

Chap I

Air humide

I-1 Introduction: L'air humide est le porteur de chaleur le plus employé pour le séchage aux températures <sup>moyennes</sup> ainsi que dans le cas où il faut éviter le contact entre les gaz de combustion et le matériau soumis au séchage. L'air ayant, d'une part, le rôle d'apporter la quantité de chaleur nécessaire à l'évaporation de l'eau du matériau et, d'autre part, le rôle d'entraîner et d'évacuer du séchoir l'eau évaporée, les variations d'état de l'air humide (air sec + vapeur d'eau), qui sont ~~de~~ continues au cours du processus, doivent être clairement définies.

I-2 définition: ~~L'air dans les procédés de séchage, l'air humide peut être~~ L'air atmosphérique est un mélange, en proportions variables, d'air sec et de vapeur d'eau, l'air sec est, lui-même, un mélange de gaz, mais dont les proportions sont invariables, du moins pour les principaux constituants (Azote, oxygène et Argon, etc) qui représentent 99,97% en volume de sa composition. (voir tableau I-1)

Gas	masse moléculaire	composition %
Azote N <sub>2</sub>	28,0	78,09
oxygène O <sub>2</sub>	32,0	20,95
Dioxyde de Carbone CO <sub>2</sub>	44,00	0,03
Néon Ne <sub>2</sub>	20,02	0,0018
Helium He <sub>2</sub>	4	0,00024
Hydrogène H <sub>2</sub>	2	0,00005
Xénon Xe <sub>2</sub>	131,3	0,000008

(Tab. I-1)

Composition normale de l'air ~~humide~~ atmosphérique

Dans les procédés de séchage, l'air humide peut être assimilé à un gaz un mélange de gaz parfaits qui suivent la loi de Dalton

I-3 Grandeurs hygrométriques caractéristique

Ces définitions et les notations utilisées correspondent au schéma présenté ci-contre :

$m$  considère un volume  $V$  ( $m^3$ ) d'air humide, à  $V, T$   
 la température  $T$  ( $^{\circ}K$ ). En notant par  $P_v, m_v$ , pression partielle et de masse de vapeur  
 et par  $P_a, m_a$ , " " " " " " " " de l'air sec  
 on peut écrire (loi de Dalton):

$$\begin{aligned} P &= P_v + P_a \\ M &= m_v + m_a \end{aligned}$$

$$\begin{cases} P = P_a + P_v & (Pa) \\ M = m_a + m_v & (kg) \end{cases} \quad (I-1)$$

$P$ : la pression total ou pression barométrique d'air humide  
 $M$ : la masse d'air humide.

I-3.1 Teneur en vapeur d'eau <sup>(Rapport de mélange)</sup>  $x$  l'unité de concentration ou teneur en humidité  $x$  est définie par la relation

$$x = \frac{m_v \text{ (kg d'eau)}}{m_a \text{ (kg d'air sec)}} \quad (I-2)$$

Exemple: si  $m_a = 1 \text{ kg}$ ,  $x$  indiquera la masse en kg de vapeur d'eau que l'air humide renferme par kg d'air sec (kg AS). c'est sous cette forme que l'on définit généralement l'humidité absolue dans la pratique. ~~un exemple~~

par exemple si un air humide renferme 11,9 g de vapeur d'eau par kg AS, son humidité absolue sera:

$$x = \frac{11,9 / 1000}{1} = 0,0119 \text{ kg/kg AS}$$

I-3.1.2 inversement, un air humide dont l'humidité Absolue est  $x$  renferme  $x$  kg de vapeur d'eau par kg AS

~~autre forme de x~~

L'équation d'état peut s'écrire

$$x = \frac{m_v}{m_a}$$
$$p_v = m_a R T$$

$$p_a \cdot V = \overset{m_a=1}{R_a} \cdot T \quad \text{pour un kg d'air sec.}$$

$$p_v \cdot V = \overset{m_v=1}{R_v} \cdot T \quad \text{pour x kg d'eau associée,}$$

où  $R_a$  et  $R_v$  sont les constantes spécifiques du gaz idéal pour l'air sec et pour la vapeur d'eau rapportés à 1 kg, d'où

$$x = \frac{m_v}{m_a} = \frac{R_a}{R_v} \frac{p_v}{p_a} = \frac{29,27}{47,06} \cdot \frac{p_v}{p_a} = 0,622 \frac{p_v}{p - p_v} \quad \text{avec } \begin{cases} R_a = 29,27 \\ R_v = 47,06 \end{cases}$$

$$\boxed{x = 0,622 \frac{p_v}{p - p_v}} \quad \text{--- (I-3) --- humidité absolue}$$

la valeur limite de  $x$  donne la teneur en vapeur d'eau à la saturation

$$\boxed{x_s = x'' = 0,622 \frac{p_v''}{p - p_v''} = 0,622 \frac{p_s}{p - p_s}} \quad \text{--- (I-4) ---}$$

où  $p_s$  est la pression de saturation de la vapeur d'eau, à la température considérée

D'autre part, pour une pression totale constante,  $x_s = x''$  varie qu'avec la température.

### I-3-2 Pression de vapeur saturante $p_s, (p_v'')$

Pression de vapeur dans un état d'équilibre avec l'eau liquide, à la température  $T$ . C'est la valeur maximum que peut atteindre la pression partielle de la vapeur, à la température  $T$  (au delà il y a condensation).

### F-3-2 Unité d'air humide

Si l'on considère l'expression  $1+x = \frac{m_a + m_v}{m_a}$  elle indique, dans ~~1+x~~ une masse  $(m_a + m_v)$  d'air humide, il y a une masse  $m_a$  d'air sec. Si l'on fait  $m_a = 1 \text{ kg}$ , on peut donc considérer que  $1+x = 1+m_v$  représente la masse en kg d'air humide qui renferme 1 kg d'air sec. Cette masse d'air humide porte le nom d'unité d'air humide. Elle est très utile dans les calculs de séchage.

$$1+x = 1 + 0,622 \frac{p_v}{p - p_v} = \frac{p - 0,377 p_v}{p - p_v}$$

I.3-34 Degré hygrométrique (humidité relative).

La vapeur d'eau étant assimilable à un gaz parfait, le rapport des masses est égal au rapport des pressions, de sorte que l'on peut écrire

$$e = u = \frac{m_v}{m_v''} = \frac{P_v}{P_v''} \quad \text{--- (I.6)}$$

$P_v, P_v''$  designant respectivement la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air humide et la pression de vapeur saturante sèche à la même température (pression maximale).

Le rapport  $e(u)$  est appelé humidité relative de l'air considéré sans dimension, qui peut s'exprimer en pourcentage par l'expression

$$u = \varphi = 100 \cdot \frac{P_v}{P_v''} = \frac{\varphi P_v}{P_s} \quad \text{--- (I.7)}$$

de la relation (I.3).

$$x = 0,622 \frac{\varphi \cdot P_s}{P - \varphi P_s}$$

il résulte que

$$\varphi = \frac{x P}{P_s (0,622 + x)} = \frac{x P}{P_v'' (0,622 + x)} \quad \text{--- (I.8)}$$

\* discussion  
de la relation (I.8):

- \* Pour un air humide saturé, on a  $P_v = P_v'' \Rightarrow u = e = 1, \varphi = 100\%$ .
- \* Pour un air humide quelconque, on a  $P_v < P_v''$  d'où  $u = e < 1, u < 100\%$ .
- \* Pour un air parfaitement sec, on a  $P_v = 0$  d'où  $e = u = 0; \varphi = 0\%$ .

~~Humidité relative~~



I-3. Le degré (ou fraction) de saturation (Taux de saturation)  $\psi$ .

qui est le rapport entre la teneur en humidité  $x$  de l'air humide et la quantité maximale d'humidité qui pourrait être contenue dans l'air humide à la saturation  $x_s$ , à la même pression et température.

On le note par 
$$\psi = \frac{x}{x_s} = \frac{x}{x''} \quad \text{--- (I-9)}$$

Le degré de saturation  $\psi$  diffère peu de l'humidité relative

$$\psi = \left| \frac{x}{x_s} \right| \approx \frac{0,622 p_s}{p - p_s}$$

$$\psi = \frac{x}{x_s} = \frac{\frac{0,622 p_s}{p - p_s}}{\frac{0,622 p_s}{p - p_s}} = \psi \frac{p - p_s}{p - p_s} =$$

$$\psi = \psi \frac{p - p_s}{p - p_a} = \psi \frac{p - p_a''}{p - p_a} \quad \text{--- (I-10)}$$

vu que les pressions partielles  $p_a$  et  $p_a''$  sont petites par rapport à  $p$  à des températures peu élevées - le rapport

$$\frac{p - p_a''}{p - p_a} \approx 1, \text{ donc } \psi \text{ est presque égal à } \psi$$

$$\psi \approx \psi \quad \text{--- (I-11)}$$

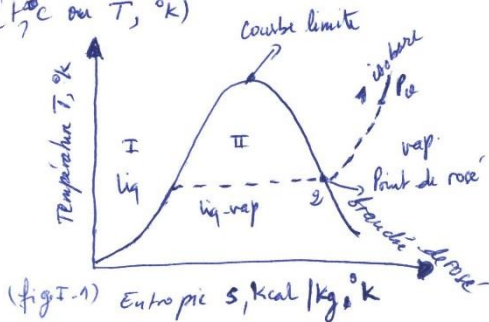
I-3.7 Température de rosée  $T_r$  ( $^{\circ}\text{C}$ ).

caractérise directement la teneur en eau.

Température à laquelle il faut refroidir l'air humide pour atteindre la saturation, le rapport de mélange  $x$  ( $v$ ) restant constant pendant le refroidissement. Cette température  $T_r$  est tel que  $P_v = P_s(T_r)$

la variation d'état qui définit le point de rosée se trouve dans le diagramme entropique de la vapeur d'eau T-s (fig. I-1)

En partant de l'état 1, qui représente l'état de la vapeur dans le mélange ( $P_v, t$ ), les premières gouttes apparaissent, lorsque la température diminue le long de la même isobare, à l'intersection avec la courbe limite. Le point 2 définit le point de rosée ( $T_r^{\circ}\text{C}$  ou  $T_r, ^{\circ}\text{K}$ )



I-3.8 Température humide  $T_h$  ( $^{\circ}\text{C}$ )

C'est la température d'équilibre d'une masse d'eau évaporant dans l'air, dans le cas où la chaleur nécessaire à l'évaporation n'est prélevée que sur l'air. De façon pratique c'est la température indiquée par un psychromètre à aspiration convenablement utilisé.

Dans un échangeur par contact direct eau-air  $T_h$  est la grandeur caractéristique de l'échangeur (tour de refroidissement, lavage d'air, ...).

### I-4 Détermination de l'état hygrométrique de l'air humide

L'état hygrométrique de l'air peut être déterminé par plusieurs méthodes, presque toutes étant des méthodes électrolytique et électronique qui donnent des lectures directs, sans avoir recours à des opérations supplémentaires. Ces méthodes sont indiquées dans le tableau (I-2)

Appareil	Intervalle de Température °K	Erreur d'indication	Judicium fournie
Hygromètre à cheveu	268 à 288	± 2,2	Humidité relative e
Hygromètre par condensation	243 à 288	± 1,6	" "
Psychromètre Assmann (par <del>congélation</del> )	273 à 288	± 1,6	Point de rosé (Tr)
Hygromètre Higgins (par congélation)	258 à 288	± 1,5	Humidité absolue x/1000
Hygromètre électrique (avec résistance)	243 à 313	± 1,1	" " "
Hygromètre électrolytique	203 à 373	± 1,1	Point de rosé (Tr)
Hygromètre à diffusion	268 à 288	± 1,5	Humidité relative e
Hygromètre spectral (à rayon infrarouge)	228 à 288	± 0,5	Humidité absolue x
Hygromètre à micro-ondes	193 à 273	± 0,3	" " "
Hygromètre chromatographique	233 à 288	± 0,3	" " "
Hygromètre à isotopes radioactifs	253 à 288	± 0,5	" " "

Tab. I-2: Appareils usuels pour la mesure de l'humidité de l'air.

### I-9 «Chaleur totale de l'air humide»

La chaleur totale, appelée «Enthalpie» en thermodynamique contenue dans 1 kg d'air sec se calcule par l'égalité:

$$H_A = c_{pA} \cdot t = \theta_a \quad \text{--- (I-11)}$$

Et la chaleur totale de 1 kg de vapeur d'eau par l'égalité:

$$H_V = l_v + c_{pV} \cdot t = \theta_v \quad \text{--- (I-12)}$$

ou  
 $c_{pA}$  est la chaleur massique de l'air sec,  $c_{pA} = 0,24 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$ .  
 $c_{pV}$  " " " de vapeur d'eau,  $c_{pV} = 0,46 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$   
 $l_v$  la chaleur latente de vaporisation de l'eau à  $\theta_0$  et à la pression  $p$ .

$$\text{donc } H = H_A + H_V, \quad \text{--- (I-13)}$$

Alors on a pour une température  $t$   $\Rightarrow H_A = 0,24 t \text{ Kcal/kg}$

$$\text{et } H_V = 595 + 0,46 t \text{ Kcal/kg}$$

donc pour la masse  $x$  de vapeur contenue dans l'unité d'air humide

$$H_V = (595 + 0,46 t) x \text{ Kcal/unité air humide} \quad \text{--- (I-14)}$$

Cette expression, suffisamment exacte pour de faibles valeurs de la pression, on l'a complétée par l'adjonction d'un terme soustractif  $-k p$  ~~qui~~  
 $k$ : désigne un coefficient fonction de la température et décroissant quand celle-ci augmente.

Par exemple Pour 200 bars, l'erreur commise en négligeant ce terme correctif dipasse à peine 1% de la valeur de  $H_V$

En définitive, la chaleur totale  $H$  de l'unité d'air humide se pose expression:

$$H = 0,24 t + (595 + 0,46 t) x \text{ Kcal} \quad \text{--- (I-15)}$$



Exemple d'application - soit un br air humide ayant pour caractéristique

$t = 18^\circ\text{C}$ ,  $P = 740 \text{ mmHg} = 986,58 \text{ mbars}$

$u = e = 0,80 \Rightarrow \varphi = 80\%$  humidité relative  
 détermine l'humidité totale de l'air humide

comme  $A = 0,24t + (595 + 0,46t)x$

calculons  $x = \frac{m_v}{m_a} = 0,622 \cdot \frac{\varphi P_v''}{P - \varphi P_v''}$ ,  $x$  = humidité absolue.

A  $t = 18^\circ\text{C}$ , la table 9 donne  $P_v'' = 20,62 \text{ mbars} = 15,48 \text{ mmHg}$  d'eau.

$\frac{m_v}{m_a} = \frac{P_v}{P_v''} = e \Rightarrow P_v = e \cdot P_v'' = 0,80 \cdot 20,62 = 16,496 \text{ mbars}$

$\Rightarrow x = 0,622 \cdot \frac{P_v}{P - P_v} = 1 + 0,622 \cdot \frac{P_v}{P - P_v} = \frac{P - 0,378 P_v}{P - P_v}$

$1 + x = 1 + 0,622 \cdot \frac{P_v}{P - P_v}$

$1 + x = \frac{986,58 - 0,378 \cdot 16,496}{986,58 - 16,496} = 1,0126 \text{ kg} \Rightarrow 1 + x = 1,0126 \text{ kg}$

$\Rightarrow x = 1,0126 - 1 = 0,0126 \text{ kg}$

d'où  $h = 0,24 \cdot 18 + (595 + 0,46 \cdot 18) \cdot 0,0126 = 11,92 \text{ kcal/kg AS}$

ou  $h = 11,92 \text{ kcal/kg AS}$

si l'on désire l'enthalpie par kg d'air humide, on remarquera que la valeur précédente de 11,92 se rapporte à une masse  $1+x = 1,0126 \text{ kg}$  d'air humide dans l'enthalpie par kg d'air humide est égale à

$h_0 = \frac{h}{1+x} = \frac{11,92}{1,0126} = 11,77 \text{ kcal/kg AS}$

il existe des tables donnant, pour diverses valeurs de température  $t$  et du degré hygrométrique  $e$ , les valeurs de  $x$  et de  $H$ .

Fig. lorsqu'on refroidit un air humide en dessous de son point de rosée une phase liquide apparaît, c'est-à-dire que l'air devient chargé de brouillard, formé de gouttelettes d'eau en suspension dans l'air, si le refroidissement est poussé en dessous de  $0^\circ\text{C}$ , ces gouttelettes se congèlent et l'air se charge de particules de glace. Dans le cas général, l'enthalpie d'un air humide s'exprime donc par la somme :

$h = h_{as} + h_v + h_e + h_{sol} \quad (I-16)$

$h_{as}$ ,  $h_v$ ,  $h_e$  et  $h_{sol}$  désignant respectivement les enthalpies de l'air sec, de la vapeur, de l'eau liquide et de la glace. Pour divers états, on a, en kcal/kg de chacune des

variables :  $h_{as} = 0,24t$   $h_e = t$   
 $h_v = 595 + 0,46t$   $h_{sol} = 0,5t - 80$

Si  $x_v$ ,  $x_l$  et  $x_{sol}$  sont les masses respectives de ces diverses variétés contenues dans l'air humide par kilogramme d'air sec, l'expression de l'enthalpie s'écrira:

$$h = 0,24t + x_v(595 + 0,46t) + x_l t + x_{sol}(0,5t - 80) \quad \text{kcal/kg.AS.} \quad \text{--- (I-16)}$$

Si l'air humide ne renferme de l'eau que sous forme de vapeur on aura  $x_l = 0$ ,  $x_{sol} = 0$ , de sorte que l'expression précédente se réduit à:

$$h = 0,24t + x_v(595 + 0,46t) \quad \text{kcal/kg.AS.} \quad \text{--- (I-17)}$$

Rq. L'approximation de la formule indiquée par molier  $h = 595 + 0,46t$  donne pour une intervalle de 0 à 100 des différences de 4%, tandis que la formule  $h = 587 + 0,46t$ , utilisée récemment donne une approximation de 1%.

$x_v$ ,  $x_l$ ,  $x_{sol}$  les masses respectives de la vapeur d'eau, de l'eau liquide et de la glace.

### I-6 Masse volumique de l'air humide. $\rho_{ah} = \rho_a$

La masse volumique de l'air humide est la masse d'un mètre cube d'air humide à la pression  $P$ , à la température  $T$  et la pression partielle de vapeur d'eau  $P_v$ .

$$\rho_a \quad \rho = m_a + m_v$$

et d'autre part on a pour  $v = 1 \text{ m}^3$ .

$$m_v = \frac{P_v}{R_v \cdot T} = \frac{e P_s}{R_v \cdot T}$$

$$m_a = \frac{P_a}{R_a \cdot T} = \frac{P - P_v}{R_a \cdot T} = \frac{P - e P_s}{R_a \cdot T}$$

$$\text{alors } \rho_{ah} = m_a + m_v = \frac{P - e P_s}{R_a \cdot T} + \frac{e P_s}{R_v \cdot T}$$

$$\Rightarrow \rho_{ah} = \frac{1}{T} \left[ \frac{P}{R_a} - e P_s \left( \frac{1}{R_a} - \frac{1}{R_v} \right) \right] \quad \text{--- (I-18)}$$

$$\Rightarrow \rho_{ah} = \rho_{sec} - \frac{e P_s}{T} \left( \frac{1}{R_a} - \frac{1}{R_v} \right) \quad \begin{matrix} \text{--- (I-19)} \\ R_a = 29,27 \\ R_v = 47,06 \end{matrix}$$

comme  $R_a < R_v$ , l'expression entre parenthèses est positive, donc

$$\rho_{ah} < \rho_{sec}$$

no

Autre forme de  $\rho_{ah}$ .

$$\rho_{ah} = \frac{P - P_v}{R_a \cdot T} + \frac{P_v}{R_v \cdot T} = \frac{1}{R_a \cdot T} \left[ P - P_v + \frac{R_a}{R_v} \cdot P_v \right]$$

Mais  $\frac{R_a}{R_v} = d = 0,622$  (densité de la vapeur d'eau par rapport à l'air)

$$\Rightarrow \boxed{\rho_{ah} = \frac{P - (1-d)P_v}{R_a T}} \quad (E-20)$$

~~Exemple~~ Exemple: Pour l'air humide à l'état:  
 $P = 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N/m}^2$ ,  $T = 291 \text{ K}$ ,  $d = 0,622$ ,  $R_a = 287,1 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$   
 avec  $e = 0,80$ .  
 Déterminer sa masse volumique

calcul de  $P_v$

$$e = \frac{P_v}{P_v''} \Rightarrow P_v = e \cdot P_v'' = e P_s, \text{ pour } T = 18^\circ \text{C} \text{ on a } P_s = P_v'' = 20,62 \text{ mbar}$$

(Tab. 9)

$$\Rightarrow P_v = 0,80 \cdot 20,62 = 16,496 \text{ mbar} \times 10^2 \text{ N/m}^2$$

$$\text{donc } \rho_{ah} = \frac{P - (1-d)P_v}{R_a T} = \frac{10^5 - (1-0,622) \cdot 16496 \cdot 10^2}{287,1 \cdot 291}$$

$$\boxed{\rho_{ah} = 1,18908 \text{ kg/m}^3 \text{ ou } 1189,1 \text{ g/m}^3}$$

Volume spécifique ?

- 11 -

## I-6 Diagrammes d'air humide

Les problèmes sur l'air humide (décharge ou parking) se traitent soit par calcul, soit à l'aide de diagrammes.

Il existe plusieurs types de diagrammes de l'air humide, qui diffèrent selon les combinaisons de variables indépendantes choisies parmi les plus utilisés, nous citerons :

- les diagrammes  $t, x$  reliant la température de l'air humide à la masse d'eau qu'il contient par kg AS ( $x$ ) (diagrammes de Carrier).
  - les diagrammes  $i, x$  reliant l'enthalpie de l'air humide à la masse d'eau qu'il contient par kg AS (diagrammes de Mollier).
- Le diagramme de Mollier, de l'état de l'air humide ( $i, x$ ) est le plus répandu dans la pratique. Tous les diagrammes sont établis pour une pression de 760 mmHg (1 atmosphère normale ou 1013,25 mbars).

### I-6.1 Diagramme $h(i), x$

Le diagramme de Mollier, de l'état de l'air humide  $i, x$  sur la figure I-2, représente la variation de l'enthalpie notée par  $i$ , en fonction de la teneur en humidité  $x$ , de la température  $t$  et de l'humidité relative  $\phi$ , et est la concrétisation de nombreuses propositions faites au cours des années.

Considérons d'abord un air humide ne contenant de l'eau que sous forme de vapeur, dans la relation  $h = a + bx$  on a  $x_{l=0} = 0$  et  $x_{sol} = 0$

$$\text{alors } h = 0,24t + xv(595 + 0,46t)$$

qui peut s'écrire sous la forme

$$h = a + bx$$

$$\text{en posant } \begin{cases} a = 0,24t \\ b = (595 + 0,46t) \cdot 10^{-3} \end{cases}$$

$x$  exprimé en g/kg AS.

ainsi, en coordonnées  $h, x$  les isothermes sont des droites de coefficient angulaire  $b$ . Le coefficient angulaire n'étant pas constant, mais croissant avec  $t$ .

Les isothermes coupent l'axe des ordonnées en des points définis par  $x=0$ , c'est-à-dire ayant pour ordonnées  $0,24t = h$ , ce qui définit l'échelle des températures, laquelle peut être reportée sur l'axe des ordonnées.

Considérons d'abord un air humide composé de 1 kg d'air sec et  $x$  kg de vapeur d'eau on a  $x_{l=0} = 0$  et  $x_{sol} = 0$ .

$$\text{alors on aura } h = i = c_{pA}t + c_{pV}xt + p_v x \quad \text{--- (I-21)}$$

$$\begin{aligned} c_{pA} &= 0,24 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} \\ c_{pV} &= 0,46 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

- 12 -



On remarque d'après l'égalité  $I-18$  que, sur un diagramme, les trois courbes  $x = ct$ ,  $t = ct$ ,  $h = ct$  sont des droites, le diagramme  $(h, x)$  proposé par Mellier dont la construction est donnée par la fig. I-2. Utilise des coordonnées obliques. Il est tracé de telle sorte que la droite  $t = 0$  soit confondue avec l'axe horizontal des  $x$ , et la droite  $x = 0$  avec l'axe vertical des  $h$ . D'après l'éq. I-21 la grandeur  $h$  a, pour  $t = 0$ , la valeur  $l_v x$  pour  $t = 0 \Rightarrow h = l_v x$

On obtient donc la droite  $h = 0$  en portant verticalement vers le bas à partir d'un point  $x$  de la droite  $t = 0$  (axe des  $x$ ) un segment  $ab = l_v x$  et en joignant "a" au point zéro "e" du système de coordonnées voir fig. I-2. Si on porte sur le prolongement de "ab" vers le haut, d'abord le segment  $bc = c_p x t$  et ensuite le segment  $cd = c_p x \cdot t$ ; la somme des trois segments

$$ad = l_v x + c_p x t + c_p x \cdot t = h$$

l'est-à-dire que l'air humide a au point d une chaleur totale  $h$ . Il a la même chaleur totale sur l'axe des  $h$  au point F, DF étant parallèle à la droite  $h = 0$ .

Sur le diagramme de mollier

les droites  $h = i = ct$ , sont donc parallèles à la droite  $h = 0$ ,

les droites  $x = ct$ , parallèles à la droite  $x = 0$ ,

les droites  $t = ct$ , inclinées sur la direction de l'axe  $x$  de  $\tan \alpha = c_p v t$ .

Cette inclinaison croissant avec la température, les droites  $t = ct$  ne sont pas parallèles.

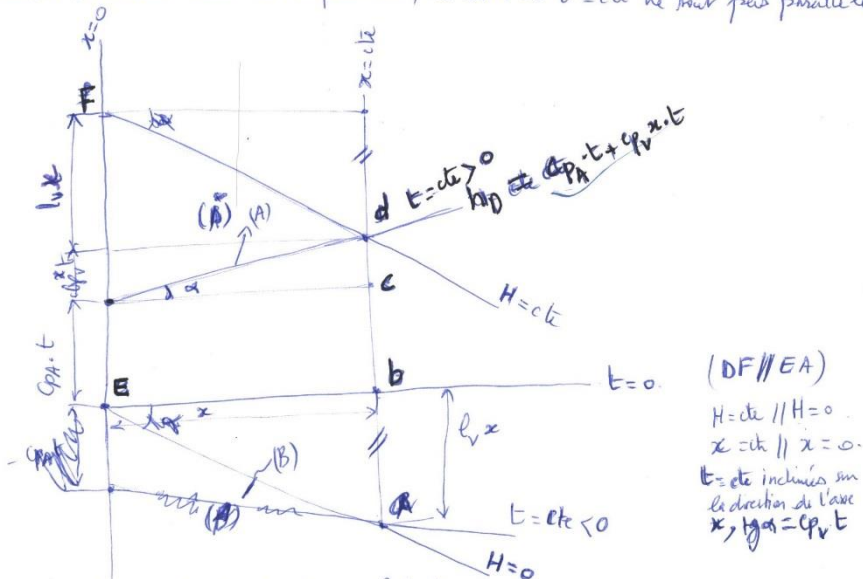


fig. I-2 Construction schématique du diagramme  $(h, x)$  ou  $(i, x)$ . - 13 -

Sur le diagramme, un air humide à température  $t_1$  et contenant  $x_1$  g de vapeur d'eau / kg AS est représenté par un point  $M_1$  situé à l'intersection de l'isotherme  $t_1$  et de la verticale  $x_1$ . Son enthalpie est représentée par le segment  $\overline{M_{A1}M_1}$ , car on a bien fig I-3

$$\begin{aligned} \overline{M_{A1}M_1} &= \overline{M_{A1}M_{01}} + \overline{M_{01}M_1} \\ &= 597 \cdot 10^{-3} x_1 + (0,24 + 0,46 \cdot 10^{-3} x_1) t_1 \\ h_{11} &= (0,24 t_1 + 597 + 0,46 t_1) \cdot 10^{-3} x_1 \end{aligned}$$

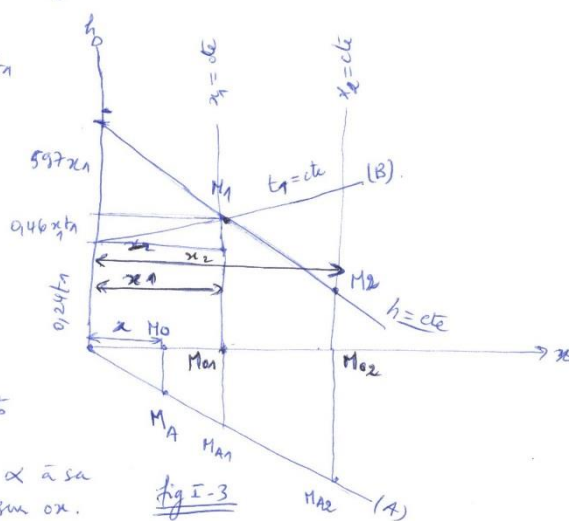
un autre état ( $t_2, x_2$ ) présentant la même enthalpie / kg AS sera représenté par un point  $M_2$

tel que

$$\overline{M_{A2}M_2} = h_{11} = \overline{M_{A1}M_1}$$

c. a. d. que le point  $M_2$  sera situé sur la ligne parallèle à (A), et il en sera de même pour tous les états d'air humide de même enthalpie.

Mais un segment  $\overline{OM_A}$  de A étant  $\alpha$  à sa projection orthogonale  $\overline{OM_0} = x$  sur  $ox$ .



A chaque valeur de la température correspond, d'après la courbe de tension de vapeur de l'eau, un maximum  $P_s$  de la pression de vapeur; l'air humide pour lequel  $P_v = P_s$  est dit saturé, et son humidité relative est  $e = 1$ . Sur chaque isotherme, se trouve donc un point qui représente cet état; le lieu de ces points est la courbe  $e = 1$ , dite courbe de saturation. Cette courbe est asymptote à l'isotherme  $t = 100^\circ\text{C}$  (Pour un diagramme établi pour une pression de 760 mmHg, puisque pour  $t = 100^\circ\text{C}$ , la pression de saturation étant égale à la pression totale  $P_t$  du mélange, le dénominateur de l'expression de  $x = 0,622 \frac{P_t}{P_t - P_s}$  devient nul, donc  $x$  est infini).

Pour un point quelconque de la courbe de saturation, la teneur en eau  $x$  représente la valeur maximale qu'elle peut présenter à la température considérée. Pour la variété d'air humide non saturés on

$$x = 0,622 \cdot \frac{e P_s}{P - e P_s}$$

on aura, de façon analogue, les courbes  $e = 0,9$ ,  $e = 0,8$ , etc. La courbe  $e = 0$  représenterait l'air complètement sec.

Les isothermes comme les isenthalpes, de l'air humide se rapprochant de l'eau que sous forme de vapeur sont arrêtées à la courbe de saturation.

La région du plan comprise entre la courbe de saturation et l'isotherme  $t=0$  correspond aux états d'air humide renfermant à la fois de l'air, de l'eau sous forme de vapeur et de l'eau sous forme de brouillard, c.a.d de gouttelettes liquides en suspension.

La région située en dessous de l'isotherme  $t=0$  correspond aux états d'air humide renfermant, au lieu de l'eau liquide, de l'eau sous forme de cristaux de glace en suspension. Nous laisserons de côté cette dernière région qui ne présente pour les applications que peu d'intérêt.

Dans la région du brouillard, l'enthalpie est définie, d'après (I-21) avec  $x_{sol}=0$ , par

$$h = 0,24t + x_v(597 + 0,46t) + x_l \cdot t \quad \text{--- (I-22)}$$

Une isotherme de cette région a sa pente définie par

$$\left(\frac{\partial h}{\partial x_l}\right)_t = t \quad \text{contre} \quad \left(\frac{\partial h}{\partial x_v}\right)_t = 597 + 0,46t$$

dans la région de l'air humide non saturée située au-dessus de la courbe de saturation, les isothermes présentent donc un saut à la traversée de la courbe de saturation. voir figure I-4

Certains diagrammes  $h, x$  comportent une échelle supplémentaire permettant de déterminer la pression de saturation de la vapeur d'eau à une température donnée, pour une pression totale connue, qui est 1013,25 mbars dans les diagrammes usuels. Le mode d'emploi de cette échelle est visible sur la figure I-5

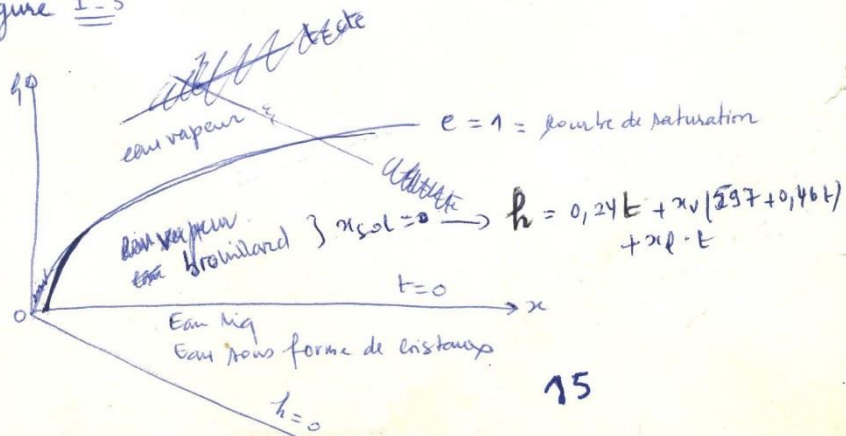


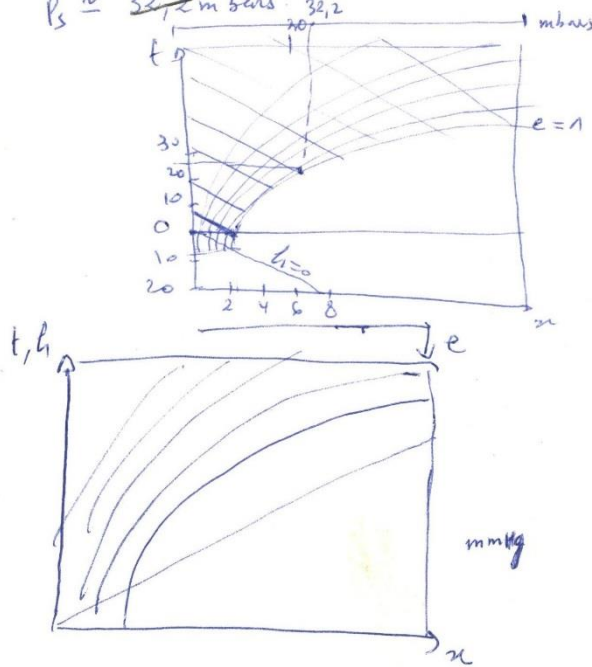
fig I-4 Evolution d'air humide

Représentation des éva

diagramme  $h, x$   $\frac{p, x}{i, x}$

figure I-5

Exemple Dans le cas représenté pour une température  $t = 27^\circ\text{C}$ , on  
 lit  $p_s \approx 32,2$  m bars  $\approx 24,15$  mmHg  
 $\Rightarrow e$

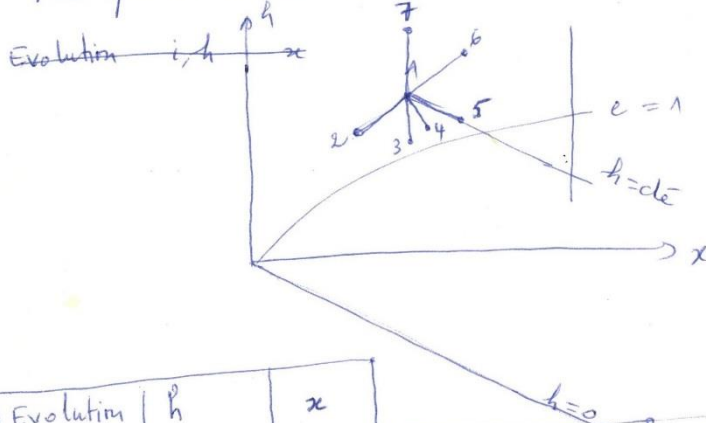




## I.6.2 Représentation des évolutions de l'air humide

Considérons de l'air humide dans un état initial 1 et envisageons diverses évolutions à partir de cet état (fig.).

Nous pourrions établir le tableau suivant



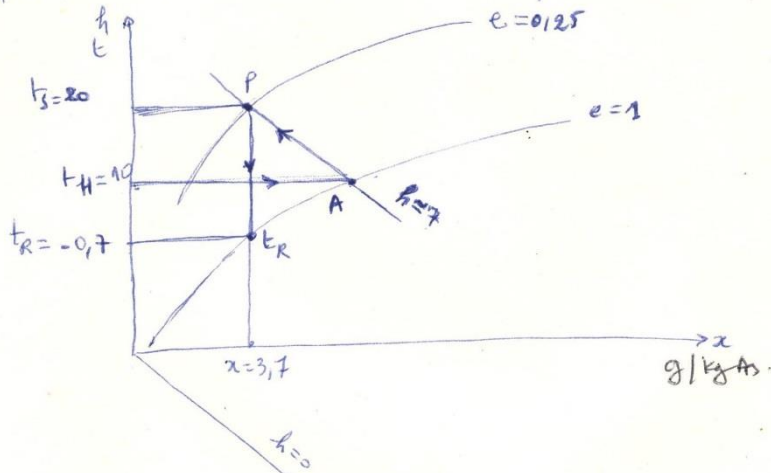
Evolution	$h$	$x$	
1-2	↓	↓	L'air cède de la chaleur et de l'eau et se condense
1-3	↓	Constant	L'air cède de la chaleur sans condensation ( $T > T_{ro}$ ) (Température de rosée).
1-4	↓	↑	L'air cède de la chaleur en absorbant de l'eau
1-5	Constant	↑	L'air n'absorbe ni ne cède de chaleur, mais absorbe de l'eau (Pulvérisation d'eau à 0°C)
1-6	↑	↑	L'air absorbe de la chaleur en même temps que de l'eau
1-7	↑	cte	L'air absorbe de la chaleur sans absorber d'eau (Échauffement de l'air humide).

Tab. I-3 Evolutions de l'air humide.

Exemples d'utilisation du diagramme

Ex 1

Le thermomètre sec du psychromètre indique une température  $t_s = +20^\circ\text{C}$  et le thermomètre humide une température  $t_H = +10^\circ\text{C}$ . En déduire la caractéristique de l'air humide.



On prendra le point A de l'isotherme  $t_H = 10^\circ\text{C}$  avec la courbe de saturation, puis on trace l'isenthalpe passant par A. Le point de rencontre de cette isenthalpe avec l'isotherme  $t_s = +20^\circ\text{C}$  est le point P cherché.

on trouve:

humidité relative  $e = 0,25$ ,  $x = 3,7 \text{ g/kg AS}$

(\*) humidité absolue  $x = 3,7 \text{ g/kg AS}$

Enthalpie  $h = 7 \text{ kcal/kg AS}$

température de rose  $t_R = -0,7^\circ\text{C}$  (intersection de la verticale de côté  $x = 3,7$  et la courbe de saturation  $e = 1$ )

~~Exemple 2/14~~

Exemple 2. de l'air à  $t_1 = +5^\circ\text{C}$  et au degré hygrométrique  $e_1 = 0,85$  est chauffé jusqu'à  $t_2 = +25^\circ\text{C}$ . On demande les caractéristiques de son état final ainsi que la quantité de chaleur absorbée par son échauffement, supposé effectué à pression constante.

Solution

La teneur en eau (humidité absolue) restant éte pendant toute la durée de l'échauffement, l'évolution de l'air humide est représentée

par une verticale partant du point d'état initial 1. Le point final 2 se trouve à l'intersection de cette verticale et l'isotherme  $t_2 = 25^\circ\text{C}$

En 2  $x_2 = x_1 = 4,1 \text{ g/kg AS}$   
 $\left\{ \begin{array}{l} x_1 = x_2 = 4,1 \text{ g/kg AS} \\ e_2 = 0,21 \end{array} \right.$

D'autre part, le point 2 se trouve entre les deux isenthalpes 8 et 9 Kcal/kg AS

L'interpolation donne

$$h_2 = 8,5 \text{ Kcal/kg AS}$$

$$\begin{array}{l} h' \ 8 \longrightarrow t' = 24 \\ h'' \ 9 \longrightarrow t'' = 25 \end{array} \text{ pour } e_1 = 0,85$$

$$\begin{aligned} \text{pour } t_2 = 25^\circ\text{C} \Rightarrow h_2 &= h' + \frac{t_2 - t_1}{t'' - t'} \cdot (h'' - h') \\ &= 8 + \frac{25 - 24}{25 - 24} \cdot (9 - 8) \\ &= 8 + \frac{1}{1} \cdot 1 = 8,5 \\ \Rightarrow h_2 &= 8,5 \text{ Kcal/kg AS} \end{aligned}$$

$$T_R = 0,5^\circ\text{C}$$

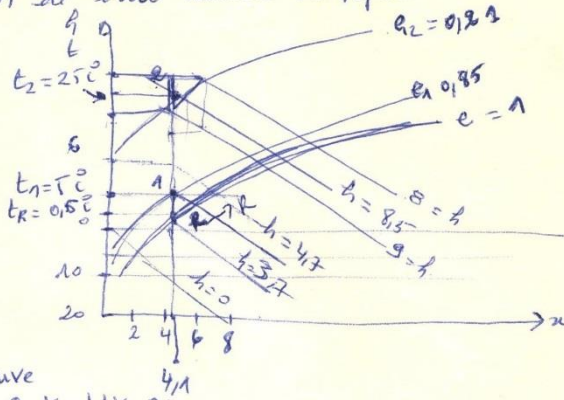
dans l'état 1 en avait  $h_1 = 4,7 \text{ Kcal/kg AS}$

la quantité de chaleur absorbée par échauffement

$$\text{est } Q = h_2 - h_1 = 8,5 - 4,7 = 3,8 \text{ Kcal/kg AS}$$

$$Q = 3,8 \text{ Kcal/kg AS}$$

- 19 -



EX 3. on veut sécher dans un séchoir à circulation d'air

chaud et en circuit ouvert un produit qui ne peut supporter une température supérieure à une certaine valeur  $t_{max}$ . L'air extérieur est pris à une température  $t_1$  et un degré hygrométrique  $e_1$ . L'air sera d'abord réchauffé jusqu'à la température  $t_{max}$ . Au cours de cet échauffement, son humidité absolue restant constante, l'évolution est représentée par le segment verticale 1-2 (voir figure)

état 1	état 2
$t_1$	$t_{max}$
$e_1$	$x_2 = x_1$

l'air chaud, passant ensuite au contact du produit à sécher se refroidit en même temps qu'il se charge d'humidité. L'évolution qui s'effectue à enthalpie constante est représentée par le segment d'isenthalpie 2-3,

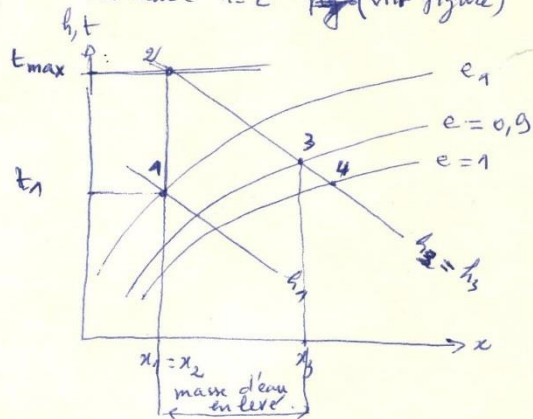
Etat 3

$$h_2 = h_3$$

$$e = 0,9$$

$x_3$  a donc enlevé au produit à sécher une masse d'eau  $x_3 - x_1$  g/kg AS

$$Q = h_2 - h_1$$





# I-8 Mélange d'airs humides

On mélange à pression constante et sans échange de chaleur avec l'extérieur (mélange adiabatique) une masse  $m_1$  d'air humide d'humidité absolue  $x_1$  et à la température  $t_1$  avec une masse  $m_2$  d'air humide d'humidité absolue  $x_2$  et à température  $t_2$ .

les masses d'air sec

$$m_{a1} = \frac{m_1}{1+x_1} \quad \left\{ \begin{array}{l} 1+x = \frac{m_a+m_v}{m_a} \Rightarrow m_a = \frac{m_a+m_v}{1+x} = \frac{m}{1+x} \end{array} \right.$$

$$m_{a2} = \frac{m_2}{1+x_2}$$

et les masses de vapeur d'eau.

$$m_{v1} = m_{a1} \cdot x_1$$

$$m_{v2} = m_{a2} \cdot x_2$$

$$\left( x = \frac{m_v}{m_a} \right)$$

d'où pour le mélange

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{am} = m_{a1} + m_{a2} \\ m_{vm} = m_{v1} + m_{v2} = m_{a1} x_1 + m_{a2} x_2 = m_{am} \cdot x_m \end{array} \right. \quad \left( x_m = \frac{m_{vm}}{m_{am}} \right)$$

d'où on tire -

$$x_m = \frac{m_{a1} x_1 + m_{a2} x_2}{m_{a1} + m_{a2}} \quad \text{--- (I-23)}$$

D'autre part, le mélange s'effectuant de façon adiabatique ( $dq=0$ )

$$m_{am} \cdot h_m = m_{a1} h_1 + m_{a2} h_2$$

$$\Rightarrow h_m = \frac{m_{a1} h_1 + m_{a2} h_2}{m_{a1} + m_{a2}} \quad \text{--- (I-24)}$$

des relations (I-23) et (I-24)

$$\frac{m_{a1}}{m_{a2}} = \frac{x_2 - x_m}{x_m - x_1} = \frac{h_2 - h_m}{h_m - h_1} \quad \text{--- (I-25)}$$

La connaissance des caractéristiques ( $m_1, t_1, x_1$ ) et ( $m_2, t_2, x_2$ ) permet à l'aide des relations (I-23) et (I-24) de déterminer ( $x_m, h_m$ ). On en déduit la température  $t_m$  du mélange en résolvant par rapport à  $t_m$  l'équation

$$h_m = 0,24 t_m + x_m (595 + 0,46 t_m)$$

$$\Rightarrow t_m = \frac{h_m - 595 x_m}{0,24 + 0,46 x_m} \quad \text{--- (I-26)}$$

0,24 96 91.64

26. -21-

(I-26)

On faisant apparaître les quantités  $m_{a1}, h_1, t_1$  et  $m_{a2}, h_2, t_2$  I-23  
 alors on peut écrire I-24

$$t_m = \frac{m_{a1} h_1 + m_{a2} h_2}{m_{a1} + m_{a2}} - 595 \frac{(m_{a1} x_1 + m_{a2} x_2)}{m_{a1} + m_{a2}} \quad \text{I-23}$$

$$t_m = \frac{\frac{(m_{a1} + m_{a2})}{m_{a1} + m_{a2}} \times (0,24 + 0,46 \cdot \frac{m_{a1} x_1 + m_{a2} x_2}{m_{a1} + m_{a2}}) - 595 (m_{a1} x_1 + m_{a2} x_2)}{m_{a1} (0,24 t_1 + (0,46 t_1 + 595) x_1) + m_{a2} (0,24 t_2 + (0,46 t_2 + 595) x_2)}$$

$$t_m = \frac{595 (m_{a1} x_1 + m_{a2} x_2)}{m_{a1} (0,24 + 0,46 x_1) \cdot t_1 + m_{a2} (0,24 + 0,46 x_2) \cdot t_2 + \frac{595 (m_{a1} x_1 + m_{a2} x_2)}{595 (m_{a1} x_1 + m_{a2} x_2)}}$$

$$\Rightarrow t_m = \frac{m_{a1} (0,24 + 0,46 x_1) \cdot t_1 + m_{a2} (0,24 + 0,46 x_2) \cdot t_2}{m_{a1} (0,24 + 0,46 x_1) + m_{a2} (0,24 + 0,46 x_2)} \quad \text{I-27}$$

les mélanges de variétés d'air humide s'interprètent très facilement sur les diagrammes. Soient, sur le diagramme  $h, x$  les états d'air humide ~~à~~ les points 1 et 2. Considérons la droite 1-2 qui relie ces deux points. (voir figure) la relation :

$$\frac{m_{a1}}{m_{a2}} = \frac{x_2 - x_m}{x_m - x_1}$$

montre que le point M se trouve sur la droite 1-2 et qu'il partage le segment 1-2 dans le rapport

$$\frac{M2}{M1} = \frac{x_2 - x_m}{x_m - x_1} = \frac{m_{a1}}{m_{a2}}$$

Rq Le mélange de deux variétés d'air humide saturées donne toujours pour résultat un air chargé de brouillard, voir figure

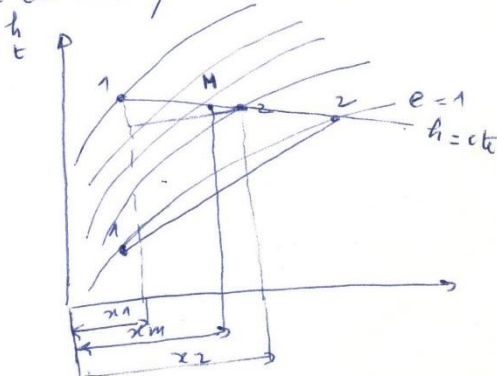


Fig. 6 Mélange de deux variétés d'air humide