



Yves JANNOT

Septembre 2005

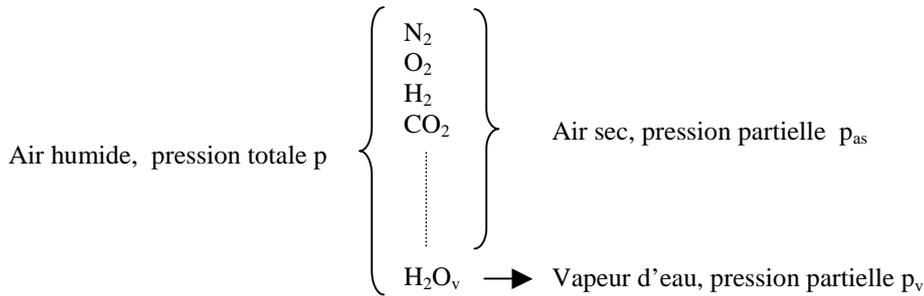
L'AIR HUMIDE

TABLE DES MATIERES

1	GENERALITES	2
2	GRANDEURS RELATIVES A L'AIR HUMIDE	2
2.1	TEMPERATURES ET HUMIDITES	2
2.2	ENTHALPIE SPECIFIQUE.....	3
2.3	RELATIONS ENTRE LES DIFFERENTES GRANDEURS	4
2.3.1	<i>Relation entre p_v et x</i>	4
2.3.2	<i>Relation entre p_v, T et T_h</i>	4
2.3.3	<i>Masse volumique</i>	6
2.3.4	<i>Grandeurs indépendantes</i>	6
3	DIAGRAMME DE L'AIR HUMIDE	7
3.1	BUT	7
3.2	CONSTRUCTION D'UN DIAGRAMME.....	7
3.2.1	<i>Courbe de saturation</i>	7
3.2.2	<i>Courbe d'égale humidité absolue</i>	7
3.2.3	<i>Courbe d'égale humidité relative</i>	7
3.2.4	<i>Courbe d'égale température humide</i>	7
3.2.5	<i>Isenthalpes</i>	8
3.2.6	<i>Courbe d'égale masse volumique</i>	8
3.3	UTILISATION D'UN DIAGRAMME DE L'AIR HUMIDE	8
4	PROGRAMME « AIR HUMIDE »	9
5	EXEMPLES D'EVOLUTION DE L'AIR HUMIDE	9
5.1	ECHAUFFEMENT A PRESSION CONSTANTE	9
5.2	REFROIDISSEMENT A PRESSION CONSTANTE	10
5.3	HUMIDIFICATION ADIABATIQUE	10
6	MESURE DE L'HUMIDITE DE L'AIR	11
6.1	HYGROMETRE A CHEVEUX.....	11
6.2	PSYCHROMETRE OU THERMOMETRE A BULBE HUMIDE	12
6.3	HYGROMETRE A POINT DE ROSEE.....	12
6.4	HYGROMETRE CAPACITIF.....	13
ANNEXE A.2.1 : PROPRIETES THERMODYNAMIQUES DE L'EAU		14
ANNEXE A.3.1 : DIAGRAMME DE L'AIR HUMIDE A COMPLETER		15
ANNEXE A.3.2 : DIAGRAMME DE L'AIR HUMIDE		16
ANNEXE A.4.1 : PROGRAMME « AIR HUMIDE »		17

1 GENERALITES

Si les principaux constituants de l'air sont l'oxygène et l'azote, l'air n'en contient pas moins un certain nombre d'autres gaz dont la vapeur d'eau :

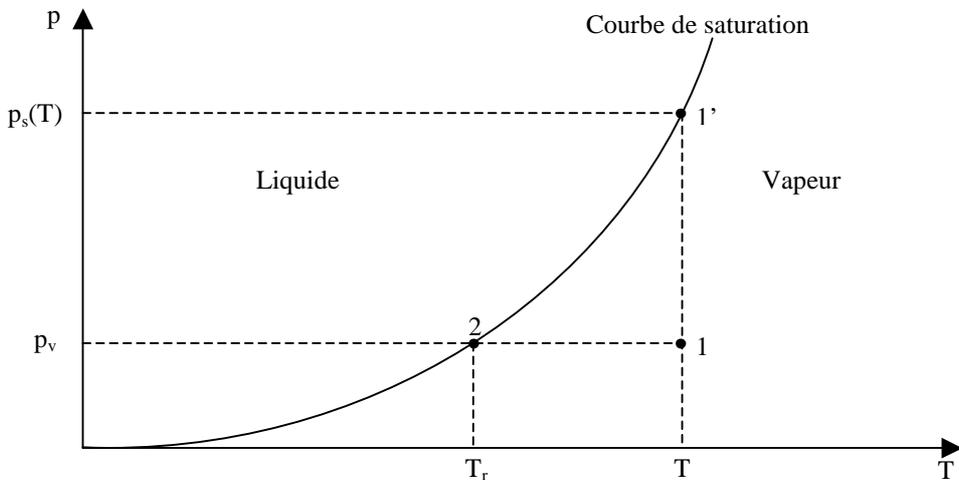


La pression partielle p_v de vapeur d'eau dans l'atmosphère n'est jamais nulle quelque soit le lieu et la saison, même si sa valeur peut varier fortement. Par exemple on note les valeurs mensuelles moyennes suivantes à Ouagadougou (climat sahélien) : $p_v = 4$ mmHg en février et $p_v = 20$ mmHg en avril.

2 GRANDEURS RELATIVES A L'AIR HUMIDE

2.1 Températures et humidités

Représentons dans un diagramme (p, T) le point 1 représentatif de la vapeur d'eau de pression partielle p_v contenue dans de l'air de température T et de pression totale p :



$p_s(T)$ est la pression de saturation (d'équilibre liquide-vapeur) de la vapeur d'eau à la température T . On trouvera en annexe A1 un tableau donnant les propriétés de l'eau. On peut également utiliser la **formule de Dupré** valable entre -50°C et $+200^\circ\text{C}$ pour calculer $p_s(T)$:

$$p_s(T) = \exp \left[46,784 - \frac{6435}{T + 273,15} - 3,868 \ln (T + 273,15) \right] \quad (2.1)$$

Où : T Température en $^\circ\text{C}$
 $p_s(T)$ Pression de saturation en mmHg.

La vapeur d'eau se présente dans l'air sous forme de vapeur si $p_v \leq p_s(T)$, on définit alors l'**humidité relative HR** de l'air par la relation :

$$(0 \leq HR \leq 100\%) \quad \boxed{HR = \frac{p_v}{p_s(T)} \times 100} \quad (2.2)$$

Si l'on refroidit l'air à pression constante, son humidité relative va augmenter jusqu'à atteindre la valeur 100% au point 2 sur la courbe de saturation. Il se produit un équilibre vapeur-liquide et les premières gouttes d'eau condensée vont apparaître, la température du point 2 est appelée la **température de rosée** T_r de l'air. Elle est définie par :

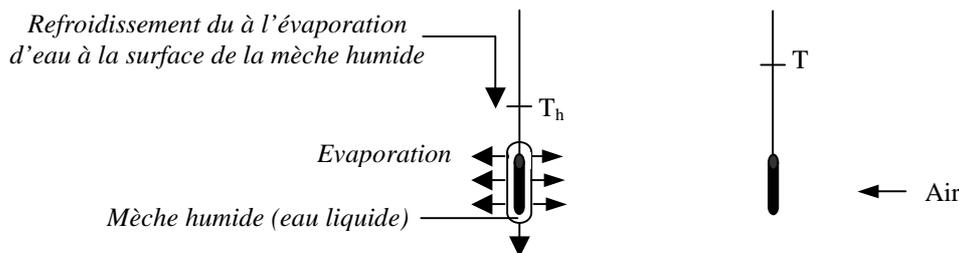
$$\boxed{p_v = p_s(T_r)} \quad (2.3)$$

On définit une autre grandeur caractéristique de l'air humide : c'est l'**humidité absolue** x ($\text{kg}_{\text{eau}} \cdot \text{kg}_{\text{as}}^{-1}$) définie comme étant la masse de vapeur d'eau contenue dans l'air par kg d'air sec :

$$\boxed{x = \frac{m_v}{m_{\text{as}}}} \quad (2.4)$$

Où m_v et m_{as} sont les masses de vapeur d'eau et d'air sec contenues dans un même volume V d'air humide, $(1+x)$ kg d'air humide contient donc 1 kg d'air sec et x kg de vapeur d'eau.

On définit enfin une dernière grandeur caractéristique qui est la **température humide** T_h de l'air : c'est la température d'équilibre d'une masse d'eau s'évaporant dans l'air dans le cas où la chaleur nécessaire à l'évaporation n'est prélevée que sur l'air.



La différence $(T - T_h)$ est représentative de l'humidité relative HR de l'air car :

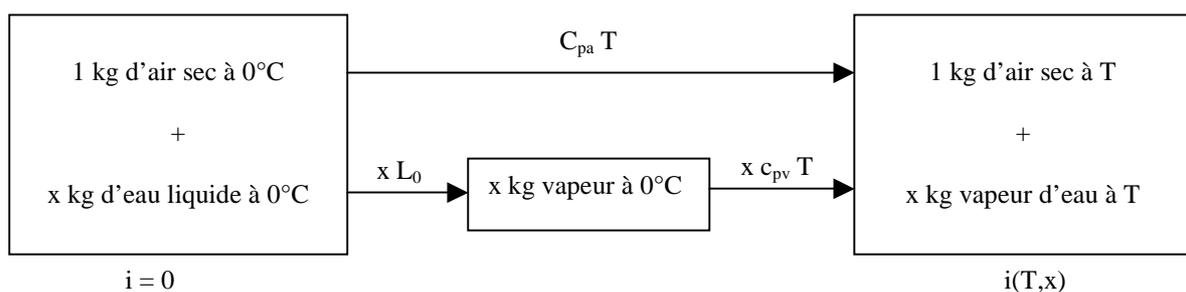
- Elle est nulle si l'air est saturé en vapeur d'eau soit si $HR = 100\%$: pas d'évaporation possible.
- Elle augmente avec la différence $[p_s(T) - p_v]$ qui est le terme moteur du transfert de masse donc elle diminue quand $HR = \frac{p_v}{p_s(T)}$ augmente.

2.2 Enthalpie spécifique

C'est la chaleur totale contenue dans une masse $(1+x)$ d'air humide, l'origine des enthalpies correspondant à de l'air sec et à de l'eau liquide à 0°C .

L'**enthalpie spécifique** i s'écrit donc :

$$\boxed{i(T, x) = c_{pa} T + x (L_0 + c_{pv} T)} \quad (2.5)$$



Où :	c_{pa}	Chaleur massique de l'air sec	$c_{pa} = 1006 \text{ J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$
	c_{pv}	Chaleur massique de la vapeur d'eau	$c_{pv} = 1840 \text{ J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$
	L_0	Chaleur latente de vaporisation de l'eau à 0°C	$L_0 = 2501 \text{ kJ.kg}^{-1}$

2.3 Relations entre les différentes grandeurs

2.3.1 Relation entre p_v et x

Considérons $(1+x)$ kg d'air humide d'humidité absolue x , de température T et de pression partielle de vapeur d'eau p_v , la pression totale étant p et le volume occupé V .

La loi des gaz parfaits permet d'écrire :

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{as} V = 1 \frac{R}{M_{as}} T \\ p_v V = x \frac{R}{M_v} T \end{array} \right. \longrightarrow \left\{ \begin{array}{l} M_{as} p_{as} = \frac{R T}{V} \\ \frac{M_v p_v}{x} = \frac{R T}{V} \end{array} \right.$$

d'où : $x = \frac{M_v p_v}{M_{as} p_{as}}$ or : $p_{as} = p - p_v$

On obtient :

$$x = \delta \frac{p_v}{p - p_v} \quad (2.6)$$

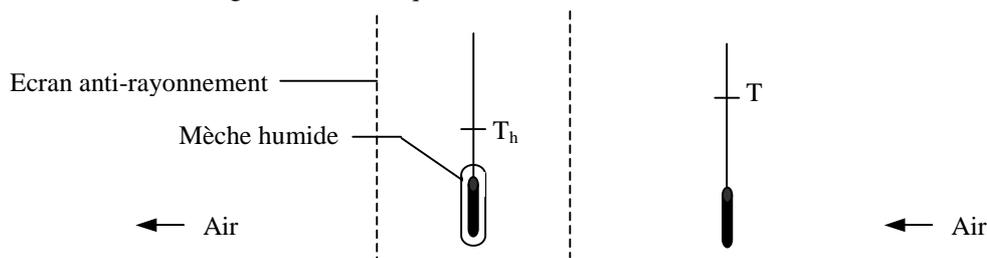
où $\delta = \frac{M_v}{M_{as}} = 0,622$

Ou en inversant :

$$p_v = \frac{x p}{\delta + x} \quad (2.7)$$

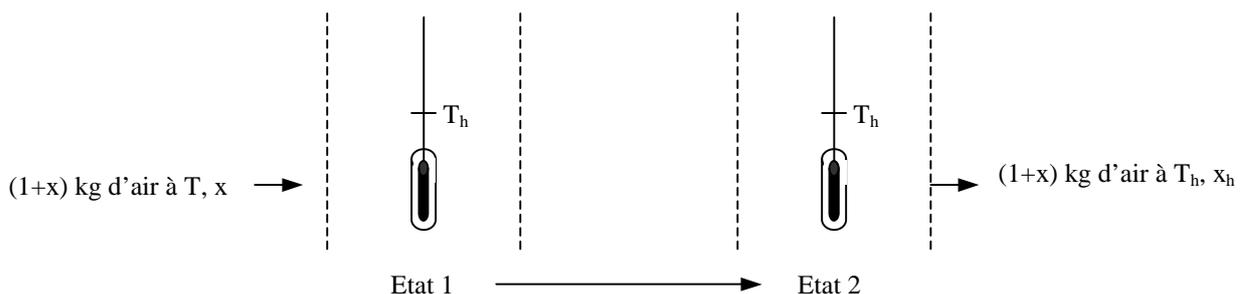
2.3.2 Relation entre p_v , T et T_h

Considérons un thermomètre dont le bulbe recouvert d'une mèche (tissu, coton, gaze, ...) imbibée d'eau est placé dans un écoulement d'air. Le thermomètre est protégé des apports de chaleur extérieurs par un écran anti-rayonnement donc il n'échange de la chaleur qu'avec l'air :



Par définition, la température indiquée par le thermomètre, qui est celle de la masse d'eau entourant le bulbe en équilibre avec l'air, est la température humide T_h de l'air.

Effectuons un bilan d'énergie sur le système eau liquide + air passant au voisinage de la mèche humide (saturé après échange) subissant la transformation suivante :



Il n'y a pas d'apport d'énergie extérieure donc l'enthalpie du système est constante et : $H_1 = H_2$.

$$H_1 = m_1 c_{pl} T_h + (c_{pa} + x c_{pv}) T + x L_0$$

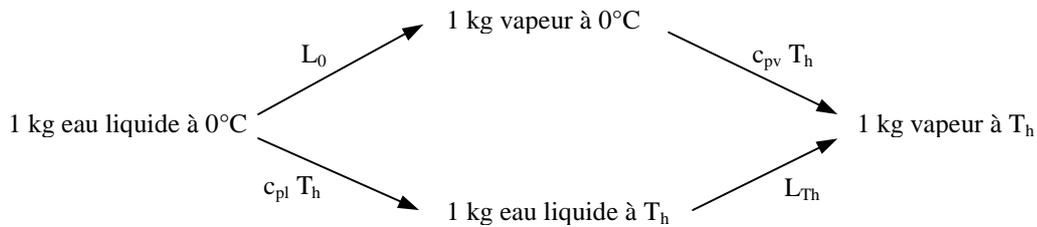
$$H_2 = [m_1 - (x_h - x)] c_{pl} T_h + (c_{pa} + x_h c_{pv}) T_h + x_h L_0$$

$$H_1 = H_2 \rightarrow (x_h - x) L_0 - (x_h - x) c_{pl} T_h + c_{pa} (T_h - T) + x_h c_{pv} T_h - x c_{pv} T = 0$$

$$H_1 = H_2 \rightarrow (x_h - x) (L_0 - c_{pl} T_h) + c_{pa} (T_h - T) + x_h c_{pv} T_h - x c_{pv} T + x c_{pv} T_h - x c_{pv} T_h = 0$$

$$H_1 = H_2 \rightarrow (x_h - x) [L_0 + (c_{pv} - c_{pl}) T_h] + (c_{pa} + x c_{pv}) (T - T_h) = 0$$

$$\text{Or : } L_{Th} = L_0 + (c_{pv} - c_{pl}) T_h :$$



$$\text{Donc : } H_1 = H_2 \rightarrow (x_h - x) L_{Th} + (c_{pa} + x c_{pv}) (T_h - T) = 0$$

Que l'on écrit :

$$(x_h - x) L_{Th} = (c_{pa} + x c_{pv}) (T - T_h) \quad (2.8)$$

La valeur de L_{Th} peut être calculée avec une erreur relative inférieure à 1% par la formule suivante valable entre 0 et 180°C :

$$L_T = 2501 - 2,65 T \quad (2.9)$$

Où : L_T Chaleur latente d'évaporation de l'eau à la température T en kJ.kg^{-1} .
 T Température en °C

On préfère souvent faire intervenir la pression de vapeur p_v , il suffit de transformer la formule (2.8) à l'aide des relations établies précédemment :

$$x = \delta \frac{p_v}{p - p_v} \quad \text{et} \quad x_h = \delta \frac{p_s(T_h)}{p - p_s(T_h)} \quad (\text{Air saturé après contact avec le bulbe humide})$$

On obtient :

$$\delta \left[\frac{p_s(T_h)}{p - p_s(T_h)} - \frac{p_v}{p - p_v} \right] L_{Th} = \left[c_{pa} + \delta \frac{p}{p - p_v} c_{pv} \right] (T - T_h) \quad (2.10)$$

$$\text{d'où : } \frac{p_v}{p - p_v} = \frac{\delta \frac{p_s(T_h)}{p - p_s(T_h)} L_{Th} - c_{pa} (T - T_h)}{L_{Th} + c_{pv} (T - T_h)}$$

En remarquant que : $c_{pv} (T - T_h) \ll L_{Th}$ et que : $p - p_v \approx p - p_s(T_h)$

On aboutit à la forme suivante :

$$p_v = p_s(T_h) - \frac{c_{pa} (T - T_h) [p - p_s(T_h)]}{\delta L_{Th}} \quad (2.11)$$

Cette relation est parfois mise sous la forme : $p_v = p_s(T_h) - A(T - T_h)$

Où $A = \frac{c_{pa} [p - p_s(T_h)]}{\delta L_{Th}}$ est appelée la constante psychrométrique.

2.3.3 Masse volumique

Considérons une masse $(1+x)$ kg d'air humide d'humidité absolue x , de température T et de pression partielle de vapeur d'eau p_v , la pression totale étant p et le volume occupé V .

La masse volumique de cet air s'écrit : $\rho = \frac{1+x}{V}$

En appliquant la loi des gaz parfaits à l'air sec et à la vapeur d'eau on obtient :

$$\begin{cases} p_{as} V = 1 \frac{R}{M_{as}} T \\ p_v V = x \frac{R}{M_v} T \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} 1 = \frac{p_{as} M_{as} V}{R T} \\ x = \frac{p_v M_v V}{R T} \end{cases}$$

Par sommation, on obtient : $1+x = \frac{1}{R T} (M_{as} p_{as} + M_v p_v) = \frac{M_{as}}{R T} \left(p_{as} + \frac{M_v}{M_{as}} p_v \right)$

Or : $p_{as} = p - p_v$ et $\frac{M_v}{M_{as}} = \delta$ donc $\rho = \frac{M_{as}}{R T} (p - p_v + \delta p_v)$

Pour l'air sec dans les conditions de référence, à savoir : $p_0 = 101\,325$ Pa , $T_0 = 273,15$ K = 0°C, on peut écrire :

$$p_0 = \rho_0 \frac{R}{M_{as}} T_0 \quad \text{d'où} \quad \frac{M_{as}}{R} = \frac{\rho_0 T_0}{p_0}$$

Ce qui permet d'obtenir finalement :

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0}{T} \frac{p - (1-\delta)p_v}{p_0} \quad (2.12)$$

Avec : $p_0 = 760$ mmHg ; $T_0 = 273,15$ K et $\rho_0 = 1,293$ kg.m⁻³.

On peut également exprimer ρ en fonction de T et de x en remplaçant dans (2.12) p_v par $\frac{x p}{\delta + x}$ et l'on obtient :

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0}{T} \frac{p}{p_0} \frac{\delta(1+x)}{\delta+x} \quad (2.13)$$

2.3.4 Grandeurs indépendantes

Nous avons défini 8 grandeurs caractérisant l'état de l'air humide : $T, T_h, T_r, HR, x, p_v, i$ et ρ . Le problème est maintenant de savoir quel est le nombre de grandeurs indépendantes car pratiquement, ce sera le nombre de grandeurs à mesurer pour déterminer l'état de l'air humide.

Ces 8 grandeurs sont reliées entre elles par les 6 relations indépendantes (2.2), (2.3), (2.5), (2.6), (2.10) et (2.13) donc la variance du système est 2. Finalement, il suffit de connaître 2 grandeurs parmi $T, T_h, T_r, HR, x, p_v, i$ et ρ pour en déduire la valeur des 6 autres.

3 DIAGRAMME DE L'AIR HUMIDE

3.1 But

Le but est de construire un diagramme qui permette, par simple lecture et sans effectuer aucun calcul, de déterminer la valeur de toutes les grandeurs caractérisant l'air humide connaissant deux d'entre elles.

3.2 Construction d'un diagramme

Nous allons tracer à titre d'exemple un diagramme dans un système d'axes orthogonaux (p_v , T) gradués en mmHg et en °C (cf. annexe A2). Le diagramme sera tracé pour une pression d'air humide de 760 mmHg.

3.2.1 Courbe de saturation

On commence par tracer sur le diagramme la courbe de saturation qui est en fait la courbe HR = 100% car $p_v = \frac{HR}{100} p_s(T)$ donc $p_v = p_s(T_h) \rightarrow HR = 100\%$, en utilisant les tables ou la formule de Dupré.

3.2.2 Courbe d'égale humidité absolue

De la relation (2.6) : $x = \delta \frac{p_v}{p - p_v}$ nous déduisons que ces courbes sont des verticales, le diagramme étant tracé pour une pression totale constante $p = 760$ mmHg. Cela revient donc à effectuer une double graduation de l'axe des abscisses : l'une en mmHg pour p_v et l'autre en $g_{eau} \cdot kg_{as}^{-1}$ pour x , la correspondance étant donnée par la formule (2.6).

Exercice : Graduer l'axe des humidités absolues de 2 en 2 $g_{eau} \cdot kg_{as}^{-1}$ entre 0 et 16 $g_{eau} \cdot kg_{as}^{-1}$ sur le graphe vierge de l'annexe A2.

3.2.3 Courbe d'égale humidité relative

$$\text{D'après la relation (2.2) : } p_v = \frac{HR}{100} p_s(T)$$

Pour tracer, à une température T donnée, les points correspondants aux humidités relatives 0, 10, 20, ..., 90 et 100%, il suffit de partager le segment [AB] en 10 parties égales, le point A étant le point de coordonnées $(T, 0)$ et le point B étant le point d'intersection de l'isotherme (verticale) T avec la courbe de saturation.

Exercice : Tracer la courbe HR = 30% sur le graphe de l'annexe A2.

3.2.4 Courbe d'égale température humide

$$\text{D'après la relation (2.11) : } p_v = p_s(T_h) - \frac{c_{pa} (T - T_h) [p - p_s(T_h)]}{\delta L_{T_h}}$$

La pression totale p étant constante, à T_h fixé, la relation (2.11) est de la forme : $p_v = a_{T_h} + b_{T_h} T$, les courbes d'égale température humide sont donc des droites de pente $b_{T_h} = -\frac{c_{pa} [p - p_s(T_h)]}{\delta L_{T_h}}$. Pour les tracer il suffit

d'en déterminer deux points :

- Pour $T = T_h$, nous avons d'après (2.11) : $p_v = p_s(T_h)$, le point est donc sur la courbe de saturation (HR = 100%).
- Il suffit de déterminer un second point pour une autre valeur de T .

Exercice : Tracer la courbe $T_h = 15^\circ\text{C}$ sur le graphe de l'annexe A2.

3.2.5 Isenthalpes

D'après la formule (2.5) : $i(T, x) = C_{pa} T + x (L_0 + c_{pv} T)$

En remplaçant x par $x = \delta \frac{p_v}{p - p_v}$ il vient : $i(T, x) = C_{pa} T + \delta \frac{p_v}{p - p_v} (L_0 + c_{pv} T)$

Soit : $(i - c_{pa} T)(p - p_v) = \delta p_v (L_0 + c_{pv} T)$

$$\text{Ou : } p_v = \frac{p(i - c_{pa} T)}{\delta L_0 + i + (\delta c_{pv} - c_{pa})T}$$

Or : $(\delta c_{pv} - c_{pa})T = 0,138 T$ et $\delta L_0 = 1556 \text{ kJ.kg}^{-1}$ donc $(\delta c_{pv} - c_{pa})T \ll \delta L_0$ ce qui permet d'écrire :

$$p_v = \frac{p i}{\delta L_0 + i} - \frac{p c_{pa}}{\delta L_0 + i} T$$

Les isenthalpes sont donc des droites de pente $b_i = -\frac{p c_{pa}}{\delta L_0 + i}$

Pour les faibles valeurs de i et de T_h : $b_i \approx b_{Th}$ car $\frac{p c_{pa}}{\delta L_0 + i} \approx \frac{c_{pa} [p - p_s(T_h)]}{\delta L_0}$ et les isenthalpes sont

pratiquement parallèles aux courbes d'égales température humide

Pour tracer une isenthalpe, il suffit d'en connaître deux points, par exemple :

- Pour $T = 0^\circ\text{C}$: $p_v = \frac{p i}{\delta L_0 + i}$
- Pour $p_v = 0 \text{ mmHg}$: $i = c_{pa} T$

Exercice : Tracer l'isenthalpe $i = 40 \text{ kJ.kg}^{-1}$ sur le graphe de l'annexe A2.

3.2.6 Courbe d'égale masse volumique

D'après la formule (2.13) : $\rho = \rho_0 \frac{T_0}{T} \frac{p}{p_0} \frac{\delta(1+x)}{\delta+x}$ où T est la température en K.

On en déduit : $T = \frac{\rho_0 T_0}{\rho p_0} [p - (1-\delta)p_v] - 273.15$ si T est exprimé en $^\circ\text{C}$.

Les courbes d'égale masse volumique sont donc des droites de pente $-\frac{\rho_0 T_0}{\rho p_0} (1-\delta)$ dans un système d'axes (p_v, T) .

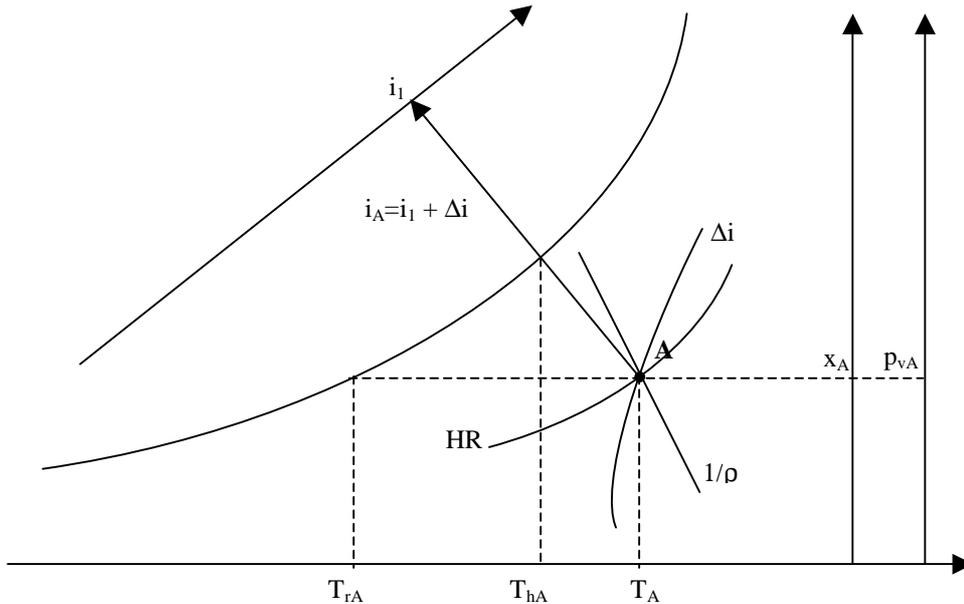
Exercice : Tracer la courbe $\rho = 1,2 \text{ kg.m}^{-3}$ sur le graphe de l'annexe A2.

3.3 Utilisation d'un diagramme de l'air humide

Pour des raisons de commodité, nous avons tracé le diagramme de l'air humide dans un système d'axes orthogonaux (p_v, T) ce qui correspond au diagramme de Carrier. Il existe plusieurs autres types de diagramme, par exemple :

- Le diagramme de Mollier : p_v, i
- Le diagramme de Veron : T, x à coordonnées obliques à 92°
- Le diagramme de Missenard : $i, x \dots$

On trouvera en annexe A3 un diagramme de Carrier qui ne diffère du diagramme que nous avons tracé que par l'orientation des axes, le principe de construction des différentes courbes étant identique. La lecture des différentes grandeurs de l'air humide sur le diagramme s'effectue de la manière suivante :



Lecture des grandeurs caractéristiques d'un état de l'air sur le diagramme de l'air humide

4 PROGRAMME « AIR HUMIDE »

Il peut également être intéressant d'écrire un programme (utilisable sur un micro-ordinateur ou une calculatrice programmable) pour calculer l'ensemble des grandeurs caractéristiques de l'air humide connaissant deux d'entre elles et qui se substitue donc au diagramme de l'air humide.

On trouvera en annexe A.4.1 un programme écrit en Basic pour une calculatrice de poche, il permet de résoudre les 3 types de problèmes les plus couramment rencontrés dans la pratique :

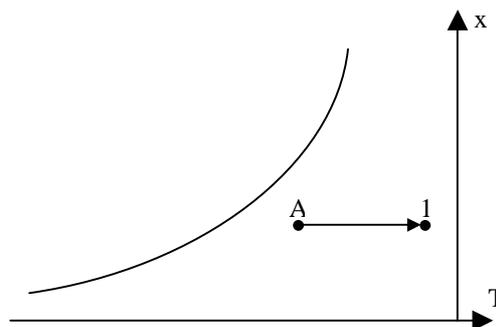
- On connaît p , T et HR → Thermohygromètre
- On connaît p , T et T_h → Thermomètres sec et humide
- On connaît p , T et p_v → Données météorologiques, échauffement à pression constante.

Le programme « Air Humide » présenté calcule, quelque soit le cas, toutes les grandeurs caractéristiques de l'air humide, à savoir : T , T_h , T_r , HR , x , p_v , i et ρ .

L'avantage de l'utilisation de ce programme réside dans sa simplicité d'utilisation et dans la meilleure précision des résultats par rapport à une lecture sur le diagramme. Il permet également de tenir compte de la pression atmosphérique du lieu considéré qui peut être sensiblement différente de 760 mmHg. Le diagramme de l'air humide reste toutefois très utile pour visualiser les différentes transformations de l'air.

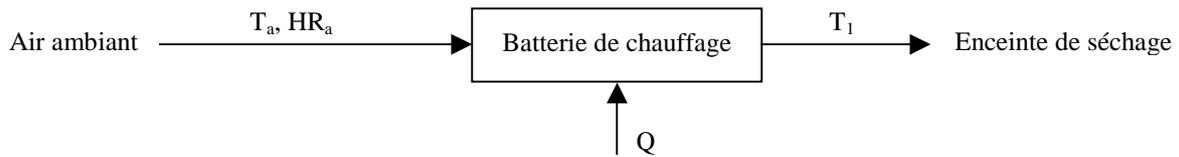
5 EXEMPLES D'EVOLUTION DE L'AIR HUMIDE

5.1 Echauffement à pression constante



Représentation d'un échauffement à pression constante sur le diagramme de l'air humide

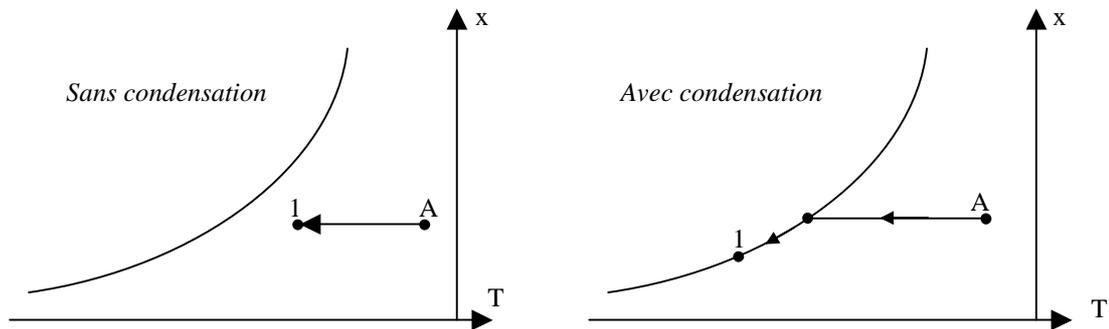
C'est le type de transformation subi par l'air lors de son échauffement dans un échangeur de chaleur, sur des résistances chauffantes ou dans un capteur solaire :



Exercice :

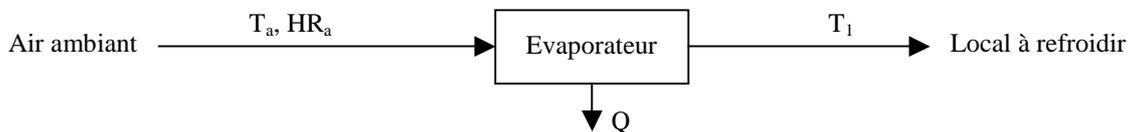
On donne : $T_a = 25^\circ\text{C}$, $HR_a = 65\%$ et $T_1 = 50^\circ\text{C}$. Calculer toutes les caractéristiques de l'air humide à l'entrée et à la sortie de la batterie de chauffage.

5.2 Refroidissement à pression constante



Représentation d'un refroidissement à pression constante sur le diagramme de l'air humide

C'est la transformation subie par l'air lors de son passage sur l'évaporateur d'un système frigorifique, il peut se produire une condensation avec diminution de l'humidité absolue si la température finale est inférieure à la température de rosée :



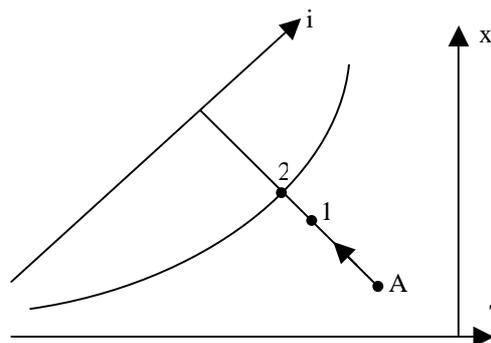
Exercice :

On donne : $T_a = 30^\circ\text{C}$, $HR_a = 30\%$ et $T_1 = 20^\circ\text{C}$. Calculer toutes les caractéristiques de l'air humide à l'entrée et à la sortie de l'évaporateur.

Calculer la masse d'eau condensée par kg d'air sec si $T_1 = 5^\circ\text{C}$.

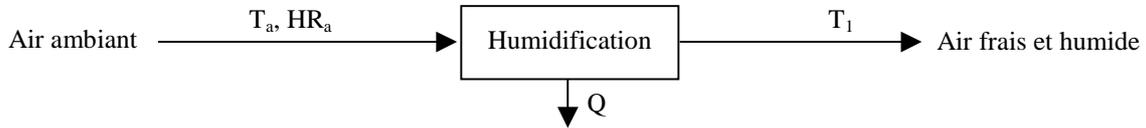
5.3 Humidification adiabatique

C'est le type de transformation subi par l'air lors de son passage dans un séchoir convectif ou dans une tour de refroidissement :



Représentation d'une humidification adiabatique sur le diagramme de l'air humide

Cette transformation $A \rightarrow 1$ est aussi appelée refroidissement évaporatif direct. On définit un rendement d'humidification de l'air par le rapport $\frac{T_A - T_1}{T_A - T_2}$, c'est le rapport du refroidissement réel sur le refroidissement maximal que l'on obtiendrait si l'air était saturé ($HR = 100\%$) en fin de transformation :



Exercice :

On donne : $T_a = 37,5^\circ\text{C}$ et $HR_a = 15\%$. Calculer la température minimale que l'on pourrait atteindre par simple humidification de l'air. Déterminer les variations d'enthalpie et d'humidité correspondantes.

En fait, pour éprouver une sensation de confort thermique, l'humidité relative ne doit pas dépasser 70%. Calculer la température minimale que l'on peut atteindre si l'on veut rester dans la zone de confort. Quel est alors le rendement d'humidification ?

6 MESURE DE L'HUMIDITE DE L'AIR

6.1 Hygromètre à cheveux

Principe de mesure :

Cet appareil de mesure simple permet de mesurer l'humidité relative HR de l'air. Son principe repose sur le fait que la variation de longueur d'un cheveu dépend de l'humidité de l'air. Un exemple de thermohygrographe est donné ci-après. La précision de la mesure est de $\pm 3\%$.

Thermomètre/Hygromètre enregistreur

Suivez les graphiques de la température et de l'hygrométrie sur papier

Enregistreur de Température et Hygrométrie locale

Caractéristiques de la référence J-ET-TERM-HYGRO

- Capteur Bi-lame de Températures précision $\pm 0,5^\circ\text{C}$
- Capteur par faisceau de cheveux d'Hygrométrie de 0 à 100% HR $\pm 5\%$
- Mouvement quartz réglable sur 24h ou 7 Jours
- Poignée de transport, et fermeture à clef.

Modèles au CHOIX:

- 00081--> de -20 à $+40^\circ\text{C}$ / 0 à 100% HR- Référence Diagramme 7 jours: 00333
- 00080--> de -10 à $+65^\circ\text{C}$ / 0 à 100% HR- Référence Diagramme 7 jours: 00343
- 00129--> de $+05$ à $+35^\circ\text{C}$ / 0 à 100% HR- Référence Diagramme 7 jours: 00433



Exemple d'hygromètre à cheveux

6.2 Psychromètre ou thermomètre à bulbe humide

Le thermomètre à bulbe humide dont le principe a été décrit au §2.1 permet de mesurer la température humide T_h de l'air. La mesure conjointe de la température « sèche » T de l'air permet de déterminer les autres caractéristiques. Certaines précautions doivent toutefois être prises :

- Le thermomètre humide doit toujours être recouvert d'eau liquide. Si l'on tarde trop, la mèche s'assèche, sa température s'élève et ne correspond plus à T_h .
- La vitesse de circulation de l'air doit être supérieure à 2 m.s^{-1} pour que les effets du rayonnement soient négligeables vis-à-vis de la convection.
- Le thermomètre sec ne doit pas être perturbé par le thermomètre humide qui refroidit un peu l'air.

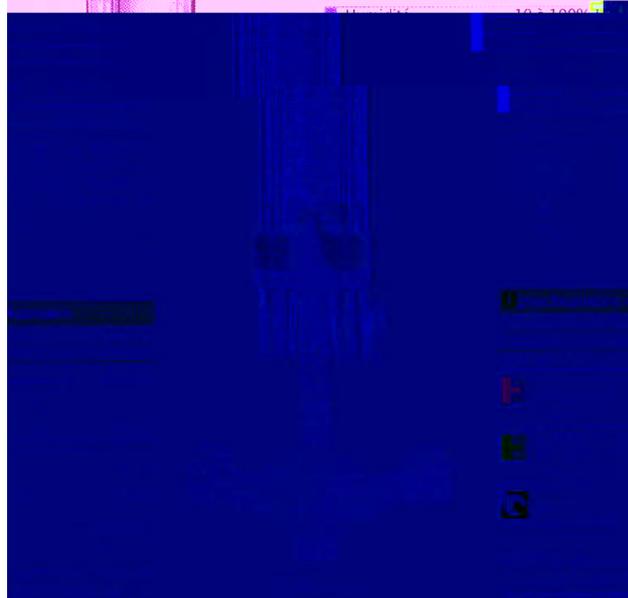
Dans les abris météorologiques ventilés naturellement, la valeur de la constante psychrométrique A est à multiplier par un nombre compris entre 1,13 et 1,20. On choisira plutôt 1,20 en zone tropicale. Il est bien entendu préférable d'utiliser une ventilation mécanique auquel cas aucune correction n'est à apporter.

psychromètre d'Assmann

- thermomètres à alcool fournis
- avec certificat d'étalonnage usine
- température -30 à +50°C
- humidité 10 à 100% HR

Grande précision $\pm 0,1\% \text{ HR}$ à $\pm 0,2^\circ\text{C}$.
Boîtier en plastique ABS avec anneau de fixation pour suspendre le psychromètre au trépied 77297.

Humidité	10 à 100% HR
Température	-30 à +50°C
Précision	$\pm 0,1\% \text{ HR}$



Exemple de psychromètre

6.3 Hygromètre à point de rosée

Principe de la mesure :

On refroidit progressivement une surface jusqu'à apparition d'eau condensée (sous forme de buée) sur la surface. On note la température T_{p1} de la surface et on arrête le refroidissement. La buée disparaît ensuite pour une certaine valeur T_{p2} ($> T_{p1}$) de la température de surface. On en déduit une valeur de la température de rosée de l'air par : $T_r = 0,5 (T_{p1} + T_{p2})$.

La détection de l'apparition et de la disparition de l'eau condensée peut être effectuée par un opérateur ou par un système optique.

6.4 Hygromètre capacitif

Principe de la mesure :

Ces hygromètres utilisent la variation de capacité d'un condensateur avec l'humidité relative de l'air dans lequel il se trouve. De la mesure de la capacité (sonde = condensateur) on déduit la valeur de l'humidité relative de l'air. On trouvera ci-après les caractéristiques de ce type d'hygromètre.

Thermohygromètre à sonde interchangeable

- capteur d'humidité capacitif réalisé sous licence CEA
- sonde interchangeable selon le type de mesure effectuée ne nécessitant aucun réétalonnage
- pratiquement insensible à la température, faible temps de réponse, fidèle et fiable
- bonne tenue dans les milieux pollués (soufrés) grâce au chrome et tantale
- mesure de température par sonde Pt 100 pour le modèle A76817
- présentation en boîtier plastique ABS avec évidement arrière permettant le positionnement de la sonde
- affichage cristaux liquides 2000 points, hauteur 13 mm
- sonde de mesure à prolongateur extensible de 0,3 à 1,25 m
- alimentation pile 9 V autonomie 40 h (signal d'épuisement de pile)

Caractéristiques :

Caractéristiques	Humidité	Température
Etendue de mesure	3 à 98 %	- 100 à - 200 C
Résolution	0,1 %	0,1° C
Cadence de mesure	3 par seconde	
Précision globale	± 2 % plage 3/90 %	± 0,3 C
	± 3 % au-delà de 90 %	
Temps de reponse	Inférieur à 10 secondes	
T° ambiante	0 - 50° C	

A76817 Thermohygromètre 1.808.
A compléter par sonde.

Caractéristiques types d'un hygromètre capacitif

Annexe A1 : Propriétés thermodynamiques de l'eau

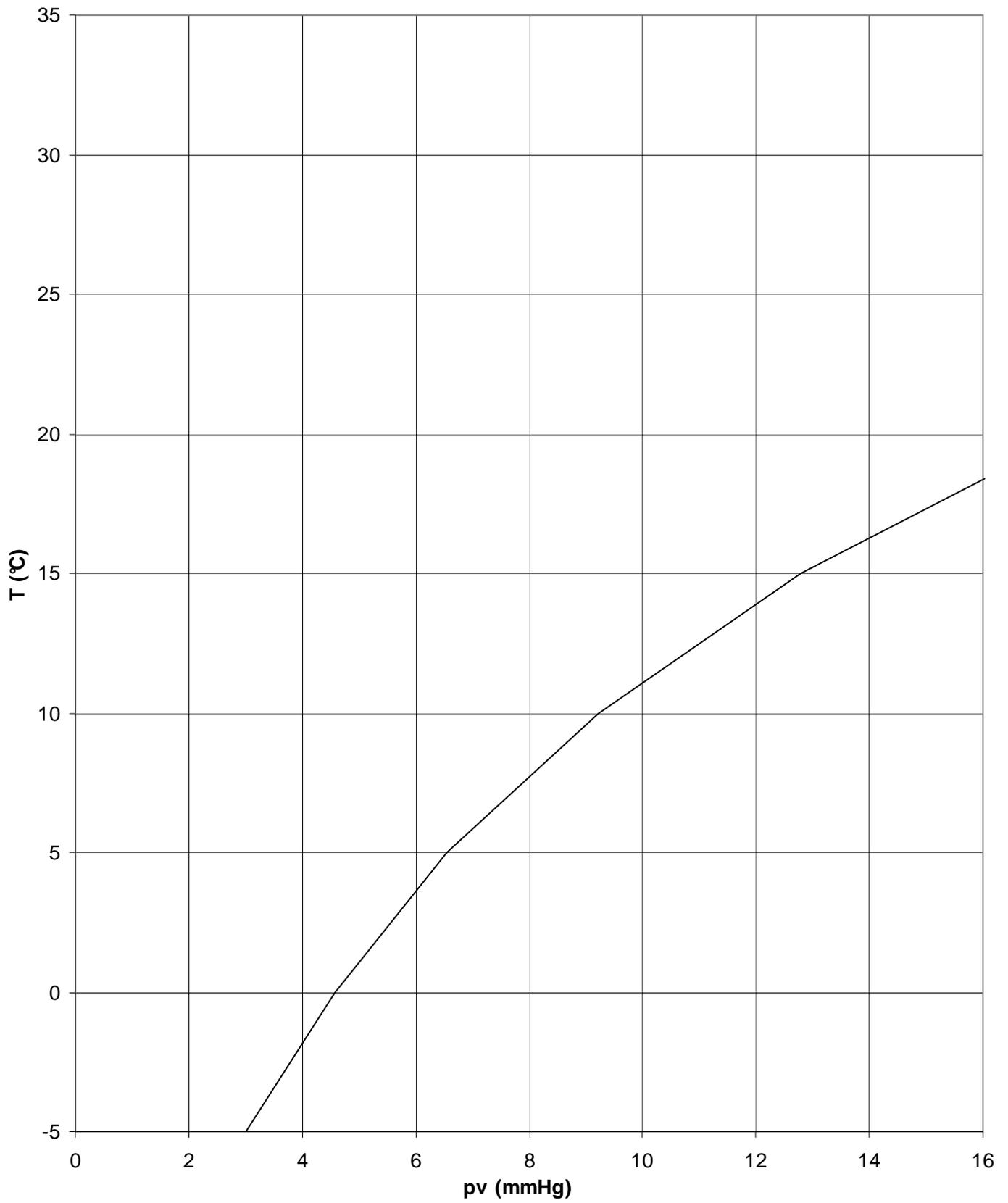
Pression de saturation

T (°C)	Ps (bar)	Ps(mmHg)
0	0,006106	4,581
5	0,008719	6,541
10	0,012277	9,210
15	0,017041	12,78
20	0,02337	17,53
25	0,03166	23,75
30	0,04241	31,81
35	0,05622	42,17
40	0,07375	55,33
45	0,09584	71,90
50	0,12335	92,53
55	0,1574	118,1
60	0,19917	149,4
65	0,2501	187,6
70	0,3117	233,8
75	0,3855	289,2
80	0,4736	355,3
85	0,5781	433,7
90	0,7011	525,9
95	0,8451	634,0
100	1,0131	760,0
105	1,2079	906,1
110	1,4326	1075
115	1,6905	1268
120	1,9854	1489
125	2,3208	1741
130	2,7011	2026
135	3,13	2348
140	3,614	2711
145	4,155	3117
150	4,76	3571
155	5,433	4076
160	6,18	4636
165	7,008	5257
170	7,92	5941
175	8,925	6695
180	10,087	7567
185	11,234	8427
190	12,553	9417
195	13,989	10494
200	15,551	11666
205	17,245	12937
210	19,08	14313

Chaleur latente de vaporisation

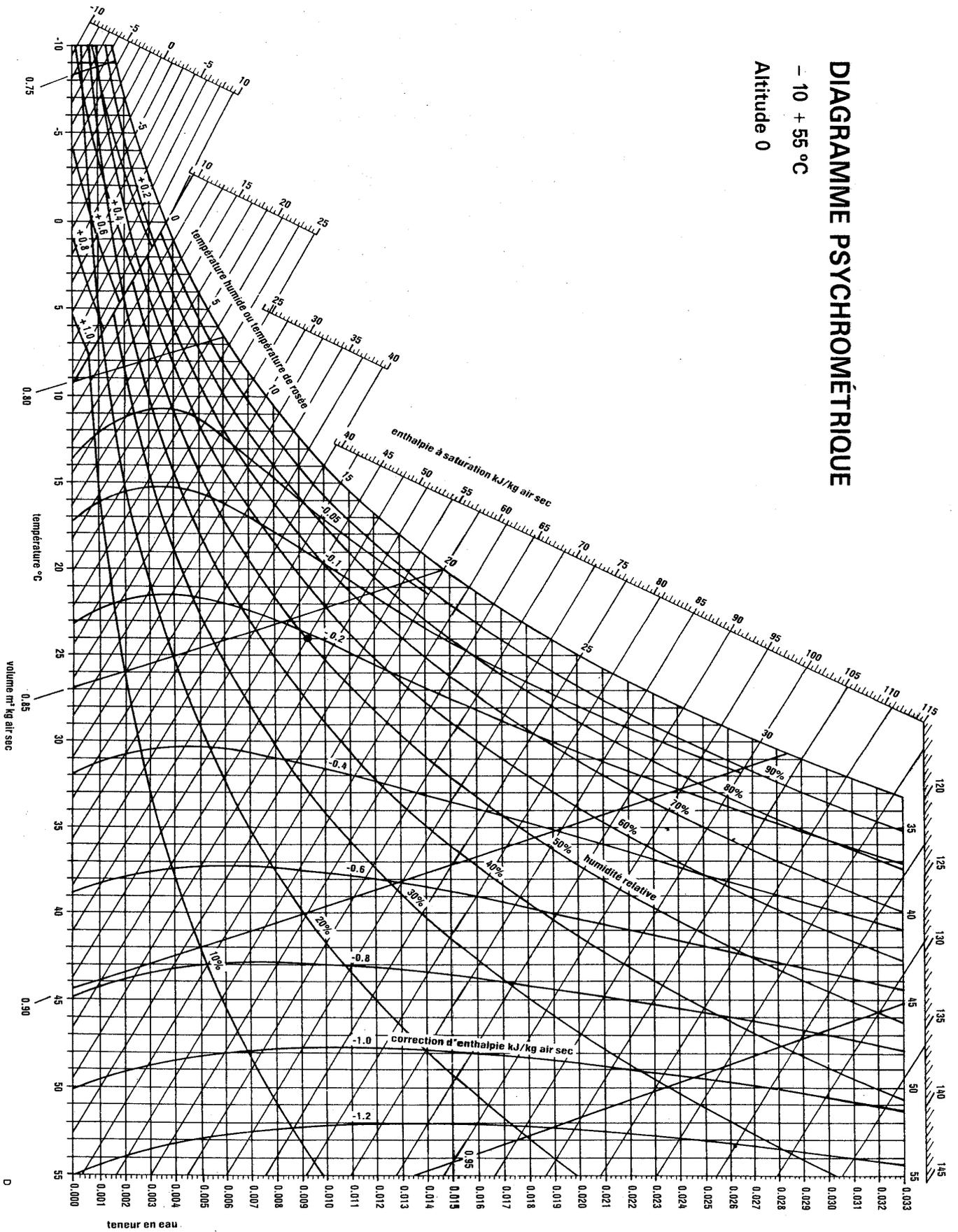
T(°C)	L _T kJ.kg ⁻¹
0	2494
20	2448
40	2402
60	2357
80	2309
100	2258
120	2198
140	2143
160	2081
180	2015
200	1942

Annexe A2: Diagramme de l'air humide à compléter



Annexe A3 : Diagramme de l'air humide

DIAGRAMME PSYCHROMÉTRIQUE
 - 10 + 55 °C
 Altitude 0



Annexe A4 : Programme « Air Humide »

```

10 "A"
20 INPUT "p(mmHg) = ";P
30 INPUT "T(C) = ";T
40 INPUT "HR(%) = ";HR
50 PS=10^(20.3182-2795/(T+273.15-1.68*LOG(T+273.15)))
60 PV=HR*PS/100
70 X=622*PV/(P-PV)
80 GOSUB 440
90 I=1.006*T+X*(2501.6+1.84*T)*.001
100 GOSUB 540
110 RO=.4647*(P-.378*PV)/(T+273.15)
120 GOSUB 660
130 END
140 "B"
150 INPUT "p(mmHg) = ";P
160 INPUT "T(C) = ";T
170 INPUT "Th(C) = ";TH
180 PS=10^(20.3182-2795/(T+273.15)-1.68*LOG(T+273.15))
190 PC=10^(20.3182-2795/(TH+273.15)-1.68*LOG(TH+273.15))
200 XH=.622*PC/(P-PC)
210 LH=2501.8-2.367*TH
220 X=(XH*LH-1.006*(T-TH))/(LH+1.84*(T-TH))
230 PV=X*P/(.622+X)
240 HR=100*PV/PS
250 I=1.006*T+X*(2501.6+1.84*T)*.001
260 X=1000*X
270 RO=.4647*(P-.378*PV)/(T+273.15)
280 GOSUB 440
290 GOSUB 660
300 END
310 "C"
320 INPUT "p(mmHg) = ";P
330 INPUT "T(C) = ";T
340 INPUT "pv(mmHg) = ";PV
350 PS=10^(20.3182-2795/(T+273.15)-1.68*LOG(T+273.15))
360 HR=100*PV/PS
370 GOSUB 440
380 X=622*PV/(P-PV)
390 I=1.006*T+X*(2501.6+1.84*T)
400 GOSUB 540
410 RO=.4647*(P-.378*PV)/(T+273.15)
420 GOSUB 660
430 END
440 T1=-50:T2=200
450 FOR K=1 TO 50
460     TI=(T1+T2)/2
470     PI=10^(20.3182-2795/(TI+273.15)-1.68*LOG(TI+273.15))
480     IF PI>PV THEN LET T2=TI
490     IF PI<=PV THEN LET T1=TI
500     IF (T2-T1)<.05 THEN GOTO 520
510 NEXT K
520 TR=(T1+T2)/2
530 RETURN
540 T1=TR:T2=T
550 FOR K=1 TO 50
560     TH=(T1+T2)/2
570     PC=10^(20.3182-2795/(TH+273.15)-1.68*LOG(TH+273.15))
580     LV=2501.8-2.378*TH
590     PH=PC-1.006*(P-PC)*(T-TH)/(.622*LV)
600     IF PH>PV THEN LET T2=TH
610     IF PH<=PV THEN LET T1=TH
620     IF (T2-T1)<.05 THEN GOTO 640
630 NEXT K
640 TH=(T1+T2)/2
650 RETURN
660 PRINT "T(C) = ";T
670 PRINT "Th(C) = ";TH
680 PRINT "Tr(C) = ";TR
690 PRINT "HR(%) = ";HR
700 PRINT "pv(mmHg) = ";PV
710 PRINT "x(g/kg) = ";X
720 PRINT "i(kJ/kg as) = ";I
730 PRINT "ro(kg/m3) = ";RO
740 RETURN

```