

Chapitre II : Air humide

**II.1 Introduction**

**II.2 Caractéristiques du produit humide**

*II.2.1 Humidité ou teneur en eau du produit*

**II.3 Caractéristiques de l'air**

*II.3.1 Humidité absolue de l'air humide*

*II.3.2 Humidité relative de l'air humide ou taux de saturation de vapeur d'eau dans l'air*

*II.3.3 Températures de l'air humide*

*II.3.4 Enthalpie de l'air humide*

*II.3.5 Point de rosée ou température de rosée*

*II.3.6 Diagramme enthalpique (H-X)*

**II.4 Application**

Chapitre II : Air humide

**II.1 Introduction**

La capacité évaporatoire d'un séchoir (débit d'eau évaporée) dépend des caractéristiques du produit humide à sécher mais aussi des caractéristiques de l'air de séchage. Nous notons que nous traiterons uniquement que la technique de séchage par l'air, c'est-à-dire **le séchage par entraînement** qui est la technique la plus répandue par ailleurs.

**II.2 Caractéristiques du produit humide**

**II.2.1 Humidité ou teneur en eau du produit**

La masse totale du produit humide = masse eau + masse du produit sec

$$m_{ph} = m_e + m_{ps} \quad (\text{kg}) \dots\dots\dots(1)$$

Ils existent deux types d'humidité du produit:

1. **Humidité absolue du produit**
2. **Humidité relative du produit**

**1- Humidité absolue du produit « X » (teneur en eau à base sèche)**

Est la masse d'eau contenue dans le produit sec.

$$X (\%) = m_e / m_{ps} = (m_h - m_{ps}) / m_{ps} \quad \times 100 \dots\dots\dots(2)$$

$$0 \leq X \leq 100\%$$

**2- Humidité relative du produit « Xr » (teneur en eau à base humide)**

Est la masse d'eau contenue dans le produit humide.

$$Xr (100\%) = m_e / m_{ph} = (m_h - m_{ps}) / m_{ph} \quad \times 100 \dots\dots\dots(3)$$

$$0 \leq Xr \leq 100\%$$

Les deux grandeurs sont reliées par:

$$X = X_r / (1 - X_r) \dots\dots\dots(4)$$

$$X_r = X / (1 + X) \dots\dots\dots(5)$$

L'eau dans les aliments présente différentes propriétés physicochimiques selon ses états de liaison avec les macromolécules de l'aliment et avec les molécules d'eau entre elles.

- **L'eau libre ou l'humidité libre** est localisée à la surface du produit représente la grande part d'humidité du produit. L'eau libre est mobile et conserve toutes les propriétés de l'eau pure et qui est facile à éliminer par évaporation.
- **L'eau liée ou l'humidité liée** se trouve au fond des pores qu'on l'appelle difficile à éliminer. Elle forme une couche monomoléculaire étroitement associée par divers types de liaisons aux protéines et aux glucides. Cette eau est fixe et elle possède la particularité de s'échapper à la congélation car les interactions eau-macromolécules sont plus fortes que celles des molécules d'eau cristallisées entre elles.

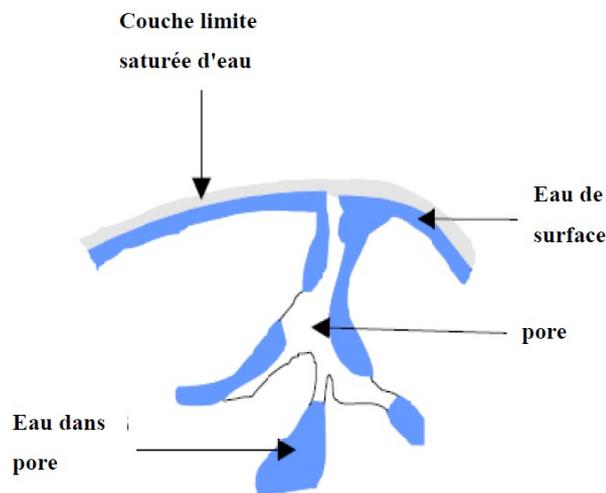


Figure.1 Représentation schématique d'un solide humide

**II.3 Caractéristiques de l'air**

L'étude des relations entre l'air et l'eau qui s'associe à cet air s'appelle la «psychrométrie»

**II.3.1 Humidité absolue de l'air humide**

Est la masse de vapeur d'eau contenue dans l'air sec. Représente la concentration en vapeur d'eau de l'air de séchage.

$$\text{Ha ou } X_a = m_{ve}/m_{as} = (m_{ah} - m_{as})/m_{as} \quad g_{ve}/kg_{as} \text{ ou } kg_{ve}/kg_{as} \dots\dots\dots(6)$$

La masse totale de l'air humide = masse vapeur d'eau + masse de l'air sec

$$m_{ah} = m_{ve} + m_{as} \quad (\text{kg}) \dots\dots\dots(7)$$

Si on considère P la pression totale du mélange de gaz et de vapeur, on peut écrire dans le cas de l'air humide :

$$\text{Ha ou } X_a = 18/29 P_v/(P - P_{ve}) = 0,622 P_v/(P - P_{ve}) \quad \dots\dots\dots(8)$$

Avec : 18 : masse molaire de l'eau

29 : masse molaire de l'air sec

Pair humide = P = P<sub>as</sub> + P<sub>ve</sub>

**II.3.2 Humidité relative de l'air humide ou taux de saturation de vapeur d'eau dans l'air**

Exprime la proportion de vapeur d'eau contenu dans l'air par rapport à la saturation. Représente aussi la masse de vapeur dans l'air à T° donnée par rapport à la masse de vapeur d'eau pouvant saturer l'air à T° donnée.

$$\text{Hr ou } X_r (100\%) = P_v/P_{vs} \quad X \ 100 \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$0 \leq Hr \leq 100\%$$

Avec : P<sub>v</sub> : pression partielle de vapeur d'eau

P<sub>vs</sub> : pression partielle de vapeur d'eau saturante

Exemple :

- $H_r=1$  ou  $H_r=100\%$  : l'air est saturé d'humidité, exemple : forêt équatoriale.
- $H_r \nearrow$  : l'air contient beaucoup de vapeur d'eau : temps lourd.
- $H_r \searrow$  : l'air contient que très peu de vapeur d'eau : idéal pour sécher un solide exemple : séchage du linge.

$H_r$ : renseigne la capacité de cet air de séchage à se charger de vapeur d'eau au cours d'un séchage. L'air ne peut prendre que la quantité qui le sature

### II.3.3 Températures de l'air humide

- **Température du bulbe sec (température sèche) «  $T_s$  »**: la température indiquée par un thermomètre ordinaire.
- **Température du bulbe humide (température humide) «  $T_h$  »**: la température indiquée par un thermomètre dont le bulbe est recouvert par une mèche maintenue mouillée et exposée à un courant d'air.

Le psychromètre : a été inventé en 1825 par Gay-Lussac et utilisé jusque dans les années 1970. Mais les météorologues n'y ont plus recours depuis le milieu des années 1990 qui permet de mesurer l'humidité relative de l'air. Il se compose de deux thermomètres fixés à un support unique : un thermomètre dit sec et un thermomètre dit mouillé. Le premier mesure simplement la température de l'air. Le second est maintenu humide à l'aide, par exemple, d'une mousseline imbibée d'eau. Lorsque cette eau s'évapore, elle refroidit le thermomètre mouillé.

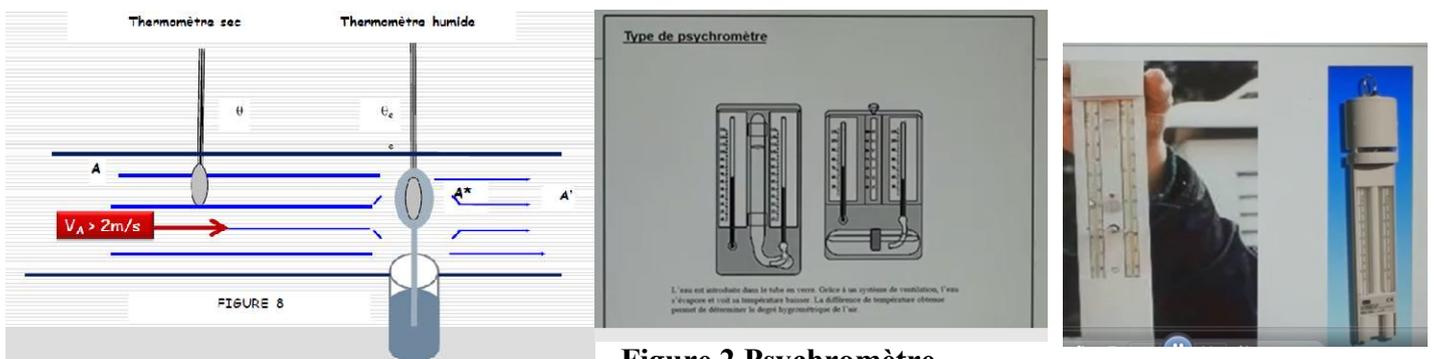


Figure.2 Psychromètre.

Plus l'air est sec, plus l'évaporation est importante et plus la température du thermomètre mouillé est basse. L'écart entre les deux mesures est alors élevé. En revanche, à 100 % d'humidité, la température de l'air et celle donnée par le thermomètre mouillé sont identiques. Pour déterminer l'humidité, il faut avoir recours à une table psychrométrique qui en donne la valeur en fonction des différences de température affichées.

- $T_s - T_h \searrow$  :  $H_r \nearrow$
- $T_s - T_h \nearrow$  :  $H_r \searrow$
- $T_s = T_h$  :  $H_r = 1$  ou  $100\%$

**II.3.4 Enthalpie de l'air humide  $H$  (kJ/kg)**

L'enthalpie de l'air humide définit le contenu énergétique de cet air.

**II.3.5 Point de rosée ou température de rosée**

Température à laquelle la vapeur d'eau contenue dans l'air commence à se condenser.

**II.3.6 Diagramme enthalpique (H-X)**

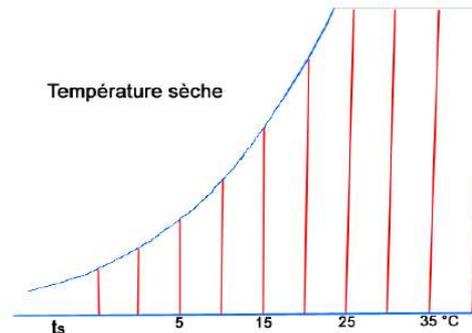
Le diagramme H-X est un outil graphique qui permet par lecture directe de définir les caractéristiques de l'air humide. Deux grandeurs suffisent seulement pour déterminer ces caractéristiques.

**1. Température de bulbe sec**

L'axe horizontal représente une grandeur fondamentale du diagramme psychrométrique que l'on appelle plus couramment :

**température sèche** :  $t_s$ , en °C.

Les lignes verticales, appelées isothermes sont des lignes où la température sèche est constante.

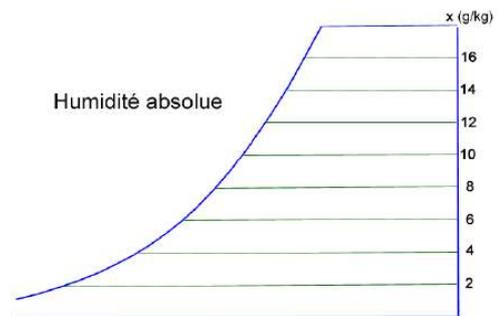


**2. Humidité absolue**

L'axe vertical de droite représente cette autre grandeur fondamentale qui indique la teneur en vapeur d'eau de l'air considéré.

L'humidité absolue  $x$  (ou  $w$ ) s'exprime en *gramme* d'eau par *kilogramme* d'air (**g/kg**).

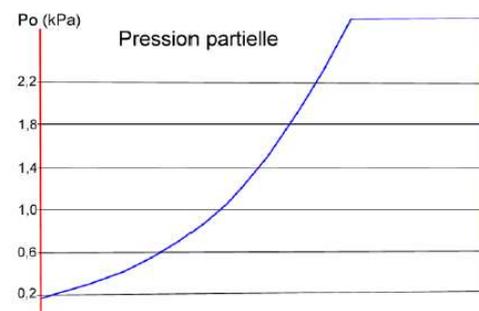
Les lignes horizontales, appelées *isohydres*, sont des lignes à teneur en vapeur d'eau constante.



**3. Pression partielle**

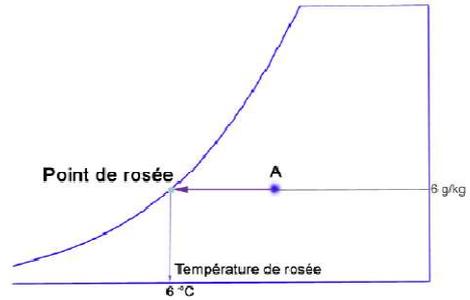
L'axe vertical de gauche représente la pression partielle  $P_o$  de la vapeur d'eau contenue dans l'air considéré. Elle s'exprime en **kPa** (kilo Pascal) ou en **mbar** (millibar).

La concentration en vapeur d'eau peut augmenter (en suivant une *isotherme*) jusqu'à ce que l'air atteigne l'état de saturation ; cet état est représenté par la courbe incurvée la plus à gauche qui permet de déterminer la pression de saturation  $P_{sat}$  lue sur l'axe des pressions.



4. Température de rosée

Si on se déplace à partir d'un point **A** du diagramme, sur une *isohyde*, de droite à gauche on atteint la courbe de saturation en un point appelé **point de rosée**, dont la température lue sur l'axe horizontal est la **température de rosée de A** :  $t_r$ .

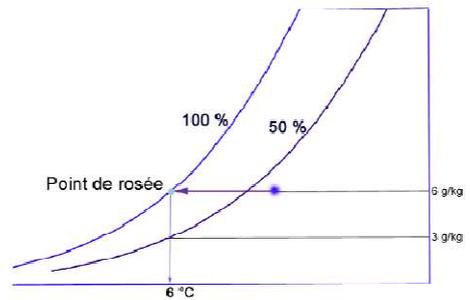


5. Humidité relative

L'air situé sur la ligne de saturation, citée plus haut, est saturé de vapeur d'eau. On dit que son humidité relative  $H_r$  est de 100 %. C'est une ligne à humidité relative constante.

Si l'on divise la teneur en vapeur d'eau par deux, l'air se trouve sur une ligne saturée de moitié, c'est-à-dire à  $H_r = 50\%$  ( on peut écrire aussi :  $\phi = 50\%$  ).

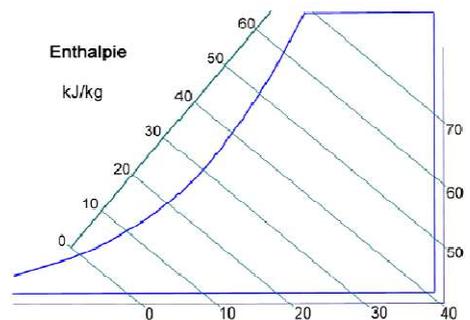
On peut tracer ainsi un réseau de courbes à différentes valeurs d'humidité relative constante.



6. Enthalpie

L'enthalpie  $h$  est la quantité de chaleur totale de l'air humide considéré. Elle s'exprime en **kJ/kg** (ou en kcal/kg, autrefois). On considère que, l'air dont sa température  $t_s = 0\text{ °C}$  et sa teneur en vapeur d'eau  $x = 0\text{ g/kg}$ , a une enthalpie  $h = 0\text{ kJ/kg}$ .

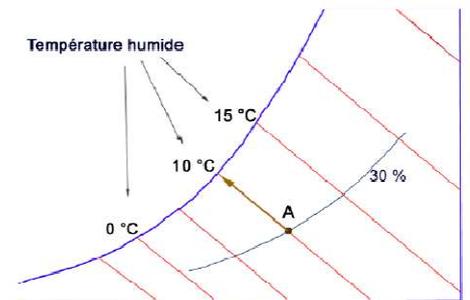
Le réseau de droites obliques perpendiculaires à l'échelle des enthalpies constitue des lignes à enthalpie constante, appelées *isenthalpes*.



7. Température de bulbe humide

Si d'un point **A** du diagramme on se déplace sur une *isenthalpe*, on atteint la courbe de saturation en un point dont la température lue sur l'axe horizontal est appelée communément température humide  $t_h$  du point initial considéré.

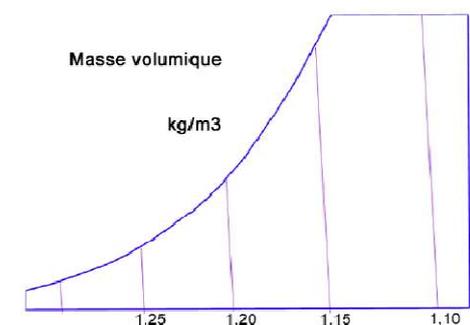
On mesure les températures sèche et humide au moyen d'un appareil comportant deux thermomètres, appelé *psychromètre*.



8. Masse volumique

Les lignes légèrement inclinées vers la gauche sont des droites à masse volumique  $\rho$  constante. Elles s'expriment en  $\text{kg/m}^3$ .

Pour déterminer exactement l'état dans lequel se trouve un air humide considéré pris à une pression barométrique donnée, il suffit d'en connaître deux grandeurs physiques. Les autres peuvent être déterminées à l'aide du diagramme psychrométrique.



Exemple :

**II.4 Application**

Positionner sur le diagramme de l'air humide les points donnés par deux de leurs caractéristiques et compléter le tableau suivant:

Caractéristiques	Point B	Point C	Point D
ts (° C)	20° C	25° C	
x (g/kg) (ω)			4 g/kg
P (mbar)			
tr (° C)			
φ (%)		50 %	
h (hJ/kg)			
th (° C)	15° C		10° C
ρ (kg/m³)			