température de rosée ( $\theta_r$ )

C'est la température à laquelle la vapeur d'eau contenue dans l'air commence à se condenser au contact d'une paroi froide, refroidie lentement.

Schéma de principe d'un hygromètre à point de rosée.



C'est la température à laquelle il faut refroidir l'air pour que la vapeur d'eau qu'il contient commence à se condenser. La température de rosée de l'air est fonction de la teneur en eau de l'air considéré.

Exemple : condensation en surface d'une vitre. Si la température de surface au niveau de la vitre est inférieure à  $\theta_r \Rightarrow$  condensation de la vapeur d'eau.

## 2.2. Pressions de l'air humide

### Pression atmosphérique (P)

C'est la pression du mélange (d'air sec et d'humidité associée) qui règne sur le site de l'installation.

Pression atmosphérique à l'altitude considérée :

$$P = 101325 - 12 \times z + 5,2 \cdot 10^{-4} \times z^2 \text{ [Pa]} \quad \text{avec } z \text{ en [m]}$$

### Pression partielle de la vapeur d'eau ( $P_v$ )

C'est la pression qu'aurait, à la même température de l'air humide, le constituant vapeur d'eau, **s'il était seul à occuper l'ensemble du volume offert au mélange** : air dit "sec" + vapeur d'eau.

Cette notion abstraite de pression partielle de vapeur d'eau se dit également "**tension de vapeur**".

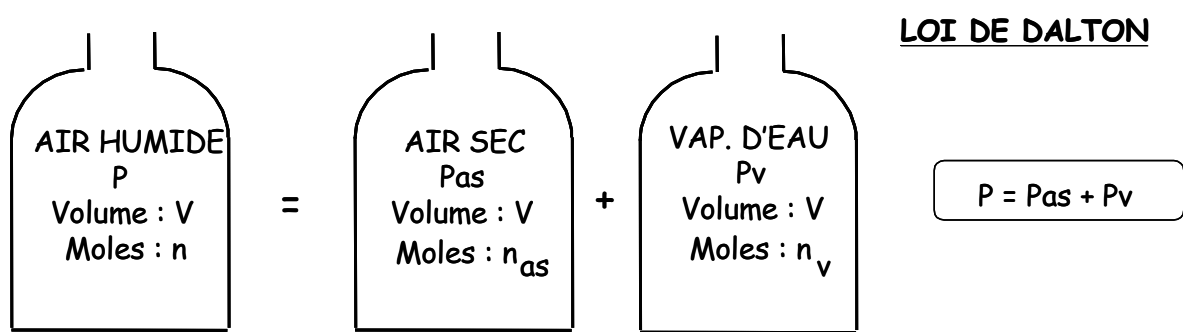
## Pression partielle de l'air sec (Pas)

C'est la pression qu'aurait, à la même température de l'air humide, le constituant air, s'il était seul à occuper l'ensemble du volume offert au mélange : air dit "sec" + vapeur d'eau.

## Loi de Dalton

La pression totale d'un mélange est égale à la somme des pressions partielles de chacun des constituants.

Dans le cas de l'air humide, la pression totale se compose de la pression partielle de l'air sec et de la pression partielle de la vapeur d'eau.



- P : pression totale
- Pas : pression partielle d'air sec
- Pv : pression partielle de la vapeur d'eau
- n : nombre de moles total
- $n_v$  : nombre de moles de vapeur d'eau
- $n_{as}$  : nombre de moles d'air sec

$$P_v = \% \text{ (en volume) de vapeur} \times P$$

$$P_{as} = \% \text{ (en volume) d'air sec} \times P$$

La masse de vapeur d'eau dans l'air humide est directement liée à la pression partielle de vapeur d'eau. On peut considérer que la pression totale de l'air humide est égale à la pression atmosphérique.

## Pression de vapeur saturante (Pvs)

A chaque température correspond une teneur en eau maximum et une pression maximum de vapeur d'eau désignée pression de vapeur saturante.

### 2.3. Humidité relative (ou degré hygrométrique) ( $\varphi$ ) ou (HR %)

L'humidité relative ( $\varphi$ ) se définit comme le rapport de la pression de vapeur d'eau (de l'air humide à la température considérée) sur la pression de vapeur d'eau saturante de l'air à la même température.

$$\varphi = \frac{P_v}{P_{vs}} \times 100 \quad \text{en } [\%]$$

Le degré hygrométrique représente la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air humide par comparaison à la quantité maximale qu'il pourrait contenir à la même température.

$$\varphi = \frac{mv}{mvs}$$

avec,  $mv$  : masse de vapeur d'eau

$mvs$  : masse de vapeur d'eau maximum que l'air peut contenir.

Elle exprime en %, l'état de l'air plus ou moins proche de sa saturation en vapeur d'eau :

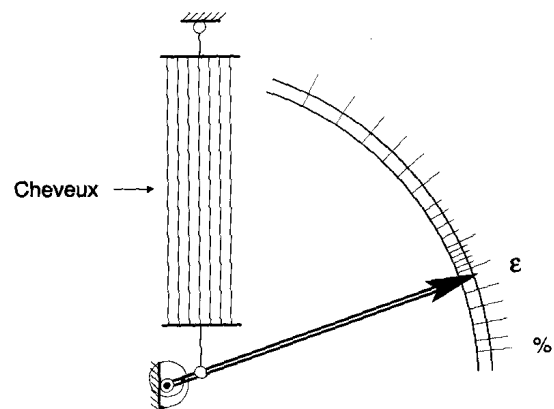
100 % pour l'air saturé,

0 % pour l'air sec.

Si  $P_v$  atteint  $P_{vs}$  :  $\varphi = 100$  %, l'air est saturé (c'est-à-dire vapeur d'eau en présence d'eau liquide (ou solide) (apparition des premières gouttelettes).

Si  $P_v > P_{vs}$  : l'air est sursaturé et contient en suspension de l'eau liquide sous forme de brouillard, pluie ou neige.

Schéma de principe d'un hygromètre mécanique. L'élément hygrosopique est ici une harpe de cheveux



## 2.4. Humidité absolue (humidité spécifique, teneur en humidité) (r)

L'humidité absolue (r) est le rapport de la masse de vapeur d'eau (mv), sur la masse d'air sec (mas).

$$r = \frac{mv}{mas} \quad \text{en} \quad \left[ \frac{\text{kg d'eau}}{\text{kg d'air sec}} \right] \quad [\text{kgeau/kgas}]$$

Relation entre la pression de vapeur et la teneur en humidité :

$$P_v = \frac{P}{1 + \frac{0,622}{r}}$$

Elle directement liée à la pression partielle par :

$$r = 0,622 \frac{P_v}{P - P_v}$$

## 2.5. Volume massique spécifique (v)

C'est le volume occupé (à la pression atmosphérique normale) par le mélange d'air sec et de vapeur d'eau (air humide), contenant 1 kg d'air sec.

$$v = \frac{V}{mas} \quad \text{or} \quad V = \frac{mas + mv}{\rho_{air}} \quad \text{et} \quad r = \frac{mv}{mas} \quad \text{donc :}$$

Le volume spécifique est égale à :

$$v = \frac{1 + r}{\rho} \quad \text{en} \quad \left[ \frac{\text{m}^3 \text{ d'air humide}}{\text{kg d'air sec}} \right]$$

Avec :

$\rho$  : masse volumique de l'air humide (kg d'air humide/m<sup>3</sup> d'air humide)

V : volume d'air humide (m<sup>3</sup>)

mas : masse d'air sec (kg d'air sec)

mv : masse de vapeur d'eau (kg d'eau)

r : humidité absolue (kg d'eau/kg d'air sec)

Remarque : en général  $r \ll 1$  donc  $v \approx \frac{1}{\rho}$ .



## 2.6. Enthalpie

### Enthalpie massique de l'air sec à la température $\theta$ ( $h_a$ )

Elle représente la quantité de chaleur qu'il faudrait fournir à 1 kg d'air sec pour élever sa température de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $\theta\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

$$h_a = C_{pas} \times \theta \quad \text{en [kJ/kgas]}$$

$C_{pas}$  : Capacité thermique massique de l'air = 1,005 kJ/kg.K

### Enthalpie massique de la vapeur d'eau à la température $\theta$ ( $h_v$ )

Elle représente la chaleur totale qu'il faut fournir à 1 kg d'eau pris à  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  pour le porter à l'état de vapeur à la température  $\theta\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

$$h_v = C_{p_v} \times \theta + l_{v_0} \quad \text{en [kJ/kg vap]}$$

$C_{p_v}$  : Capacité thermique massique de la vapeur = 1,83 kJ/kg.K

$l_{v_0}$  : chaleur latente de vaporisation de l'eau  $l_{v_0} = 2501\text{ kJ/kg}$  à  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$

d'où : 
$$h_v = 2501 + 1,83 \theta \quad \text{en [kJ/kg eau]}$$

### Enthalpie de l'air humide à la température $\theta$ ( $H$ )

Un mélange d'air humide contenant  $m_{as}$  kg d'air sec et  $m_v$  kg de vapeur d'eau à une enthalpie totale  $H$ .

$$H = m_{as} \times h_a + m_v \times h_v \quad \text{en [kJ]}$$

### Enthalpie spécifique du mélange (air humide) à la température $\theta$ ( $h_s$ )

C'est l'enthalpie totale de l'air humide rapportée à 1 kg d'air sec (enthalpie par unité de masse d'air sec).

$$h_s = \frac{H}{m_{as}} = \frac{m_{as} \times h_a + m_v \times h_v}{m_{as}} = h_a + r \times h_v = 1,005 \cdot \theta + r \cdot (2501 + 1,83 \cdot \theta)$$

en [kJ/kgas]

→ Elle représente la quantité de chaleur contenue dans l'air humide dont la masse d'air sec est 1 kg.

## 2.7. Débit spécifique (qas)

C'est le débit massique d'air sec, repéré par (as), qui sert de support à l'air humide véhiculé à travers les éléments de traitements [ kgas/h ou kgas/s ].

La masse d'air sec a été choisie pour référence, car **elle se conserve** au cours des transformations. Il n'en serait pas ainsi d'une masse d'air humide : l'eau qu'il contient peut varier au cours des transformations.

## 3. Diagramme de l'air humide

On utilise le diagramme de l'air humide pour calculer les évolutions des caractéristiques d'un air humide plutôt que d'utiliser des calculs algébriques. Le diagramme de l'air humide est établi pour une pression atmosphérique normale de 101 325 Pa et pour un kilogramme d'air sec.

Il existe plusieurs types de diagrammes.

Les états de l'air humide sont représentés par des couples de paramètres psychrométriques :

- $(\theta, r)$  : CARRIER (le plus utilisé mais h à corriger), COSTIC (le plus imprécis sans  $\theta h$ ), PORCHER (le plus pratique), VERON - CASARI (le plus précis mais grand format).
- $(r, h)$  : MOLLIER, ASHRAE.
- $(h, \theta)$  : MISSENARD.

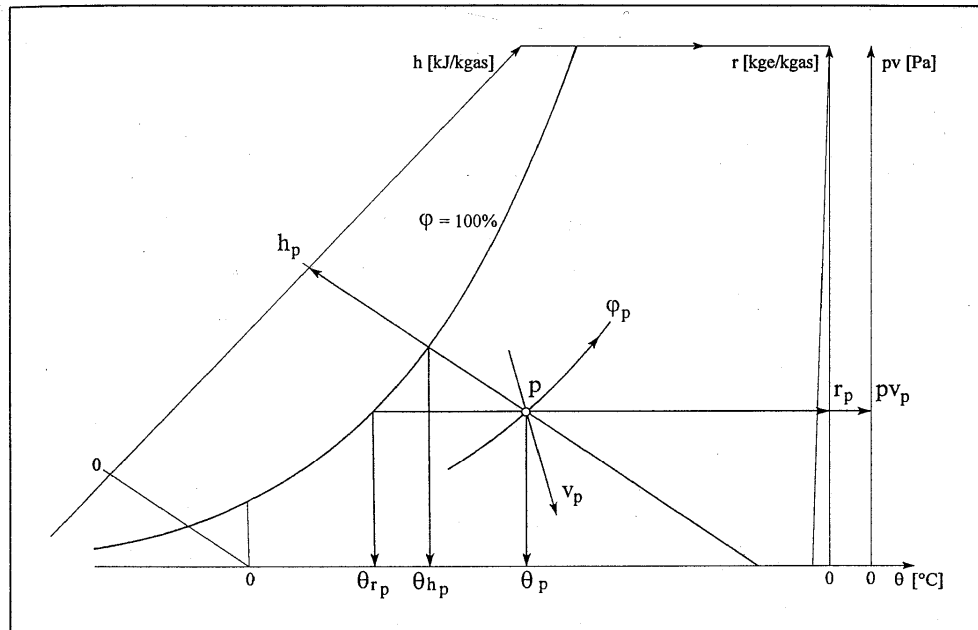
Nous nous limiterons à la description du diagramme de CARRIER (U.S.A.), le plus utilisé et systématiquement présent dans les sujets d'examen.

Chaque point du diagramme représente un état de l'air humide dont les 7 grandeurs caractéristiques sont :

Grandeur	Symbole	Unité
Température sèche	$\theta_s$	°C
Température humide	$\theta_h$	°C
Température de Rosée	$\theta_r$	°C
Humidité absolue (rapport de mélange ou teneur en eau)	r	kg eau / kg as
Humidité relative (degré hygrométrique)	$\varphi$	%
Volume massique spécifique	v	m <sup>3</sup> /kg as
Enthalpie spécifique	h	kJ / kg as

Remarque : On utilise le terme **spécifique** pour indiquer que la grandeur est ramenée **à 1 kg d'air sec**.

Les différentes caractéristiques se lisent, comme le résume le schéma symbolique suivant, par lecture directe ou interpolation.



Remarquons que le diagramme ainsi utilisé n'est valable que pour la pression atmosphérique de référence 1013 mbar (au niveau de la mer), ou pour une pression qui n'en s'écarterait que peu. Pour des altitudes supérieures à 500 m, il convient d'utiliser un diagramme établi pour la pression correspondante [ AICVF, COSTIC ].

Il est admis que lorsque les partenaires de la climatisation évoquent l'air, ils entendent parler de l'air humide. La simplification est acceptable puisque l'air sec n'existe pas naturellement. On retrouve cependant l'air sec dans les notions spécifiques.

Les deux tableaux suivants sont issus du guide AICVF.

- Le premier indique les caractéristiques de l'air et des grandeurs de dimensionnement. Nous pouvons remarquer que d'autres symboles sont utilisés.
- Le second résume les principales formules de l'air humide.

Nous allons poursuivre ce chapitre par :

- la construction du diagramme de l'air humide et
- une application : mélange de deux airs.

CARACTÉRISTIQUES DE L'AIR	*1 Symboles utilisés dans ce texte	*2 Unités du 1er type	*3 Facteur de conversion	*2 Unités S.I.	Commentaires
Pression atmosphérique	P	Pa		Pa	Pression totale
Enthalpie spécifique	q'	Wh/kg (as)	3,6	kJ/kg (as)	Chaleur totale
Humidité spécifique	w	kg/kg (as)		kg/kg (as)	Humidité absolue
Température	t	°C		°C	Température sèche
Température humide	t'	°C		°C	
Température de rosée	t <sub>r</sub>	°C		°C	
Humidité relative	ε	%		%	Hygrométrie
Volume spécifique	v'	m³/kg (as)		m³/kg (as)	
Pression partielle de vapeur d'eau	p	Pa		Pa	Tension de vapeur
"Pente" ( pour une transformation suivant	γ	Wh/kg	3,6	kJ/kg	Rapport : $\frac{\Delta q'}{\Delta w}$

Les caractéristiques spécifiques sont rapportées à 1 kilogramme d'air sec ; [ kg (as) ]

GRANDEURS DE DIMENSIONNEMENT						
Débit de fluide	massique	m	kg/h	1/3 600	kg/s	
	volumique	d	m³/h	1/3 600	m³/s	
Débit de l'air	spécifique	Π	kg (as)/h	1/3 600	kg (as)/s	D = v' . Π
	volumique	D	m³/h	1/3 600	m³/s	
Puissance		P	W	10 <sup>-3</sup>	kW	P = Δq' . Π

\*1 Symboles du diagramme enthalpique de l'air humide de l'AICVF.

\*2 Unités coordonnées d'un type

\*3 Facteur multiplicateur pour passer du 1er type au système international (S.I.)  
 [ pour passer des anciennes unités en kcal à celles en Wh, multiplier par 1,16 ]  
 [ pour passer des anciennes unités en kcal à celles du système S.I., en kJ, multiplier par 4,186 ]

### Tableau des caractéristiques de l'air et des grandeurs de dimensionnement

DÉSIGNATIONS	EXPRESSIONS	COMMENTAIRES
1 - Pression atmosphérique P [ Pa ]	Loi de Mariotte : $\frac{p}{\rho} = RT$ Loi de Dalton : $P = p_a + p_v$	$\rho$ : masse volumique [ kg / m <sup>3</sup> ] $p$ : pression partielle, indiquée : a pour l'air, v pour la vapeur d'eau, R : constante des gaz parfaits T : température absolue [ K ]
2 - Humidité relative $\varepsilon$	$\varepsilon = \frac{p_v}{p_{v(s,t)}}$	$p_{v(s,t)}$ : pression de vapeur saturée à la température t.
3 - Humidité spécifique w $\left[ \frac{\text{kg}}{\text{kg (as)}} \right]$	$w = \delta \cdot \frac{p_v}{P - p_v} = \delta \cdot \frac{\varepsilon \cdot p_{v(s,t)}}{P - \varepsilon \cdot p_{v(s,t)}}$	$\delta = \frac{R_a}{R_v} = 0,622 \quad \left[ \frac{\text{kg (eau)}}{\text{kg (as)}} \right]$
4 - Températures [ °C ] : sèche t humide t' de rosée t <sub>r</sub>	Equation de t' : $c_e \cdot t' = \frac{\Delta q'}{\Delta w}$ $t_r = t_s (p_v)$	(N'est pas une relation explicite).  $p_v = p_s (t_r)$
5 - Enthalpie spécifique q' $\left[ \frac{\text{Wh}}{\text{kg (as)}} \text{ ou } \frac{\text{kJ}}{\text{kg (as)}} \right]$	$q' = c_a \cdot t + w (A + c_v t)$	Pour l'air sursaturé : + $c_e \cdot t \cdot \Delta w$ $\Delta w$ : eau liquide / kg (as)
6 - Volume spécifique v' $\left[ \frac{\text{m}^3}{\text{kg (as)}} \right]$	$v' = \frac{1}{\rho_a}$ $v' = \frac{R_v (\delta + w) \cdot T}{P}$	$\rho_a$ : masse volumique de l'air sec à sa pression partielle $p_a$ .  $R_v = 461,24 \text{ J / kg} \cdot \text{K}$ $T = t + 273,15 \text{ K}$
7 - Formulation de $p_v$ (tirée de 3)	$p_v = \frac{w P}{\delta + w}$	

## VALEURS NUMÉRIQUES

## – Constantes des gaz parfaits

$$R_a = 287,05 \text{ J / kg} \cdot \text{K}$$

$$R_v = 461,24 \text{ J / kg} \cdot \text{K}$$

## – Capacités thermiques massiques

Air :  $c_a = 1,006 \text{ kJ / kg} \cdot \text{°C}$   
 $c_a = 0,279 \text{ W / kg} \cdot \text{°C}$

Vapeur :  $c_v = 1,830 \text{ kJ / kg} \cdot \text{°C}$   
 $c_v = 0,508 \text{ W / kg} \cdot \text{°C}$

Eau :  $c_e = 4,19 \text{ kJ / kg} \cdot \text{°C}$   
 $c_e = 1,16 \text{ W / kg} \cdot \text{°C}$

## – Chaleur de vaporisation de l'eau

$$A = 2\,501 \text{ kJ / kg}$$
  
$$A = 694,72 \text{ W / kg}$$

(\*) Pression de vapeur saturée à la température t,  $p_{v(s,t)}$  en [ Pa ]

Sur l'eau :

Sur la glace :

$$\log_{10} p_{v(s,t)} = \frac{7,625 t}{241,0 + t} + 2,7877$$

$$\log_{10} p_{v(s,t)} = \frac{9,756 t}{272,7 + t} + 2,7877$$

## Tableau résumé des principales formules de l'air humide