

L'air humide

Jean-Marie SEYNHAEVE

Caractéristiques de l'air humide (variables)

Diagramme (h,x) de l'air humide

Mélanges

Le psychromètre

Applications diverses

Conditionnement d'air

Caractéristiques de l'air humide (variables)

• Caractéristiques de l'air humide (mélange air sec/eau) :

• Air sec

⇒ Hypothèse : mélange de gaz parfaits

⇒ Composition volumique (= composition molaire):

$$[O_2] = 0.210 \quad [N_2] = 0.781 \quad [Ar] = 0.009$$

⇒ Masse molaire et constante R_a :

$$\underline{M_a} = 28.96 \text{ kg / kmole} \quad R_a = \frac{8314.51}{28.96} = 287.1 \text{ J / kg / K}$$

⇒ Chaleur massique : à 100 kPa entre 0 et 50 °C

$$\bar{c}_{pa} = 1.009 \text{ kJ / kg / } ^\circ\text{C}$$

• **Eau**

⇒ Eau sous forme vapeur (faible pression) : gaz parfait

⇒ Masse molaire : $\underline{M_v = 18.02 \text{ kg / kmole}}$

⇒ Chaleurs massiques :

Vapeur	$\bar{c}_{pv} = 1.854 \text{ kJ / kg / } ^\circ\text{C}$
Liquide	$\bar{c}_{pl} = 4.1868 \text{ kJ / kg / } ^\circ\text{C}$
Solide	$\bar{c}_{ps} = 2.093 \text{ kJ / kg / } ^\circ\text{C}$

⇒ Chaleurs de vaporisation et de fusion :

Vaporisation (0 °C) $\underline{(h_{iv})_0 = 2501.6 \text{ kJ / kg}}$

Fusion (0 °C) $\underline{(h_{sl})_0 = 333.5 \text{ kJ / kg}}$

• **Air humide : Air sec + vapeur d'eau = mélange de gaz parfaits**

⇒ Pressions partielles (loi de Dalton): $\underline{p = p_a + p_v}$

⇒ Fractions volumique et massique de H_2O dans le mélange :

$$\underline{[H_2O] = \frac{p_v}{p} = \frac{M_v/18.02}{M_v/18.02 + M_a/28.96}} \quad \underline{(H_2O) \triangleq \frac{M_v}{M_v + M_a}}$$

⇒ Définition de l'humidité absolue : $\underline{x = \frac{M_v}{M_a} \text{ (kg } H_2O / \text{kg air sec)}}$

Intérêt : M_a constant, M_v peut varier (condensation ou évaporation)

⇒ Définition de l'humidité relative (état hygrométrique) : $\underline{\phi \triangleq \frac{p_v}{p_v'}}$

p_v' : pression de saturation correspondant à t

• **Relation entre x et φ :**

$$\Rightarrow \text{On a : } \frac{p_v}{p_a} = \frac{p_v}{p - p_v} = \frac{M_v/18.02}{M_a/28.96} = \frac{1}{0.622} x$$

\Rightarrow Donc :

$$x = 0.622 \frac{\varphi p_v'}{p - \varphi p_v'}$$

\Rightarrow Cas limites :

• $\varphi = 0 \Rightarrow$ Air sec $\Rightarrow x = 0$

• $\varphi = 1 \Rightarrow$ Air « saturée en humidité $\Rightarrow x = 0.622 \frac{p_v'}{p - p_v'}$

\Rightarrow Fractions massique et volumique :

$$(H_2O) = \frac{x}{1+x}$$

$$[H_2O] = \frac{\varphi p_v'}{p} = \frac{x}{0.622 + x}$$

\Rightarrow Constante R_{ah} :

$$R_{ah} = 287.1 \frac{1 + 1.608x}{1+x} = \frac{287.1}{1 - 0.378 \frac{\varphi p_v'}{p}}$$

AMCO 2363 - L'air humide

5

• **Point de rosée (dewpoint) et hygromètre :**

\Rightarrow Refroidissement isobare de l'air humide jusqu'à la limite de condensation :
 $x = \text{Cte}$, mais $\varphi \nearrow$

= point de rosée ($\varphi = 1$) et température de rosée t_r

\Rightarrow Si on poursuit le refroidissement au-dessous de t_r :

- si $t_r > 0^\circ\text{C}$: condensation (x_p) et $x \searrow$ (brouillard)
- si $t_r < 0^\circ\text{C}$: formation de glace (x_g) et $x \searrow$

\Rightarrow Température de rosée t_r permet de déduire x et φ :

$$t_r \rightarrow p_v' \rightarrow x = 0.622 \frac{p_v'(t_r)}{p - p_v'(t_r)} \rightarrow \varphi$$

\Rightarrow Hygromètre : mesure de t_r ou de φ (sonde diélectrique)

AMCO 2363 - L'air humide

6

• **Enthalpie de l'air humide :**

⇒ Unité : kJ/kg **d'air sec**

⇒ Référence $h = 0$:

- Air sec : 0°C
- Eau : **liquide** à 0°C

⇒ Enthalpies des différents composants de l'air humide:

$t > 0^\circ\text{C}$

Composant	Quantité (kg)	Enthalpie (kJ/kg)
Air sec	1	$1.009t$
Vapeur d'eau	x_v	$1.854t + 2501.6$
Eau liquide	x_l	$4.1868t$

$t < 0^\circ\text{C}$

Composant	Quantité (kg)	Enthalpie (kJ/kg)
Air sec	1	$1.009 t$
Vapeur d'eau	x_v	$1.854 t + 2501.6$
Glace	x_s	$-333.5 + 2.093 t$

⇒ Enthalpie de l'air humide:

$t > 0^\circ\text{C}$

$$h = (1.009 + 1.854x_v)t + 2501.6x_v + 4.1868x_l t$$

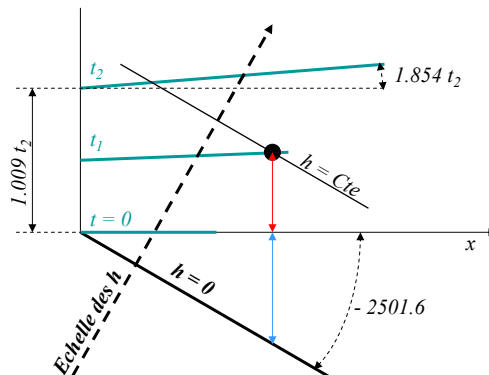
$t < 0^\circ\text{C}$

$$h = (1.009 + 1.854x_v)t + 2501.6x_v - (333.5 - 2.093t)$$

Diagramme (h,x) de l'air humide

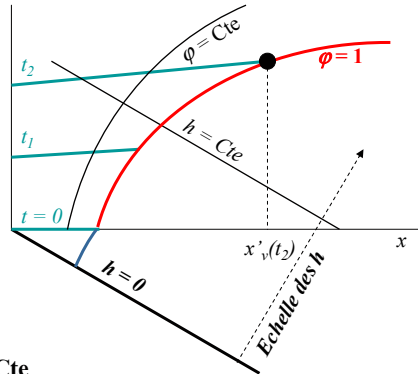
• Cas 1 : air sec + vapeur d'eau $x = x_v$ $x_l = 0$ $x_s = 0$

$$h = (1.009 + 1.854x_v)t + 2501.6x_v$$



• Limite du Cas 1 : $\varphi = 1$

Soit $t \Rightarrow p'_v(t) \Rightarrow x'_v = 0.622 \frac{p'_v(t)}{p - p'_v(t)}$



• Courbe $\varphi = Cte$

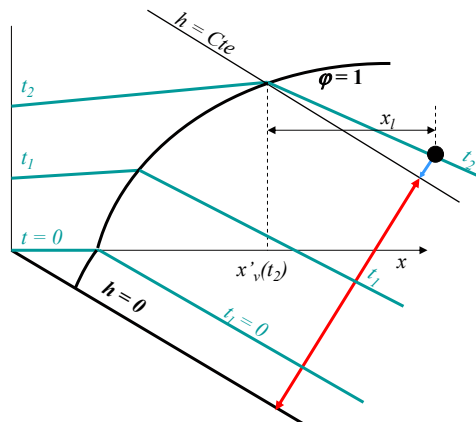
Soit t et $\varphi \Rightarrow p'_v(t) \Rightarrow x_v = 0.622 \frac{\varphi p'_v(t)}{p - \varphi p'_v(t)}$

AMCO 2363 - L'air humide

9

• Cas 2 : air sec + vapeur + eau liquide $x > x'_v$ $x_v = x'_v$ et $x = x'_v + x_l$

$t > 0^\circ\text{C}$ $h = (1.009 + 1.854x'_v)t + 2501.6x'_v + 4.1868x_l t$

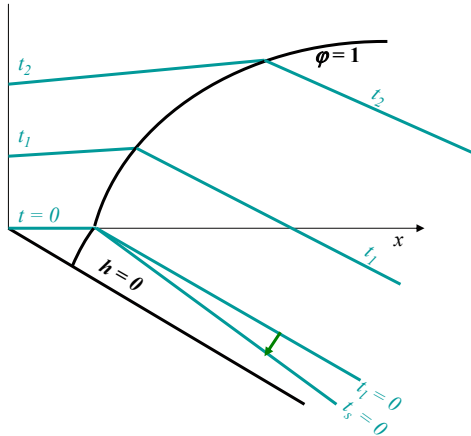


AMCO 2363 - L'air humide

10

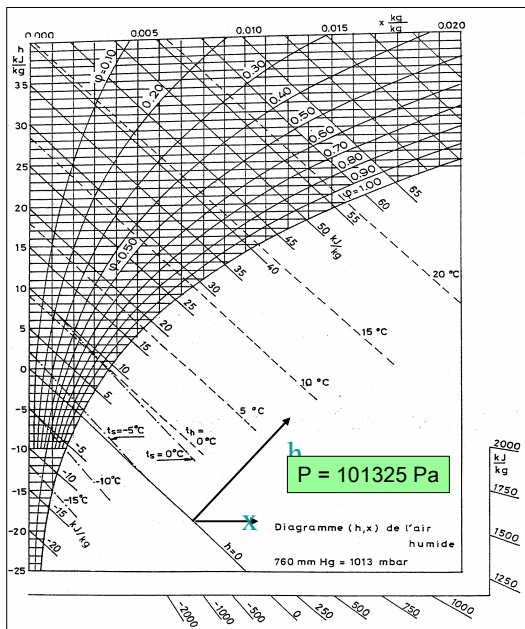
• Cas 3 : air sec + vapeur + glace $x > x'_v$ $x_v = x'_v$ et $x = x'_v + x_s$

$$t < 0^\circ\text{C} \quad h = (1.009 + 1.854x'_v)t + 2501.6x'_v - (333.5 - 2.093t)x_s$$



AMCO 2363 - L'air humide

11



Pression absolue donnée

Variables d'état

- Température sèche ($^\circ\text{C}$)
- Humidité absolue (kg/kg A.S.) ou Température de rosée ($^\circ\text{C}$)
- Humidité relative (- ou %)
- Enthalpie (kJ/kg A.S.) ou Température humide ($^\circ\text{C}$)

2 variables données

Déduction des 2 autres variables

- Par diagramme
- Par calcul

AMCO 2363 - L'air humide

12

Exemple de fonctions d'état (Excel)

Type de fonction	Variables d'entrée	grandeur calculée
Function xabs(p, t, phi)	pression, température, humidité relative	Humidité absolue
Function hr(p, t, x)	pression, température, humidité absolue	Humidité relative
Function tros(p, x)	pression, humidité absolue	Température de rosée
Function hx(t, x)	température, humidité absolue	Enthalpie
Function h(p, t, phi)	pression, température, humidité relative	Enthalpie
Function thx(h, x)	enthalpie, humidité absolue	Température
Function thum(p, h)	pression, enthalpie	Température "humide"

⇒ Voir fonctions programmées sur Excel

Rem : Fonction ts(p,hs) : procédure itérative de convergence par Newton-Raphson

Influence de la pression de l'air

Soit de l'air à pression atmosphérique

- Patm = 100000 Pa
- t atm = 20 °C
- **Humidité absolue = 0.00735 kg/kg A.S.**

⇒

- Psat (20 °C) = 2336 Pa
- P partielle vapeur = 1168 Pa
- Fraction molaire H₂O = 1.168 %
- Humidité relative = 50 %



Compression isotherme à 2 bars

- Patm = 200000 Pa
- t atm = 20 °C
- **Humidité absolue = 0.00735 kg/kg A.S.**

⇒

- Psat (20 °C) = 2336 Pa
- P partielle vapeur = 2336 Pa
- Fraction molaire H₂O = 1.168 %
- Humidité relative = 100 %



⇒ Voir tableau Excel : exemple Air comprimé

Mélange adiabatique et isobare

- Soit M_1 d'état hygrométrique (h_1, t_1, x_1)
- Soit M_2 d'état hygrométrique (h_2, t_2, x_2)

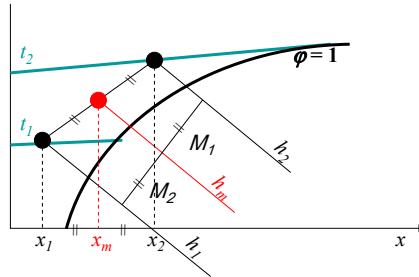
Bilan de masse

$$M = M_1 + M_2$$

$$x_m = \frac{x_1 M_1 + x_2 M_2}{M_1 + M_2}$$

Bilan d'énergie

$$h_m = \frac{h_1 M_1 + h_2 M_2}{M_1 + M_2}$$



• On a aussi :

$$\begin{aligned} M_1(x_m - x_1) &= M_2(x_2 - x_m) \\ M_1(h_m - h_1) &= M_2(h_2 - h_m) \end{aligned}$$

AMCO 2363 - L'air humide

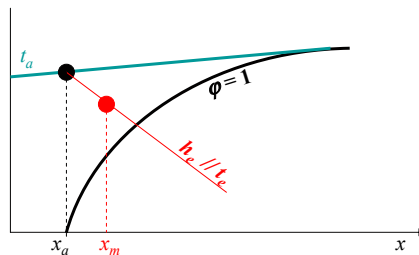
15

• Mélange adiabatique et isobare d'air humide + eau :

- Soit M_a d'état hygrométrique (h_a, t_a, x_a)
- Soit M_e : masse d'eau liquide (vapeur) à t_e

• Bilan de masse et d'énergie :

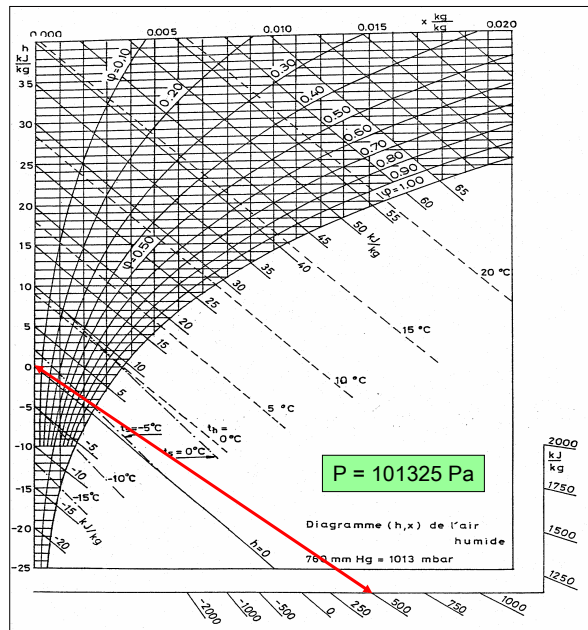
$$\begin{aligned} M_e &= M_a(x_m - x_a) \\ M_e h_e &= M_a(h_m - h_a) \end{aligned} \quad \text{ou} \quad \frac{h_m - h_a}{x_m - x_a} = h_e$$



Voir échelle des enthalpies sur le diagramme

AMCO 2363 - L'air humide

16



Exemple

$t_e = 120\text{ °C}$
 $h_e = \dots 500 \dots \text{ kJ/kg}$

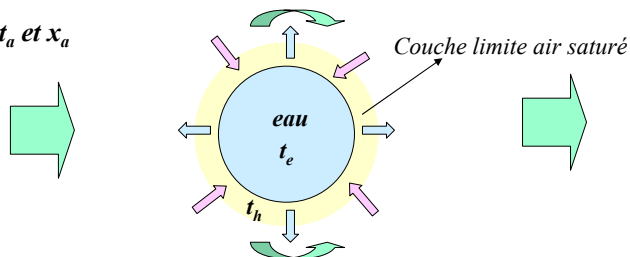
AMCO 2363 - L'air humide

17

Echanges Eau – Air humide : Le psychromètre

Evaporation adiabatique de l'eau au contact de l'air :

Air humide à t_a et x_a



- A l'équilibre thermique de la goutte : $t_e = t_h$
- Equilibre de flux thermiques :

Flux convectif = Energie due au flux de masse

$$\alpha S (t_a - t_h) = 2501.6 \sigma S (x_a - x_h)$$

AMCO 2363 - L'air humide

18

- Conséquence de l'équilibre des flux :

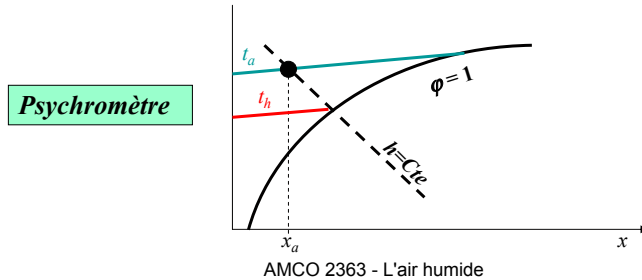
$$c_p(t_a - t_h) = 2501.6(x_h - x_a) \frac{\sigma c_p}{\alpha} \quad \text{avec} \quad Le \triangleq \frac{\sigma c_p}{\alpha} \cong 1$$

C_p est la chaleur massique moyenne de l'air humide entre t_a et t_h

\Rightarrow on obtient pour la différence d'enthalpie $h_a - h_h$:

$$h_a - h_h \stackrel{\Delta}{=} c_p (t_a - t_h) + 2501.6 (x_a - x_h) = 0$$

La température humide se trouve sur l'isenthalpique passant par l'état hygrométrique de l'air

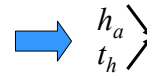


19

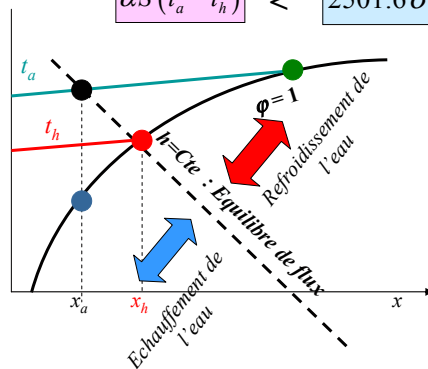
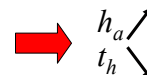
- *Cas du déséquilibre des flux :*



$$\text{Flux convectif} > \text{Energie due au flux de masse}$$

$$\alpha S(t_a - t_h) > 2501.6 \sigma S(x_a - x_h)$$


$$\text{Flux convectif} < \text{Energie due au flux de masse}$$

$$\alpha S(t_a - t_h) < 2501.6 \sigma S(x_a - x_h)$$

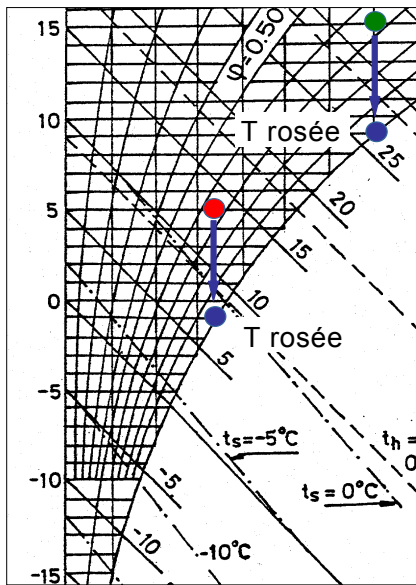


- Si $x_a = x_h$: flux de masse = 0
 $\Rightarrow A$ droite : évaporation
 $\Rightarrow A$ gauche : condensation
- Si $t_a = t_h$: flux convectif = 0
 $\Rightarrow A$ droite : t_a 
 $\Rightarrow A$ gauche : t_a 

AMCO 2363 - L'air humide

20

Applications :



● Formation de la buée

$T_{\text{vitrage}} < T_{\text{rosée}} (+/- 8 \text{ } ^\circ\text{C})$

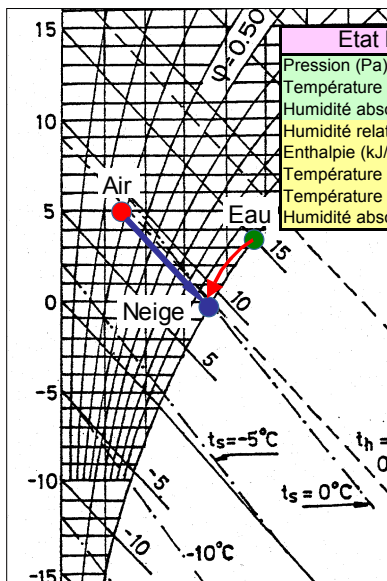
Favorisée lorsque ϕ augmente

● Formation du givre

$T_{\text{route}} < T_{\text{rosée}} (+/- -1 \text{ } ^\circ\text{C})$

Favorisée lorsque ϕ augmente
Et temps « clair »

Applications : Canon à neige

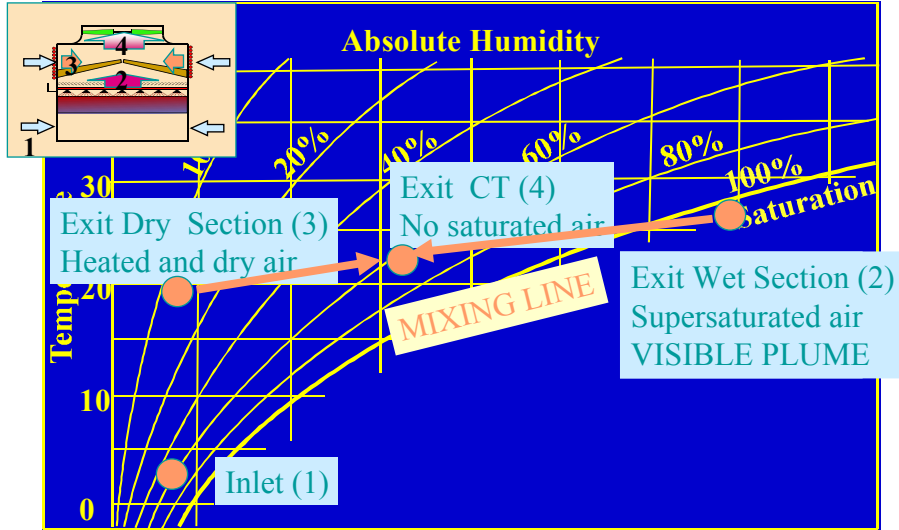


Etat hygrométrique de l'air en altitude en hiver			
Pression (Pa)	100000	90000	80000
Température (°C)	5	5	5
Humidité absolue (kg/kg air sec)	0.0015	0.0015	0.0015
Humidité relative (%)	27.57	24.81	22.06
Enthalpie (kJ/kg air sec)	8.81	8.81	8.81
Température de rosée (°C)	-12.19	-13.49	-14.93
Température humide (°C)	-0.45	-1.04	-1.72
Humidité absolue à sat. (kg/kg air sec)	0.00548	0.00609	0.00686

Favorisé lorsque

- ϕ diminue : temps sec
- p diminue : en altitude

Applications : Réfrigérant atmosphérique



AMCO 2363 - L'air humide

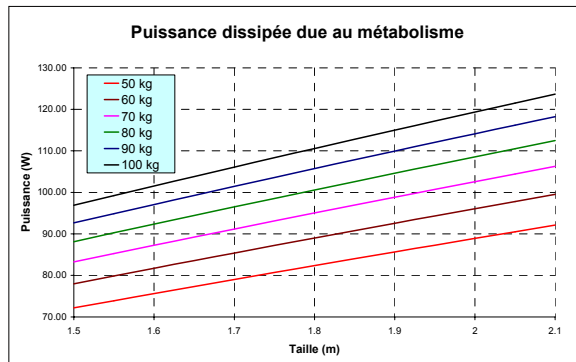
23

Conditionnement d'air : Le confort humain

- Métabolisme : fonctionnement des divers organes vitaux



$$M = S \cdot M_s$$



M_s : puissance spécifique = +/- 50 W/m²

S : Surface corporelle

$$S \approx 0.204 m^{0.425} t^{0.725}$$

m : poids en kg

t : taille en m

AMCO 2363 - L'air humide

24

Conditionnement d'air : Le confort humain

• Activité et effort physique



Rendement « biologique » :

$$\eta_{bio} \triangleq \frac{W}{\dot{Q}} = 0.22 \dots 0.25$$

W : Puissance « mécanique » ... 75 W ... en continu

\dot{Q} : Puissance « thermique » 300 ... 350 W en continu

Conditionnement d'air : Le confort humain

• Bilan thermique avec l'air ambiant



Puissance fournie par le corps humain $M + \dot{Q}$

=

Puissance perdue $\dot{Q}_c + \dot{Q}_r + \dot{Q}_e + \dot{R}$

\dot{Q}_c : Puissance dissipée par convection

\dot{Q}_r : Puissance dissipée par rayonnement

\dot{Q}_e : Puissance dissipée par évaporation d'eau

\dot{R} : Puissance résiduelle

$\dot{R}+$

$\dot{R}-$

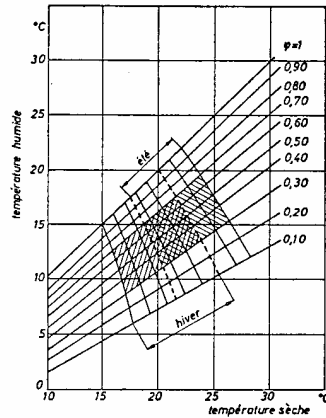
Thermorégulation

Conditionnement d'air : Le confort humain

• Quelles conditions à réaliser ?

Fonction des objectifs poursuivis

- Conservation des produits :
entrepôts, magasins ...
- Opérations de fabrication :
alimentation, électronique,
textiles, électromécanique...
- Confort des occupants :
bureaux, hôpitaux,
salle de réunion, spectacle...



AMCO 2363 - L'air humide

27

Conditionnement d'air : Le confort humain

• Quelles valeurs moyennes : données de base

Homme au repos

- Puissance calorifique dissipée par l'homme : 100 W/p:
- Quantité de vapeur d'eau par personne : 0.05 kg/h/p
- Quantité de CO₂ dégagée par personne : 0.030 ... 0.035 kg/h/p
- ⇒ Besoin en air hygiénique (neuf) : ...20... m³/h/p
 - ou ...3... m³/h/m²
 - ou environ un renouvellement complet de l'air par heure

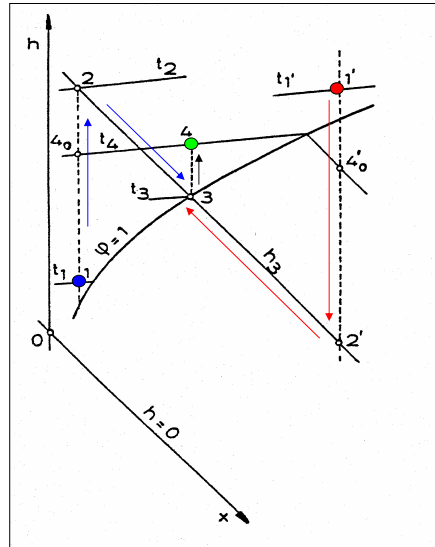


Forte Sensibilité à l'activité physique et à l'occupation des locaux

AMCO 2363 - L'air humide

28

Conditionnement d'air : Principe de fonctionnement



Conditions «hiver»

- Réchauffement : $1 \Rightarrow 2$
- Humidification : $2 \Rightarrow 3$
- Réchauffement : $3 \Rightarrow 4$

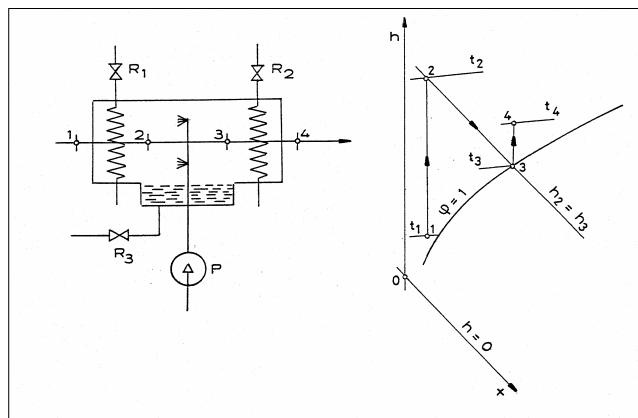
Conditions «été»

- Refroidissement : $1' \Rightarrow 2'$
- Déshumidification : $2' \Rightarrow 3'$
- Réchauffement : $3 \Rightarrow 4$

AMCO 2363 - L'air humide

29

Conditionnement d'air en hiver



Conditions «hiver»

- Réchauffement : $1 \Rightarrow 2$
- Humidification : $2 \Rightarrow 3$
- Réchauffement : $3 \Rightarrow 4$

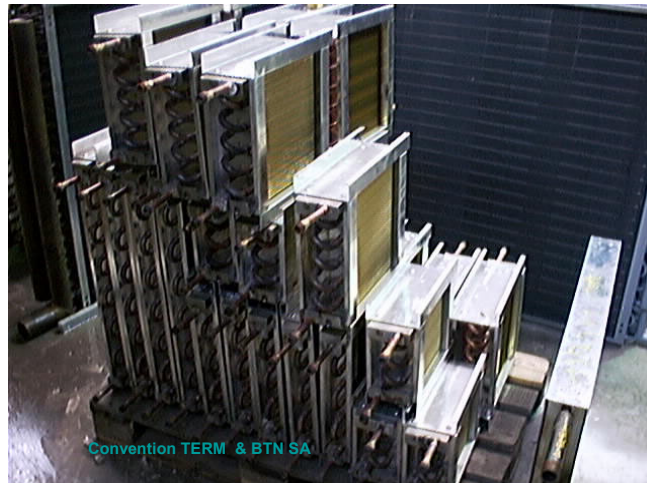
Régulation ?

Voir exemple tableau Excel

AMCO 2363 - L'air humide

30

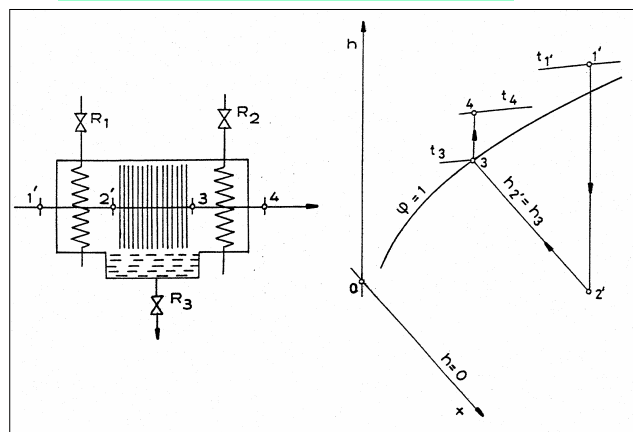
Conditionnement d'air : Batteries de chauffe ou de refroidissement



AMCO 2363 - L'air humide

31

Conditionnement d'air en été



Conditions «été»

- Refroidissement : $1' \Rightarrow 2'$
- Déshumidification : $2' \Rightarrow 3$
- Réchauffement : $3 \Rightarrow 4$

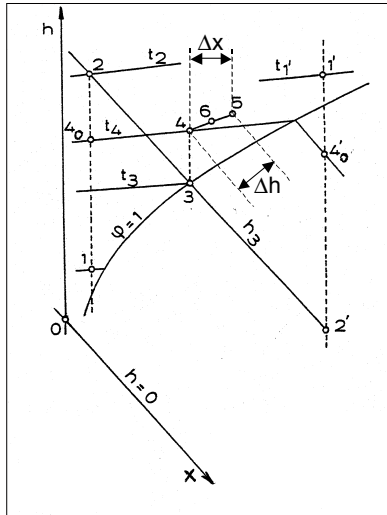
Régulation ?

Voir exemple tableau Excel

AMCO 2363 - L'air humide

32

Conditionnement d'air : Incidence de l'occupation des locaux



Δh

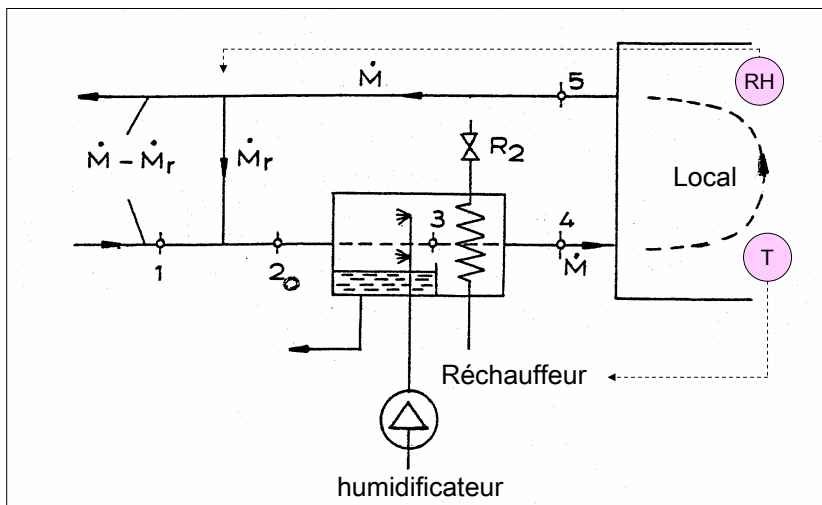
- Déperdition calorifique du local (ou apport)
- Eclairage
- Machines (PC...)
- Personnes
- Etc.

Δx

- Personnes
- Etc.

Voir exemple tableau Excel

Conditionnement d'air : Recyclage de l'air



Conditionnement d'air : Recyclage de l'air

