

CONDITIONS DE SOUFLAGE

Droite de soufflage :

On appelle droite de soufflage, la droite **fictive** reliant le point de l'air du local et l'air de soufflage.

Le segment [AI,AS] sur le diagramme psychrométrique est inclinée d'un angle « i » par rapport à l'horizontale.

Cet angle i est fonction du rapport de l'évolution appelé « j »

$$j = \frac{H_0}{M} = \frac{(h_{AI} - h_{AS})}{(r_{AI} - r_{AS})} \text{ en kJ/kg}_{\text{eau}}$$

Pour trouver l'angle « i » d'inclinaison de la droite de soufflage, on peut utiliser la relation :

$$\text{tgi} = \frac{0,545}{0,84 - 3,333 \times 10^{-4} \times j}$$

Valable sur Format A3 diagramme PORCHER

Exemple :

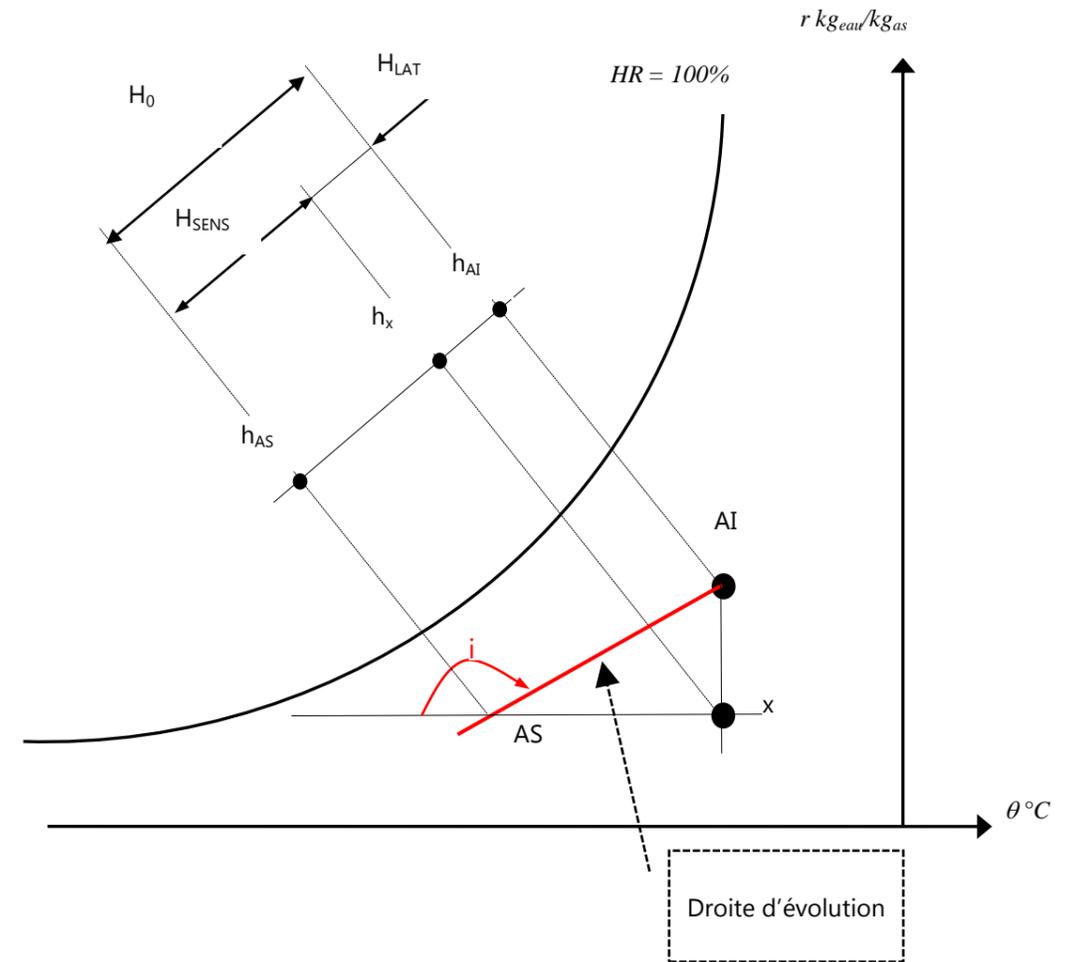
Soit $H_0 = + 10 \text{ kW}$
 $M = + 0,0025 \text{ kg}_{\text{eau}}/\text{s}$

$$j = 4000 \text{ kJ/kg}_{\text{eau}}$$

$$\text{tgi} = \frac{0,545}{0,84 - 3,333 \times 10^{-4} \times j} = - 1,105$$

$$i = -47,90^\circ$$

(pour un diagramme de PORCHER en A3)



Mais la connaissance de l'angle « i » ne permet pas de positionner le point de soufflage sur le diagramme précisément. Pour cela il faut déterminer les caractéristiques du point de soufflage **AS**.

Il existe deux méthodes :

- 1) Méthode à l'Ecart au Soufflage
- 2) Méthode du Taux de Brassage

Les résultats de ces deux méthodes peuvent être observés grâce au fichier EXCEL : « **EE1-Simul_ecart soufflage-JPG** »

1) METHODE DE L'ECART AU SOUFFLAGE

Elle nécessite en premier lieu le choix du système de diffusion de l'air dans le local (type de bouches), qui imposera : l'écart de soufflage : $\Delta\theta_s$ et $\Delta\theta_s = (\theta_{AI} - \theta_{AS})$

a) METHODE EXACTE

On calcule l'humidité absolue du point de soufflage « r_{AS} », en choisissant le $\Delta\theta_s$, ce qui permet de le positionner sur le diagramme par l'expression suivante :

$$r_{AS} = \frac{j \times r_{AI} - \Delta\theta_{AS} - (2490 + 1,96 \times \theta_{AI}) \times r_{AI}}{j - (2490 + 1,96 \times \theta_{AS})}$$

Une équation de bilan enthalpique ou hydrique suffit ensuite pour évaluer le débit spécifique de soufflage qm_{as} :

$$H_0 = qm_{AS} \times (h_{AI} - h_{AS}) \quad M = qm_{AS} \times (r_{AI} - r_{AS})$$

On peut alors calculer l'enthalpie spécifique du point de soufflage : $h_{AS} = h_{AI} - \frac{H_0}{qm_{AS}}$

b) METHODE APPROCHEE

La deuxième possibilité est d'utiliser directement l'écart de soufflage si l'on connaît les charges sensibles du local :

Avec : $H_{SENS} = qm_{AS} \times C_{as} \times \Delta\theta_s$

On obtient : $qm_{AS} = \frac{H_{SENS}}{C_{as} \times \Delta\theta_s}$

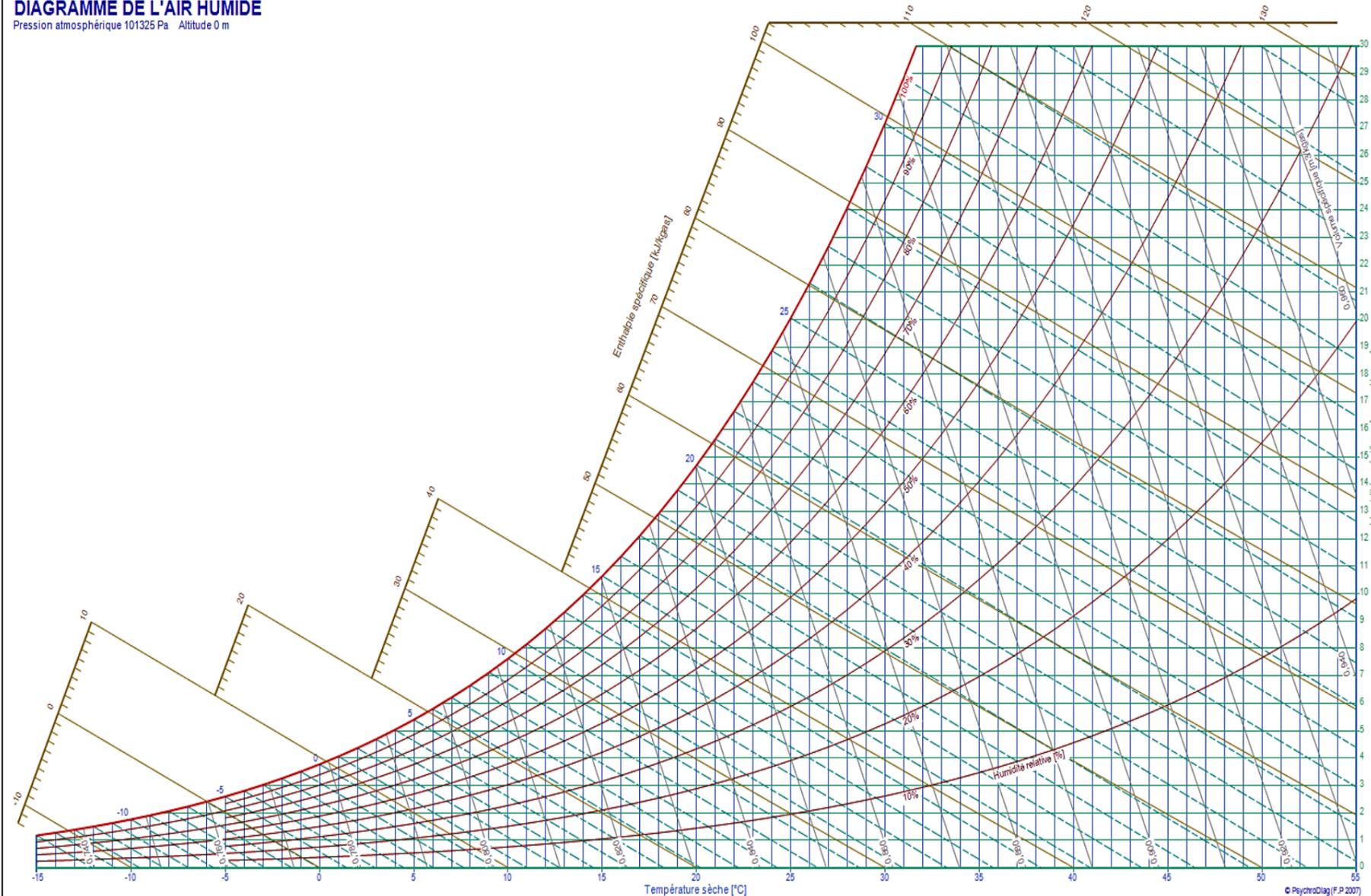
Avec : $M = qm_{AS} \times \Delta r_s$

On obtient : $\Delta r_s = \frac{M}{qm_{AS}}$ et $\Delta r_s = (r_{AI} - r_{AS})$

$$r_{AS} = r_{AI} - \frac{M}{qm_{AS}}$$

DIAGRAMME DE L'AIR HUMIDE

Pression atmosphérique 101325 Pa Altitude 0 m



Application :

On souhaite climatiser un bureau en ETE.

Ambiance : 26°C et 50%

Charges climatiques : $H_0 = 800kW$ et $M = 80 \text{ g}_{\text{eau}}/s$

Déterminez les caractéristiques de l'air soufflé par la méthode exacte, puis par la méthode approchée sachant que l'utilisation de grilles de soufflage imposent : $(\theta_{AI} - \theta_{AS}) = +15^\circ C$

Il faudra souffler de l'air plus froid et moins humide que l'air ambiant !

$$J = 10\,000 \text{ kJ/kg}_{\text{eau}}$$

Pour $(\theta_{AI} - \theta_{AS}) = +15^\circ C$: HRs = 103% ce qui est inconcevable ! Il faut diminuer l'écart au soufflage !

Cf. Simul_Ecart soufflage.xlsx

Conditions Intérieures	$\theta_{AI} =$	26,00°C
	$HR_{AI} =$	50%
	$r_{AI} =$	0,01054 kgeau/kgas
Charges climatiques	$H_0 =$	800,00 kW
	$M =$	0,080 kgeau/s
	$L_v =$	2232,124 kJ/kgeau
	$H_{lat} =$	178,57 kW
	$H_{sens} =$	621,43 kW
Conditions au soufflage	$J =$	10000,00 kJ/kgeau
	$\Delta\theta =$	15,00°C
	$\theta_{AS} =$	11,00°C
	$r_{AS} =$	0,00850 kgeau/kgas

$$t = -12,3^\circ$$

1) METHODE AU TAUX DE BRASSAGE : τ

Les dimensions et la nature du local, le choix du système de climatisation et de diffusion, voire une contrainte de débit volumique au ventilateur de soufflage, peuvent imposer un certain TAUX DE BRASSAGE de l'ambiance du local (A ne pas confondre avec le TAUX DE RENOUELEMENT D'AIR)

Ce taux de brassage, noté « τ », est exprimé en nombre de volume V du local à souffler par heure, ce qui impose le **débit volumique de soufflage** :

$$qv_{AS} = \tau \times V_{local} \quad \text{en } m^3 / s$$

En choisissant en première approximation, comme volume spécifique au soufflage $v_{AS} = v_{AI}$ (AI étant en général plus proche de AS que le point représentatif de l'air extérieur AE), on en déduit le débit massique de soufflage :

$$qm_{AS} = \frac{qv_{AS}}{(3600 \times v_{AS})} \quad \text{en } kg_{as} / s$$

A partir des deux équations de bilans enthalpique et hydrique, on détermine le point de soufflage par ses paramètres h_{AS} et r_{AS} , ce qui permet de comparer v_{AS} avec la valeur de départ v_{AI} .

1ERE ITERATION

On choisit $v_{AS} = v_{AI} \Rightarrow$ on en déduit $qm_{AS} = qv_{AS} / (3600 \times v_{AS})$

H_0 connue $\Rightarrow \Delta h_{S1} = H_0 / qm_{AS} \Rightarrow h_{AS1} = h_{AI} - \Delta h_{S1}$

M connue $\Rightarrow \Delta r_{S1} = M / qm_{AS} \Rightarrow r_{AS1} = r_{AI} - \Delta r_{S1} \Rightarrow$ on en déduit v_{AS1}

\Rightarrow on compare v_{AS1} à v_{AS}

Un écart entre v_{AS1} à v_{AS} implique de réitérer cette résolution en modifiant qm_{AS} avec cette nouvelle valeur de v_{AS} . : le problème converge très rapidement au bout de deux ou trois itérations (précisions obtenues sur les valeurs des paramètres satisfaisantes).

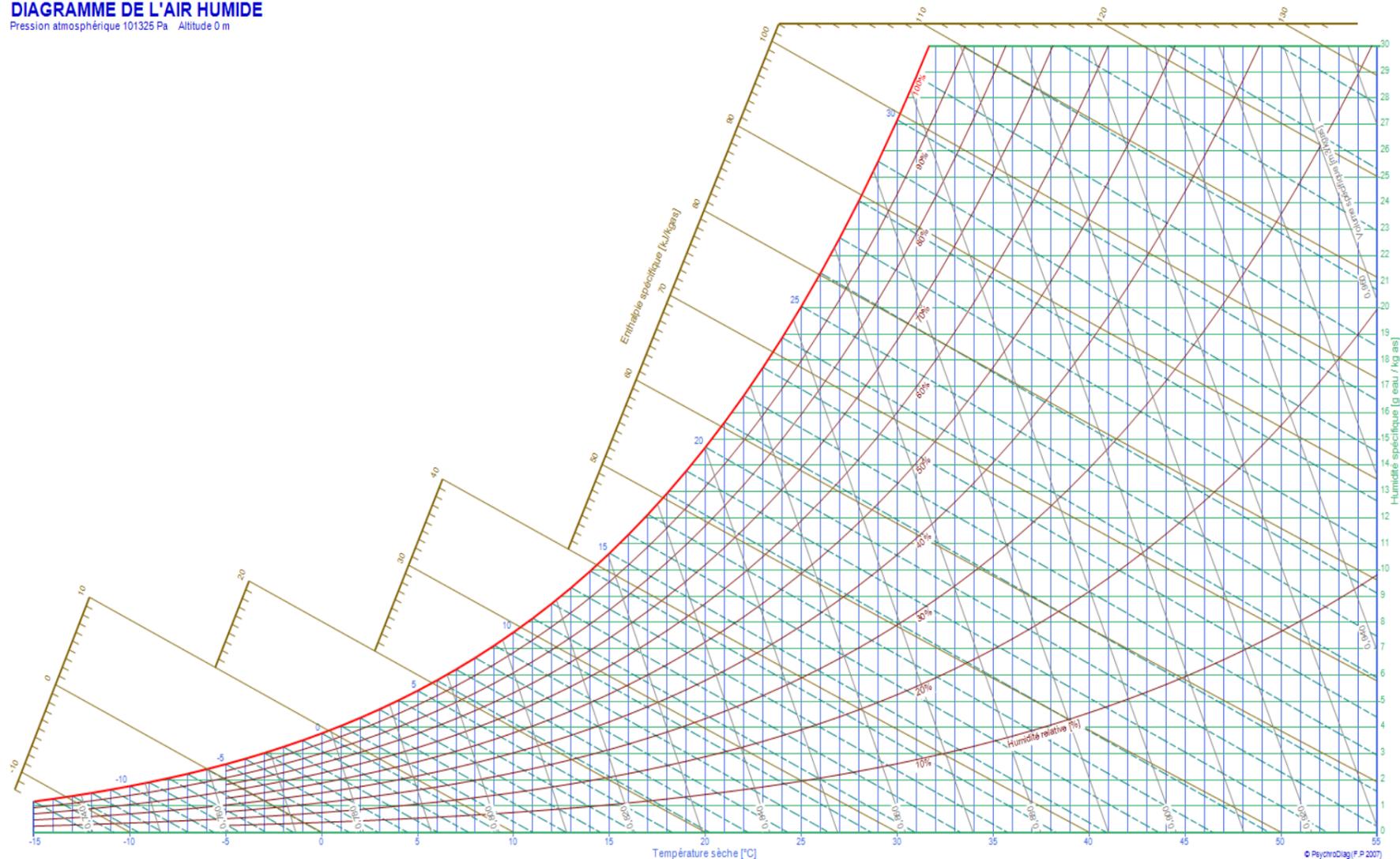
2EME ITERATION

On choisit $v_{AS} = v_{AS1} \Rightarrow$ on en déduit $qm_{AS} = qv_{AS} / (3600 \times v_{AS1})$

H_0 connue $\Rightarrow \Delta h_{S2} = H_0 / qm_{AS1} \Rightarrow h_{AS2} = h_{AI} - \Delta h_{S2}$

M connue $\Rightarrow \Delta r_{S2} = M / qm_{AS1} \Rightarrow r_{AS2} = r_{AI} - \Delta r_{S2} \Rightarrow$ on en déduit v_{AS2}

DIAGRAMME DE L'AIR HUMIDE
Pression atmosphérique 101325 Pa Altitude 0 m



Application :

Soit un local de dimensions $L = 12m - l = 6m$ et $HSP = 2,8m$ à climatiser.
Ambiance : $26^\circ C - HR = 60\%$
Taux de brassage retenu : $15 V/h$
Charges climatiques ETE : $H_0 = 12kW$ et $H_{SENS} = 8kW$

Déterminez les caractéristiques du point de soufflage.

$$(M = (H_0 - H_{sens}) / Lv = (12-8) / (2490 - 2,226 \cdot 26) = 0,0016 \text{ kg}_{eau} / s$$

$$V_{local} = 12 \cdot 6 \cdot 2,8 = 201,60 \text{ m}^3$$

$$\text{Débit volumique d'air soufflé} = 15 \cdot 201,60 = 3024 \text{ m}^3 / h$$

Avec : $\theta_{AI} = 26^\circ C$ et $HR_{AI} = 60\%$

$\rightarrow v_{AI} = 0,865 \text{ m}^3 / \text{kg}_{as}$
 $\rightarrow h_{AI} = 58,08 \text{ kJ} / \text{kg}_{as}$
 $\rightarrow r_{AI} = 12,63 \text{ g}_{eau} / \text{kg}_{as}$

1ère Iteration :

$$qm_{as} = 3024 / 0,865 = 3496 \text{ kg}_{as} / h$$

$$h_{AS1} = h_{AI} - H_0 / qm_{as} = 58,28 - 12 / (3496 / 3600)$$

$$h_{AS1} = 45,92 \text{ kJ} / \text{kg}_{as}$$

$$r_{AS1} = r_{AI} - M / qm_{as} = 0,01263 - 0,0016 / (3496 / 3600)$$

$$r_{AS1} = 0,01101 \text{ kg}_{eau} / \text{kg}_{as}$$

Et :

$$\theta_{AS1} = (h_{AS1} - 2490 \cdot r_{AS1}) / (1 + 1,96 \cdot r_{AS1})$$

$$\theta_{AS1} = (45,72 - 2490 \cdot 0,01101) / (1 + 1,96 \cdot 0,01101)$$

$$\theta_{AS1} = 18,11^\circ C \rightarrow v_{AS1} = 0,840 \text{ m}^3 / \text{kg}_{as} \text{ (lecture)} \neq v_{AS} (v_{AI})$$

2ième Iteration :

$$qm_{as} = 3024 / 0,840 = 3600 \text{ kg}_{as} / h$$

$$h_{AS2} = h_{AI} - H_0 / qm_{as} = 58,08 - 12 / (3600 / 3600)$$

$$h_{AS2} = 46,28 \text{ kJ} / \text{kg}_{as}$$

$$r_{AS2} = r_{AI} - M / qm_{as} = 0,01263 - 0,0016 / (3600 / 3600)$$

$$r_{AS2} = 0,01106 \text{ kg}_{eau} / \text{kg}_{as}$$

Et :

$$\theta_{AS2} = (h_{AS2} - 2490 \cdot r_{AS2}) / (1 + 1,96 \cdot r_{AS2})$$

$$\theta_{AS2} = (46,28 - 2490 \cdot 0,01106) / (1 + 1,96 \cdot 0,01106)$$

$$\theta_{AS2} = 18,35^\circ C \rightarrow v_{AS2} = 0,840 \text{ m}^3 / \text{kg}_{as} \text{ (lecture)} \approx v_{AS1}$$

Arrêt des itérations !

D'où le point de soufflage sera caractérisé par :
 $\theta_{AS} = 18,35^\circ C$ -- $HR_{AS} = 83,50\%$

EVOLUTIONS FONDAMENTALES

Pour aller plus, vous trouverez des évolutions largement utilisées dans la climatisation de confort pour des bâtiments tertiaires. Ce document fait suite au document de formation initial.

Dans l'ordre possible de traitements, on retrouvera :

- | | | |
|----------------------|--------------------------------|---|
| 1) Humidification : | Humidificateur vapeur | Fonction : Humidification |
| | Humidificateur à pulvérisation | Fonction : Rafraîchissement et Humidification |
| 2) Cas particulier : | Adsorbant rotatif | Fonction : Chauffage et Déshumidification |

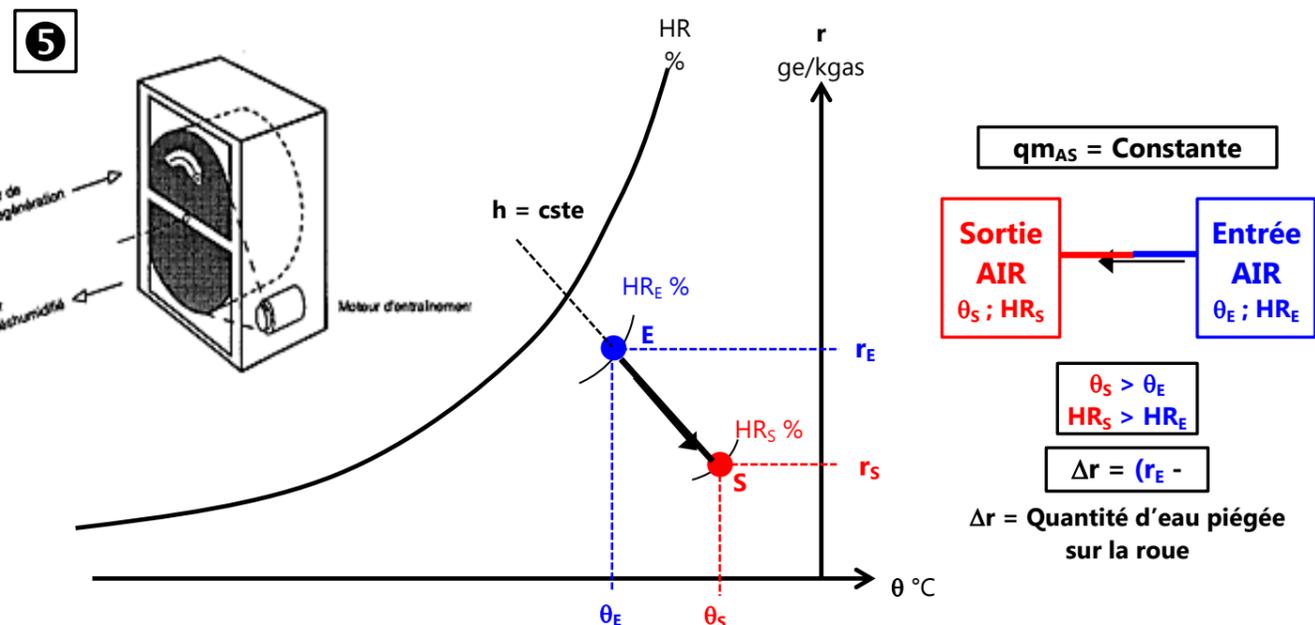
L'étude des évolutions fondamentales se déroulera uniquement sur le domaine de la Climatisation de Confort :

Les différents traitements étudiés sont énumérés ci-dessous.

- ⑤ : Déshumidification par SECHEUR (Dessicateur ou roue absorbante)
- ⑥ : Humidification vapeur :
- ⑦ : Humidification par pulvérisation d'eau : Atomiseur

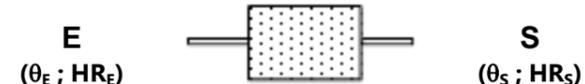
5) Déshumidification de l'air par Adsorption (roue dessicatrice ou cartouche absorbante) : SECHEUR

Représentation : Diagramme Psychrométrique - Soit : un air **E** (θ_E ; HR_E) déshumidifié jusqu'à **S** (θ_S ; HR_S)



On l'appelle aussi : **SECHEUR ADIABATIQUE**
 $h_E = h_S = Cste$

Représentation schématique



Principe

- Un air soumis à une déshumidification par adsorbants solides est un air qui subit :
- Modification de la température sèche : $\theta_S \nearrow$
 - Modification de la teneur en humidité : $r \searrow$
 - Pas de modification de l'enthalpie massique : $h = Cte$

Technologie

L'adsorption consiste en la fixation des molécules d'eau par des liaisons moléculaires faibles. L'air est donc déshumidifié et réchauffé par adsorption à la surface d'un solide du type gel de silice, gel d'alumine ou chlorure de lithium.

Les appareils peuvent se présenter sous la forme :

- d'une cartouche contenant le produit adsorbant
- d'un disque rotatif en aluminium recouvert de produit adsorbant

Dans les 2 cas, il faut prévoir une régénération du produit adsorbant. En effet, au bout d'un certain temps de fonctionnement, le produit est saturé en humidité et il faut le sécher (air chaud à 100 150°C)

Soufflage – Refroidissement – Chauffage – Caisson mélange – Récupération d'énergie ECOROT
Filtration – Extraction – Caisson mélange – Récupération d'énergie ECOROT



Caractéristiques du sécheur

1) Débit massique de déshumidification en kg_{eau}/s

$$qm_{SECH} = qm_{AS} \times (r_{Sa} - r_{Ea}) < 0$$

avec :

qm_{AS} = débit massique d'air sec [kg_{as}/s]

r_{Sa} = teneur en humidité de l'air à la sortie en kg_{eau}/kg_{as}

r_{Ea} = teneur en humidité de l'air à l'entrée en kg_{eau}/kg_{as}

2) élévation de température en $^{\circ}C$

$$(\theta_S - \theta_E) = (2490 + 1,96 \times \theta_E) \times (r_E - r_S)$$

avec :

θ_S = température sèche de l'air sortant en $^{\circ}C$

θ_E = température sèche de l'air entrant en $^{\circ}C$

3) Puissance de régénération en kW

$$PREGEN = 2 \times L_v \times qm_{SECH}$$

avec : qm_{SECH} = débit massique de déshumidification en kg_{eau}/s

L_v = chaleur latente de vaporisation ≈ 2500 en kJ/kg_{eau}

On double la chaleur nécessaire ($2 \times$) pour compenser les pertes thermiques et l'échauffement de la matière et de

Application

Déterminer les caractéristiques d'un déshumidificateur de CTA suivant les caractéristiques ci-après :

Air : **E** ($\theta_{Ea} = 20^{\circ}C$; $HR_{Ea} = 60\%$) et **S** ($HR_{Sa} = 20\%$) avec $qm_{AS} = 1,2 \text{ kg}_{as}/s$

	$\theta \text{ } ^{\circ}C$	HR %	$r \text{ g}_{e}/\text{kg}_{as}$	$h \text{ kJ}/\text{kg}_{as}$	$v \text{ m}^3/\text{kg}_{as}$
E	20	60	8,73	42,08	0,842
S	29,2	20	5,01	42,08	0,864

1) Débit massique de déshumidification :

$$qm_{SECH} = 16,07 \text{ kg}_{eau}/h$$

2) élévation de température :

$$(\theta_S - \theta_E) = 9,41 \text{ } ^{\circ}C \text{ (lecture à } 9,20^{\circ}C)$$

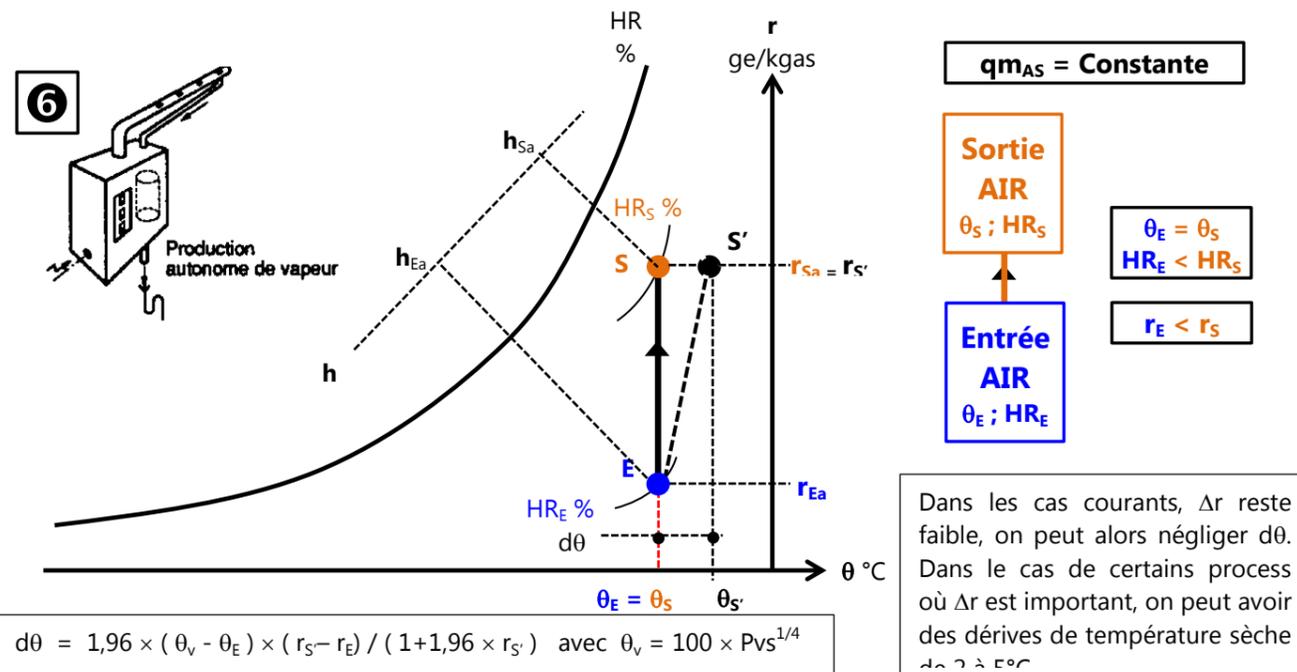
3) Puissance de régénération :

$$PREGEN = 2 \times L_v \times qm_{SECH} = 2 \times 2500 \times (16,07/3600) = 22,32 \text{ kW}$$

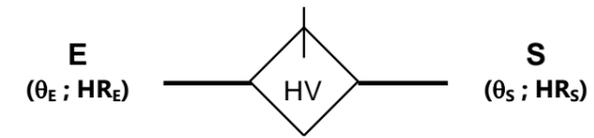
l'appareillage

6) Humidification Vapeur

Représentation : Diagramme Psychrométrique - Soit : un air **E** (θ_E ; HR_E) humidifié jusqu'à **S** (θ_S ; HR_S)



Représentation schématique



Principe

Un air soumis à une humidification par vaporisation est un air qui subit :

- En Théorie : Pas de modification de la température sèche : $\theta = Cte$ ($\theta_E = \theta_S$)
En réalité, l'air subit une très légère augmentation de température, mais, vu la petitesse de cette augmentation, on fait l'approximation que $\theta = Cte$ lors de l'humidification de l'air ;
- Une modification de la teneur en humidité : $r \nearrow$

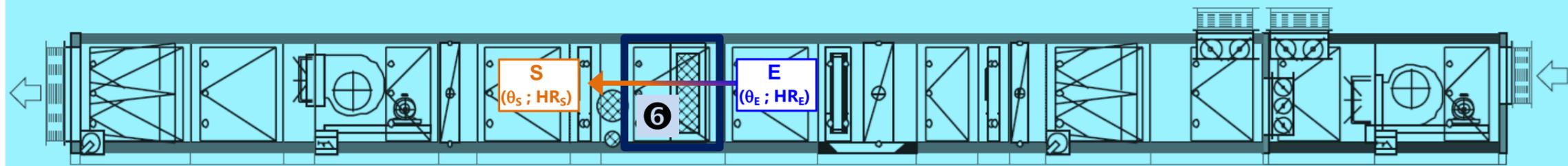
Technologie

Les appareils utilisés sont appelés « **Humidificateurs à vapeur HV** »

La vapeur d'eau est produite :

- par une résistance électrique plongée (thermoplongeur) dans une bache d'eau sous pression ou non alimentée automatiquement (robinet à flotteur)
- par une installation de vapeur centralisée (si elle existe)
- par un humidificateur autonome disposé généralement en sortie de CTA, dans le conduit d'air

Filtration – Soufflage – Déshumidification – Humidification – Refroidissement – Chauffage – Filtration – Caisson mélange – Extraction



Caractéristiques de l'humidificateur

1) **Débit massique de vapeur injectée qm_v en kg_{eau}/s**

$$qm_{humidif} = qm_v = qm_{AS} \times (r_{Sa} - r_{Ea})$$

2) **Puissance apportée à l'air lors de l'humidification en kW**

$$PHV_{air} = qm_{AS} \times (h_{Sa} - h_{Ea})$$

avec :

qm_{AS} = débit massique d'air sec kg_{as}/s

r_{Sa} = teneur en humidité de l'air à la sortie kg_{eau}/kg_{as}

r_{Ea} = teneur en humidité de l'air à l'entrée kg_{eau}/kg_{as}

avec :

qm_{AS} = débit massique d'air sec kg_{as}/s

h_{Ea} = enthalpie massique spécifique. de l'air entrant kJ/kg_{as}

h_{Sa} = enthalpie massique spécifique. de l'air sortant kJ/kg_{as}

3) **Puissance utile de la résistance électrique [kW]**

On appelle puissance utile de la résistance électrique, la puissance nécessaire pour faire passer l'eau de sa température initiale θ_{eau} à la température de vaporisation θ_v puis la vaporiser sous pression atmosphérique

$$P_{u\acute{e}lec} = qm_{eau} \times [c_{eau} \times (\theta_v - \theta_{eau}) + Lv]$$

avec :

qm_{eau} = débit massique d'eau = qm_v en kg/s

c_{eau} = capacité thermique massique de l'eau en $kJ/kg.K$

θ_v = température de vaporisation de l'eau en $^{\circ}C$

θ_{eau} = température initiale de l'eau en $^{\circ}C$

Lv = chaleur latente de vaporisation de l'eau en kJ/kg_{eau}

Applications

Déterminer les caractéristiques d'un humidificateur de CTA suivant les caractéristiques ci-après :

Air : **E** ($\theta_{Ea} = 30^{\circ}C$; $HR_{Ea} = 30\%$) et **S** ($HR_{Sa} = 60\%$) avec $qm_{AS} = 1,2 kg_{as}/s$

Eau : $\theta_{eau} = 12^{\circ}C$ $\theta_v = 100^{\circ}C$

	θ $^{\circ}C$	HR %	r g/kg_{as}	h kJ/kg_{as}	v m^3/kg_{as}
E	30	30	7,91	50,16	0,870
S	30	60	16,03	70,84	0,881

1) **Débit massique de vapeur injectée**

$$qm_v = 1,2 \times (16,03 - 7,91) \times 1E^{-3} = 3600 = 35,08 kg/h$$

2) **Puissance reçue par l'air lors de l'humidification**

$$PHV_{air} = 1,2 \times (70,84 - 50,16) = 24,82 kW$$

3) **Puissance électrique : $P_{u\acute{e}lec} = (35,08/3600) \times (4,18 \times (100 - 12) + 2500) = 27,95 kW$**

Ecart de température sur l'air lors de l'humidification :

$$d\theta = 1,96 \times (100 - 30) \times (16,03 - 7,91) \times 1E^{-3} / (1 + 1,96 \times 16,03 \times 1E^{-3}) = 1,08^{\circ}C$$

h_v = enthalpie massique de la vapeur *en kJ/kg_{eau}*

θ_{eau} à la température de vaporisation θ_v puis la vaporiser sous pression atmosphérique

$$\varepsilon_H = (r_{\text{Sa}} - r_{\text{Ea}}) / (r_{\text{H}} - r_{\text{Ea}}) = (\theta_{\text{Ea}} - \theta_{\text{Sa}}) / (\theta_{\text{Ea}} - \theta_{\text{H}})$$

avec :

r_{Sa} = Humidité absolue de l'air sortant en $\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{as}}$

r_{Ea} = Humidité absolue de l'air entrant en $\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{as}}$

r_{H} = Humidité absolue de l'air à saturation = r_{Ea} en $\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{as}}$

1) Débit massique d'humidification

$qm_H = 11,79 \text{ kg/h}$

2) Débit massique d'eau pulvérisée

$qm_0 = 0,5 \times 1,2 \times 3600 = 2160 \text{ kg}_{\text{eau}}/\text{h}$

Avec $P = 0,5$

3) Efficacité de l'atomiseur : $\varepsilon_H = 0,56$