

## Chapitre 1: Rappels sur l'air humide

### 1.1 Air humide

L'atmosphère est un mélange hétérogène de gaz (l'air) et de particules liquides et solides en suspension (nuages, poussières, microorganismes ...etc).

L'air humide est un mélange d'air sec et de vapeur d'eau tel que :

$$P_{atm} = P_{a\ sec} + P_v$$

$P_{a\ sec}$  : Pression partielle de l'air sec.

$P_v$  : Pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air.

- L'air sec est un air pur ne contenant aucune poussière ou bactérie et totalement dépourvu d'humidité.
- Air saturé : air contenant 100% d'humidité.
- L'air humide est un air pur ne contenant aucune poussière ou bactérie mais ayant une certaine teneur en humidité sous forme de vapeur d'eau. C'est un mélange d'air sec et de vapeur d'eau.

$$\underbrace{\text{Air humide}}_{\text{mélange de gaz parfait}} = \underbrace{\text{Air sec}}_{\text{gaz parfait}} + \underbrace{\text{Vapeur d'eau}}_{\text{gaz parfait}}$$

- ✓ L'air sec peut être considéré comme un gaz parfait. De même, l'air humide est un mélange idéal de gaz parfaits.
- ✓ Les lois des gaz parfaits vont permettre d'établir les expressions littérales permettant de calculer les caractéristiques de l'air humide.
- ✓ L'air chaud peut contenir beaucoup de vapeur et inversement pour l'air froid.

### 1.2 Grandeurs hygrométriques

#### 1.2.1 Humidité absolue

L'humidité absolue est une mesure de la quantité réelle de vapeur d'eau (humidité) dans l'air, quelle que soit la température de l'air (exprimée en grammes de vapeur d'eau par mètre cube de volume d'air).

$$HA = x = \frac{\text{Masse de vapeur d'eau}}{\text{Masse d'air sec}} = \frac{m_v}{m_{a\ sec}} \left[ \frac{\text{kg d'eau}}{\text{kg d'air sec}} \right]$$

La relation entre l'humidité absolue et la pression partielle de vapeur d'eau est donnée par :

$$HA = x = 0.622 \frac{P_v}{P_{a\ sec}} = 0.622 \frac{P_v}{P_{atm} - P_v}$$

#### 1.2.2 Humidité relative

L'humidité relative (HR) (exprimée en pourcentage) mesure également la quantité de vapeur d'eau, mais relativement à la température de l'air. En d'autres termes, il s'agit d'une mesure de la quantité réelle de vapeur d'eau dans l'air par rapport à la quantité totale de vapeur qui peut exister dans l'air à sa température actuelle.

$$HR = \frac{\text{Masse de vapeur d'eau}}{\text{Masse de vapeur d'eau au saturation}} * 100\% = \frac{m_v}{m_{v\ sat}} * 100\%$$

La relation entre l'humidité relative et la pression partielle de vapeur d'eau est comme suit :

$$HR = \frac{P_v}{P_{v\text{ sat}}}$$

$p_{v\text{ s}}$  : Pression de vapeur saturante.

### 1.2.3 Taux de saturation

La saturation peut généralement être définie comme l'état de l'eau liquide ou la précipitation de glace à une température et une pression spécifiques.

Le taux de saturation fait référence à la masse de vapeur d'eau qui peut être contenue dans 1kg d'air sec lors de la saturation.

$$\psi = \frac{x}{x}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x = 0.622 \frac{P_v}{P_{atm} - P_v} \\ x = 0.622 \frac{P_{sat}}{P_{atm} - P_{sat}} \end{array} \right.$$

$$\psi = \left( \frac{P_v}{P_{sat}} \right) \left( \frac{P_{atm} - P_{sat}}{P_{atm} - P_v} \right)$$

### 1.2.4 Température sèche ( $\theta_s$ )

La température sèche est la température de l'air humide mesurée par un thermomètre standard ou d'autres instruments de mesure de la température

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

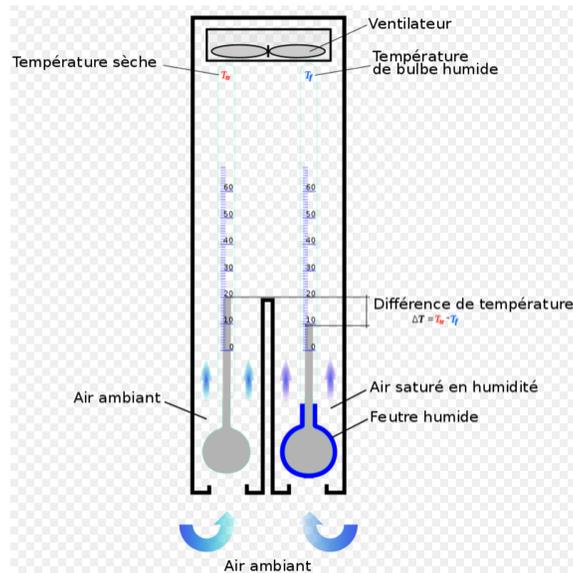
La température humide ou la température du thermomètre mouillé est la température la plus basse qui pouvant être atteinte par l'évaporation de l'eau uniquement. C'est la température que l'on ressent lorsque sa surface est mouillée et exposée à l'air en mouvement.

### 1.2.6 Point de rosée ( $\theta_r$ )

Le point de rosée est une donnée thermodynamique caractérisant l'humidité dans un gaz. Le point de rosée de l'air est la température à laquelle la pression partielle de vapeur d'eau est égale à sa pression de vapeur saturante.

Cette mesure est facile à réaliser. Il vous suffit de prélever un échantillon d'air et de le refroidir jusqu'à ce que vous commenciez à voir de la condensation.

L'ensemble des thermomètres utilisés pour déterminer la température sèche et la température humide est appelé **Psychromètre**.



**Fig. 1** : Principe de fonctionnement d'un psychromètre

### 1.2.7 Volume spécifique:

Le volume spécifique représente le volume occupé par l'air humide dont la masse d'air sec est de 1 kg.

$$v = \frac{V_{AH}}{m_{a\ sec}} = \frac{1}{\rho}$$

### 1.2.8 Masse volumique

La masse molaire de l'air sec et de la vapeur d'eau

$$M(\text{O}_2) = 32 \text{ kg/mol.K}$$

$$M(\text{N}_2) = 28 \text{ kg/mol.K}$$

$$M(\text{H}_2) = 2 \text{ kg/mol.K}$$

$$M_{a\ sec} = 28.96 \text{ kg/mol.K}$$

$$M_v(\text{H}_2\text{O}) = 18 \text{ kg/mol.K}$$

#### a) Masse volumique de l'air sec:

$$\rho_{a\ sec} = \frac{m_{a\ sec}}{V}$$

$$P_{a\ sec} V = nRT \Leftrightarrow P_{a\ sec} V = \frac{m_{a\ sec}}{M_{air\ sec}} RT$$

$$R = 8314.1 \frac{\text{J}}{\text{mol}} \cdot \text{kg} \cdot \text{K}$$

$$\rho_{a\ sec} = \frac{P_{a\ sec}}{287.1 T}$$

#### b) Masse volumique de l'air humide:

$$\rho_{a\text{ hum}} = \rho_{a\text{ sec}} + \rho_v$$

$$\rho_{a\text{ hum}} = \frac{P_{a\text{ sec}}}{287.1 T} + \frac{P_v}{451.5 T}$$

$$T = \theta$$

### 1.2.9 Enthalpie

On peut définir l'enthalpie d'air humide comme l'énergie nécessaire:

- pour chauffer 1kg d'air sec de la température de référence  $\theta_0$  à la température  $\theta$ ,
- pour vaporiser à  $\theta_0$  la quantité d'eau dans l'air humide ayant une humidité absolue de  $x$ ,
- pour chauffer la vapeur d'eau de  $\theta_0$  à  $\theta$ .

L'enthalpie spécifique  $h$  (J/kg) d'air humide est définie aussi comme l'enthalpie totale (J) de l'air sec et du mélange de vapeur d'eau par unité de masse (kg) d'air sec.

$$h = h_a + xh_{v,e}$$

#### 1. Enthalpie massique de l'air sec (la chaleur sensible) :

$$h_a = C_{p_a} \theta \quad [kJ/kg]$$

$C_{p_a}$  : Chaleur spécifique de l'air à pression constante (kJ/kg) ;

Pour une température de l'air comprise entre (-100°C et 100°C), la chaleur spécifique peut être égale à:  $C_{p_a} = 1.006$  (kJ/kg°C)

#### 2. Enthalpie spécifique de la vapeur d'eau (la chaleur latente) :

$$h_{v,e} = C_{p_{v,e}} \theta + L_v \quad [kJ/kg]$$

$C_{p_{v,e}}$  : Chaleur spécifique de la vapeur d'eau à pression constante;

Pour la vapeur d'eau, la chaleur spécifique peut être égale à:  $C_{p_{v,e}} = 1.86$  (kJ/kg°C)

$L_v$  : Chaleur d'évaporation de l'eau (kJ/kg) ;

La chaleur d'évaporation (eau à 0°C) est :  $L_v = 2501$  (kJ/kg)

$$h = C_{p_a} \theta + x(C_{p_{v,e}} \theta + L_v)$$

$$h = 1.006 \theta + x(1.86 \theta + 2501)$$

T ou  $\theta$  : température (°C)

## 1.2 Mélange d'airs humides

De nombreuses applications nécessitent le mélange de deux courants d'air. Cela est particulièrement vrai pour les grands bâtiments, la plupart des usines de production et de traitement, qui nécessitent que l'air conditionné soit mélangé à une certaine fraction d'air extérieur frais avant d'être acheminé dans l'espace de vie.

L'état du mélange, état 3,  $(x_m, m_{a,m}, h_m, \theta_m)$ , se situera sur la ligne droite reliant les états (1)  $(x_1, m_{a,1}, h_1, \theta_1)$  et (2)  $(x_2, m_{a,2}, h_2, \theta_2)$  sur le diagramme psychrométrique.

	Air humide 1	Air humide 2	Mélange
Humidité absolue du mélange	$x_1$	$x_2$	$x_m = \frac{m_{a,1}x_1 + m_{a,2}x_2}{m_{a,1} + m_{a,2}}$
Masse d'air sec	$m_{a,1}$	$m_{a,2}$	$m_{a,m} = m_{a,1} + m_{a,2}$
Enthalpie du mélange	$h_1$	$h_2$	$h_m = \frac{m_{a,1}h_1 + m_{a,2}h_2}{m_{a,1} + m_{a,2}}$

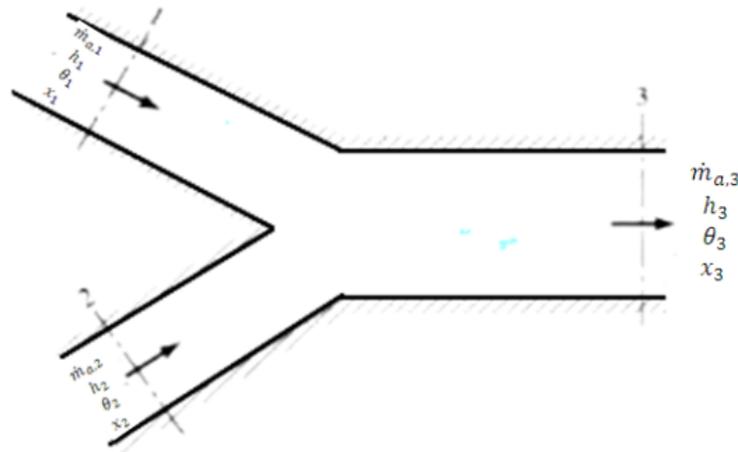


Fig.2 : Schéma de mélange adiabatique de deux flux d'air humide

### 1.3 Diagramme d'air humide

Le diagramme psychrométrique est une aide précieuse pour visualiser les processus de climatisation tels que le chauffage, le refroidissement et l'humidification.

Pour l'air saturé, les températures sèches, humides et de point de rosée sont identiques.

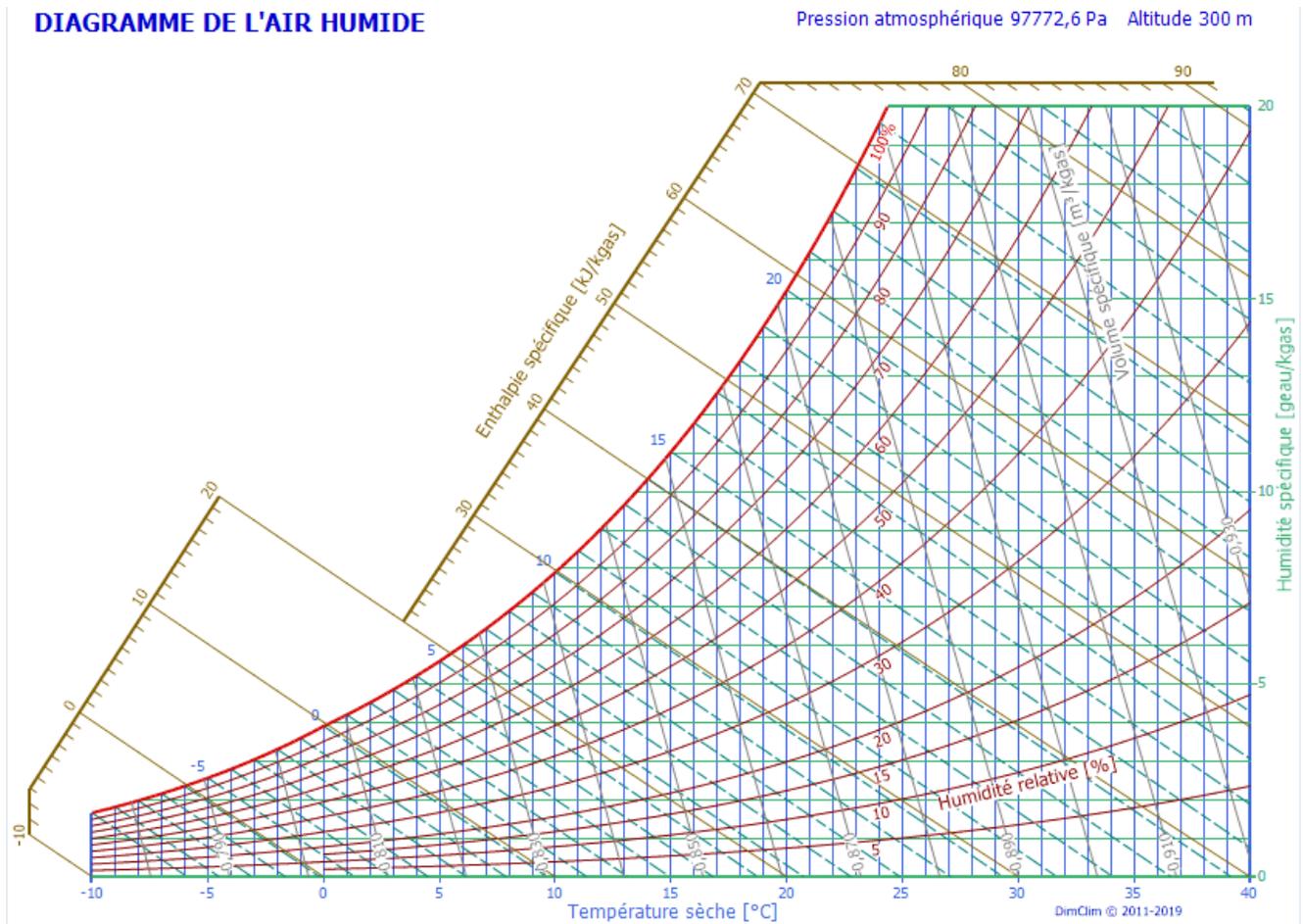
Le diagramme de **psychrométrique** permet de connaître les principales propriétés de l'air humide :

- ✓ Température sèche notée  $\theta_s$  ou simplement  $\theta$  en [°C]
- ✓ Humidité absolue ou spécifique notée HA ou  $x$  en [kg/kg]
- ✓ Enthalpie spécifique notée  $h$  en [kJ/kg]
- ✓ Humidité relative HR en [%]
- ✓ Volume spécifique noté  $v$  en [m<sup>3</sup>/kg]
- ✓ Température de rosée notée  $\theta_r$  en [°C]
- ✓ Température humide notée  $\theta_h$  en [°C]

#### Limites et bornes des diagrammes:

- Température basse mini/maximale: -55 à 0°C
- Température haute mini/maximale: +15 à +160°C
- Humidité absolue mini / maximale: 0 à 70 g d'eau/kg air sec

- Pressions de 10000 Pa à 200000 Pa



**Fig. 3 :** Diagramme d'air humide

**Référence :**

Techniques de l'Ingénieur, Séchage Théorie et calculs.

Arun S. Mujumdar - Handbook of Industrial Drying, Fourth Edition-CRC Press (2014)