

## V - Les opérations simples de traitement de l'air

### 1. Introduction au traitement d'air

Un traitement consiste à modifier les caractéristiques physiques de l'air, (enthalpie spécifique et teneur en humidité) par échange de chaleur et d'humidité.

D'autres traitements réduisent la teneur en particules, le niveau sonore, etc ..., de l'air traité.



Débit d'air sec :	.....	.....
Enthalpie spécifique :	.....	.....
Teneur en humidité :	.....	.....

#### 1.1. Débit massique d'air sec ( $q_{mas}$ )

Le débit massique d'air sec est la seule grandeur .....quelque soit le traitement étudié : chauffage, refroidissement, humidification.

#### 1.2. Débit d'eau reçu ou cédé par l'air ( $q_{m0}$ )

Le débit d'eau reçu ou cédé par l'air  $q_{m0}$  [kge/s] est défini par la relation suivante :

si  $r_2 > r_1$  :  $q_{m0} > 0$  : .....

si  $r_2 = r_1$  :  $q_{m0} = 0$  [kge/s] : .....

si  $r_2 < r_1$  :  $q_{m0} < 0$  : .....

### 1.3. Puissance reçue ou cédée par l'air ( $P_{\text{air}}$ )

De même, la puissance totale reçue ou cédée par l'air  $P_{\text{air}}$  [kW] est donnée par la relation suivante :

si  $h_2 > h_1$  :  $P_{\text{air}} > 0$  : .....

si  $h_2 = h_1$  :  $P = 0$  [kW] : .....

si  $h_2 < h_1$  :  $P < 0$  : .....

### 1.4. Rapport caractéristique ( $j$ )

La grandeur caractéristique globale du traitement d'air,  $j$ , est définie comme étant le rapport :

$$j = \frac{h_2 - h_1}{r_2 - r_1} = \frac{P_{\text{air}}}{qm_0} \quad [\text{kJ/kge}]$$

**Remarque :**

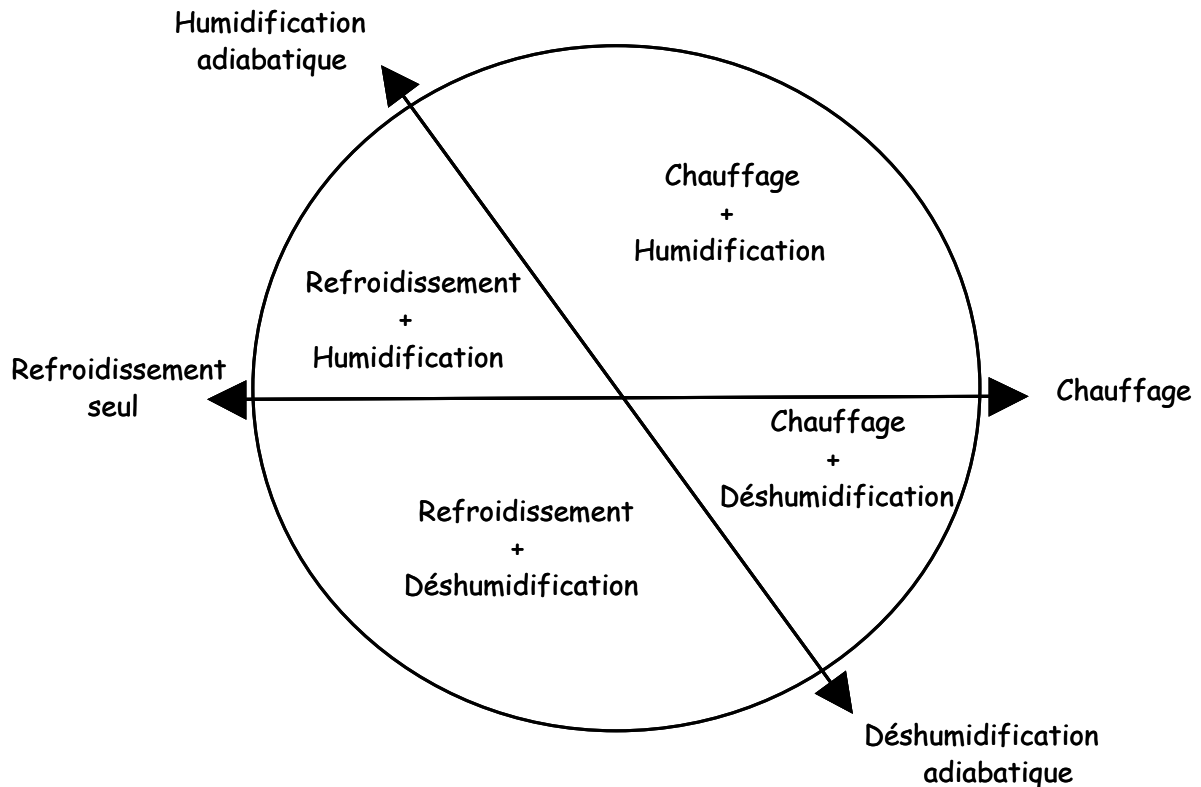
- Le rapport  $j$  est indépendant du débit massique d'air sec.
- Le rapport  $j$  peut être négatif ou positif.

Type de traitement	$P$ [kW]	$qm_0$ [kge/s]	$j$ [kJ/kge]
Chauffage	$> 0$	$0$	$+\infty$
Refroidissement seul	$< 0$	$0$	$-\infty$
Humidification adiabatique	$0$	$> 0$	$0$
Déshumidification adiabatique	$0$	$< 0$	$0$
Chauffage et humidification	$> 0$	$> 0$	$> 0$
Refroidissement et humidification	$< 0$	$> 0$	$< 0$
Chauffage et déshumidification	$> 0$	$< 0$	$< 0$
Refroidissement et déshumidification	$< 0$	$< 0$	$> 0$

Chaque traitement élémentaire, caractérisé par  $j$ , se représente sur le diagramme de l'air humide par un vecteur dont la direction est donnée par un angle d'évolution  $i$ .

## 1.5. Rose des vents

Il est possible de représenter graphiquement les différentes évolutions de l'air sous forme d'une « rose des vents ».



## 2. Chauffage de l'air

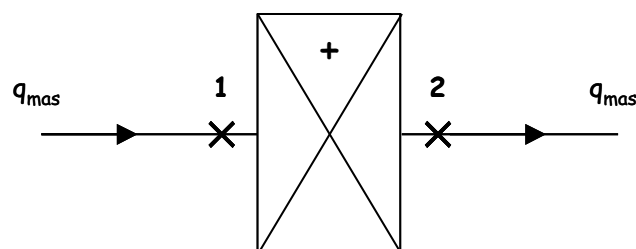
### 2.1. Principe

Le chauffage de l'air est un des traitements fondamentaux en climatisation. Il consiste uniquement à apporter une puissance  $P$  à l'air, ce qui augmente son enthalpie sans modifier son humidité absolue.

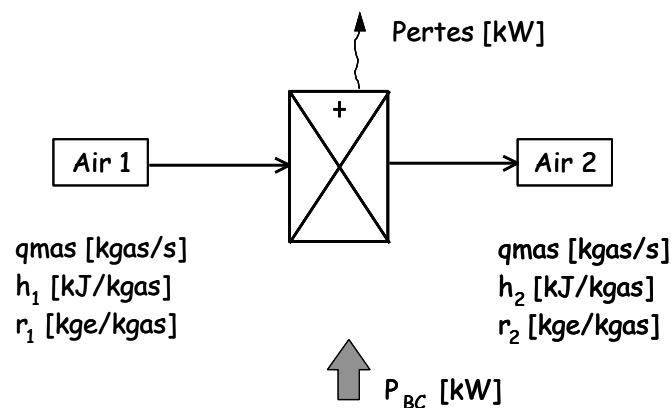
La fonction chauffage est assurée par un échangeur thermique appelé .....

.....  
L'énergie thermique est fournie par un fluide primaire (eau chaude, vapeur, fluides frigorigènes...), ou bien par l'électricité (Effet Joule).

Le symbole générique de la fonction chauffage est représenté de la façon suivante :



## 2.2. Bilans



### Bilan en humidité

En conséquence :

### Bilan enthalpique

La batterie chaude reçoit la puissance  $P_{BC}$  et elle occasionne des pertes thermiques. Les pertes représentent la puissance perdue vers l'ambiance par convection et rayonnement.

En régime établi, la somme des puissances entrantes est égale à la somme des puissances sortantes de la batterie chaude.

On peut donc écrire :

.....  
 .....  
 .....

Le rendement  $\eta$  de la batterie est défini par l'expression :

### Remarque

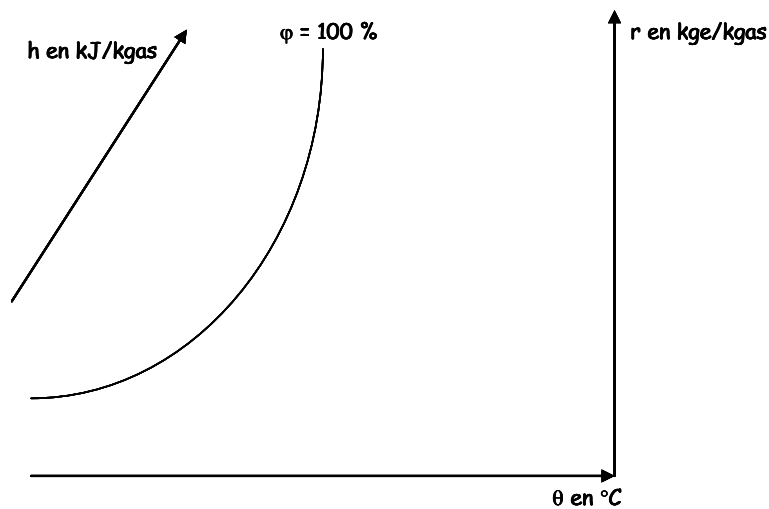
Les pertes représentent une puissance perdue vers l'ambiance. Elles sont généralement très réduites, compte tenu de la faible surface extérieure de la batterie et d'une possible isolation de celle-ci.

En pratique, le rendement d'une batterie est très proche de 100 % et on considère souvent que :

et donc :

.....

## 2.3. Evolution sur le diagramme de l'air humide



Il y a augmentation de température par apport de chaleur sensible uniquement (il n'y a ni condensation, ni évaporation d'humidité :  $r = \text{Cste}$ ).

La quantité de chaleur gagnée par l'air correspond à l'augmentation d'enthalpie de l'air :

.....

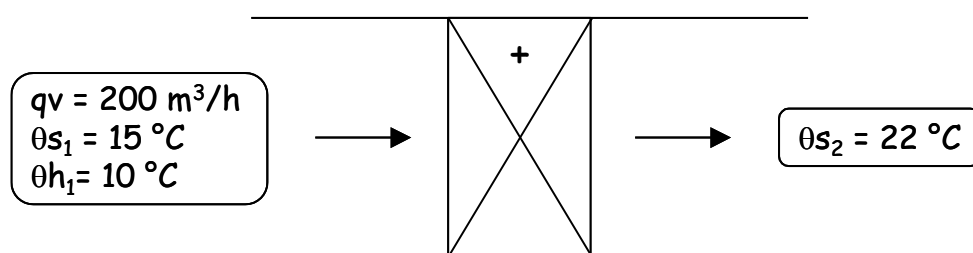
Le rapport caractéristique :  $j = \frac{P}{qm_0} = \frac{h_2 - h_1}{0} = +\infty$

On constate que l'augmentation de l'enthalpie ( $h_2 > h_1$ ) et la conservation de la teneur en eau ( $r_2 = r_1$ ) ont pour conséquences :

- température .....
- humidité relative .....
- volume spécifique .....

## 2.4. Exercices

### Exercice 1



1. Donner les caractéristiques de l'air après passage sur la batterie chaude.
2. Déterminer la puissance de la batterie.
3. Comparer les débits volumiques avant et après la batterie.

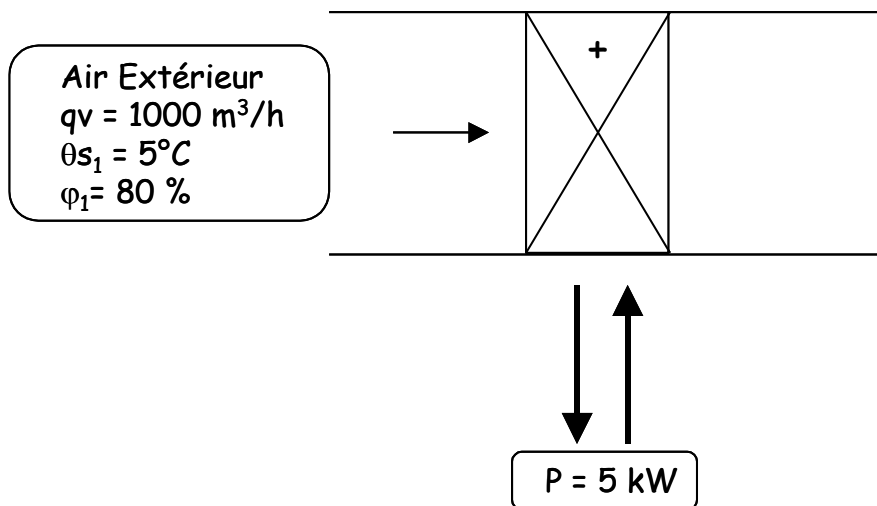
Réponse :

Remarque : .....

.....

.....

## Exercice 2



Quelle est la température de l'air après la batterie de préchauffage ?

Réponse :

### 3. Refroidissement sans déshumidification

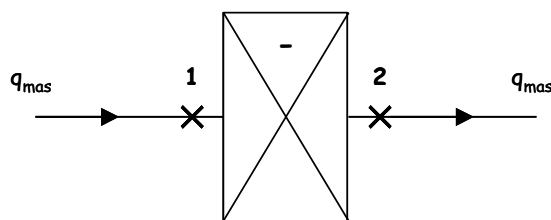
#### 3.1. Principe

C'est le cas d'une batterie .....

La fonction refroidissement seul est obtenue .....

La batterie n'échange avec l'air que de la chaleur sensible.

Le symbole de la fonction refroidissement est représenté de la façon suivante :



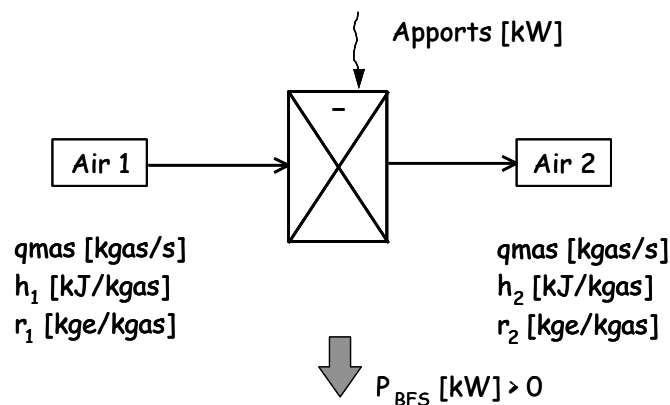
Le refroidissement se fait par passage de l'air sur une batterie froide qui peut être :

- un échangeur alimenté par de l'eau glacée (glycolée ou non),
- un échangeur alimenté par du fluide frigorigène (.....).

Cette fonction est utilisée principalement en :

- traitement d'air terminal,
- refroidissement après déshumidification chimique,
- récupération.

#### 3.2. Bilans



Remarque :

$P_{BFS}$  calculée correspond à la puissance reçue par le fluide extérieur .....  
(Côté air cette puissance est perdue : .....).

**Bilan en humidité**

.....  
 En conséquence : .....

**Bilan enthalpique**

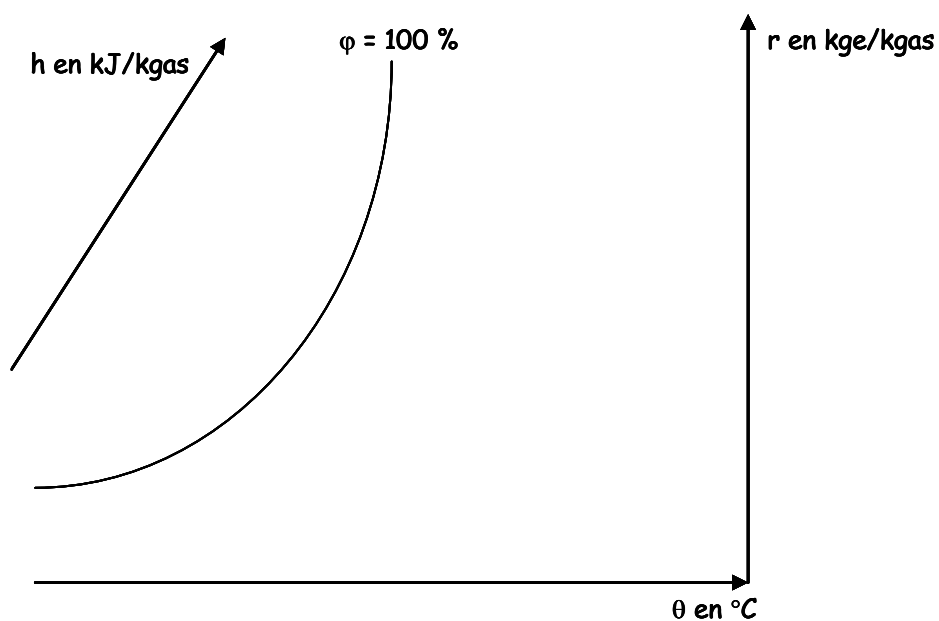
L'air se refroidit, donc perd de la chaleur : .....

.....  
 .....  
 .....

En pratique, les apports sont faibles aussi sont-ils négligés. On obtient donc :

 .....

→ Remarque : puissance (perdue) de la batterie positive (La batterie froide cède de l'énergie au fluide secondaire).

**3.3. Evolution sur le diagramme de l'air humide**



La quantité de chaleur cédée par l'air correspond à la diminution d'enthalpie de l'air :

$$\Delta h = h_2 - h_1 \dots\dots\dots$$

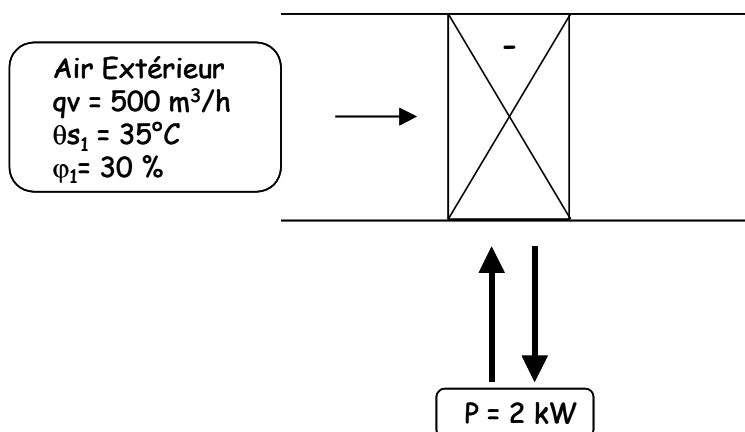
La puissance perdue par l'air est .....

Le rapport caractéristique :  $j = \frac{P_{\text{air}}}{qm_0} = \frac{h_2 - h_1}{0} = -\infty$

On constate que la diminution de l'enthalpie ( $h_2 < h_1$ ) et la conservation de la teneur en eau ( $r_2 = r_1$ ) ont pour conséquences :

- température .....
- humidité relative .....
- volume spécifique .....

### 3.4. Exercice



Déterminer les caractéristiques de l'air après passage sur la batterie froide sèche.

Réponse :


## 4. Humidification par injection de vapeur

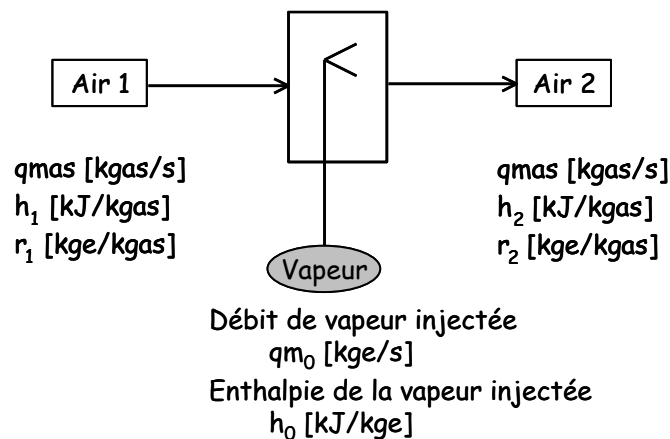
### 4.1. Principe

C'est le procédé le plus simple et le plus souple. Il suffit de mélanger deux fluides à l'état gazeux. La vapeur présente l'avantage de ne pas comporter de germes pathogènes.

L'humidification est réalisée .....

.....  
 Dans ces conditions, l'évolution de l'air se fait (pratiquement) à température constante (la chaleur sensible apportée est largement négligeable devant la chaleur latente).

### 4.2. Bilans



#### Bilan en humidité

d'où

#### Bilan enthalpique

L'air ne reçoit qu'une quantité de chaleur apportée par le débit de vapeur  $q_{m0}$ .

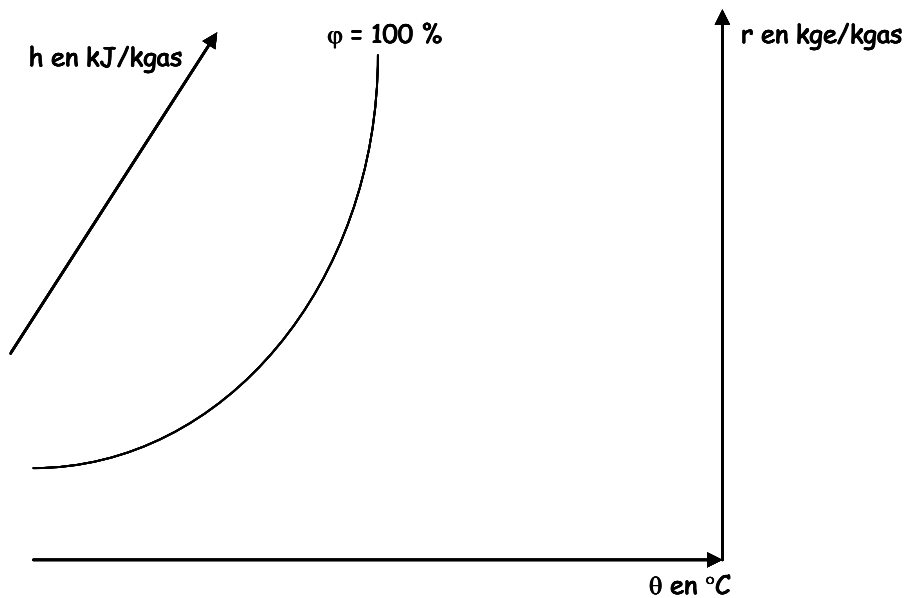
.....

en [kW]

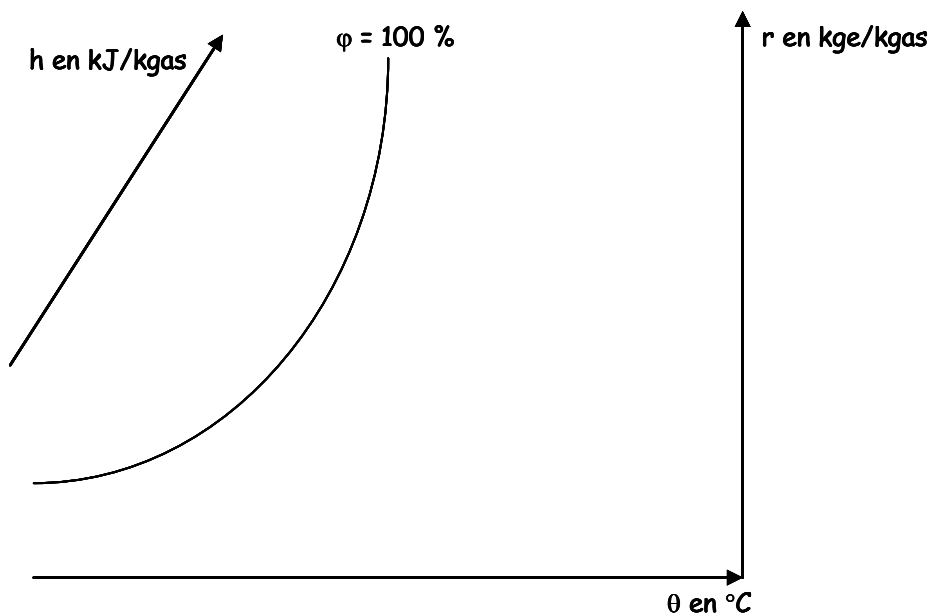
### 4.3. Evolution sur le diagramme de l'air humide

Rapport caractéristique  $j = \frac{P_{air}}{q_{m_0}} = \frac{q_{m_0} \cdot h_0}{q_{m_0}} = h_0$  [kJ/kg<sub>e</sub>]

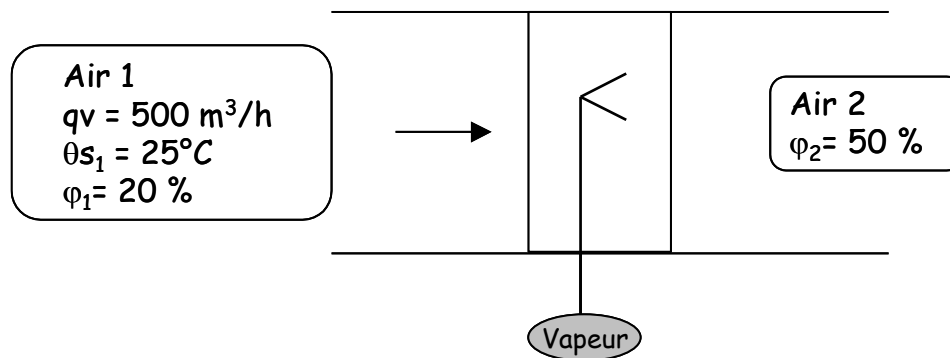
La vapeur est injectée à 100°C et à la pression atmosphérique, donc  $j = h_0 = 2676$  kJ/kg<sub>e</sub> (d'après les tables de la vapeur). L'angle d'évolution correspondant  $i \approx 96^\circ$ .



On constate que l'augmentation d'humidité de l'air provoque .....  
 ..... En pratique cet échauffement peut être négligé.



#### 4.4. Exercice



Déterminer le débit de vapeur à injecter.

Réponse :

### 5. Déshumidification par refroidissement

#### 5.1. Principe

La déshumidification consiste à diminuer la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air ou plus précisément à abaisser la teneur en humidité  $r$ .

**Le principe consiste** .....

La chaleur cédée par le fluide se décompose :

- chaleur sensible (diminution de la température)
- chaleur latente (diminution de l'humidité)

Le refroidissement se fait généralement par passage de l'air sur une " .....

" qui peut être comme pour une batterie froide sèche :

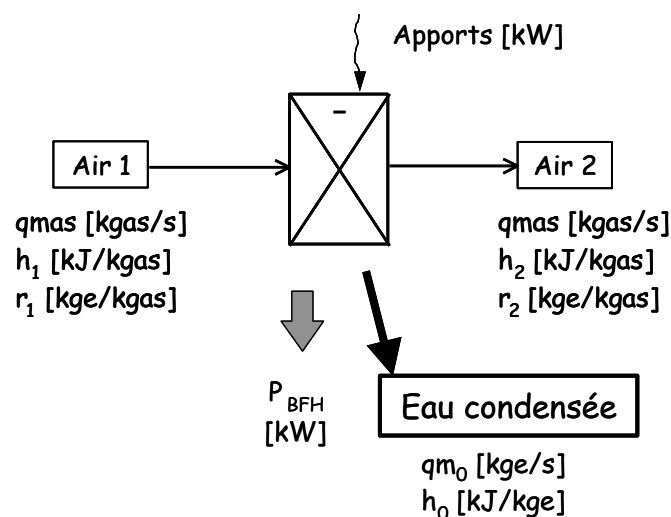
- un échangeur alimenté par de l'eau glacée (glycolée ou non),
- un échangeur alimenté par du fluide frigorigène (appelée batterie à détente directe).

Remarque :

Il existe d'autres appareils permettant de réaliser le traitement de déshumidification de l'air qui sont les sècheurs, mais dont l'emploi est souvent spécifique (moins généralisé que les batteries froides). Il en existe plusieurs types :

- **Par absorbant liquide** (solution à 40% de chlorure de Lithium par exemple pulvérisée sur l'air puis régénérée).
- **Par adsorbant solide** (utilisation de matériaux hygroscopiques - très poreux - régénérés par chauffage).

NB : dans les sècheurs, l'air n'est pas refroidi.

**5.2. Bilans**Remarque :

$P_{BFH}$  et Débit d'eau condensée sont comptés ..... pour le côté extérieur.  
(Côté air ils sont perdus : .....).

**Bilan en humidité**

.....  
d'où  > 0 Débit d'eau condensée.

On obtient .....

**Bilan enthalpique**

**Remarque :** Les apports sont toujours très faibles, ils peuvent donc être négligés.

$$qm_0 = q_{mas} \cdot (r_1 - r_2)$$

$$P_{BFH} = q_{mas} \cdot (h_1 - h_2) - q_{mas} \cdot (r_1 - r_2) \cdot h_0$$

**Remarque :** Pour de l'eau condensée à 10°C →  $h_0 = 4,185 \times 10 = 41,85 \text{ kJ/kg}$   
 $(r_1 - r_2)$  est en général inférieur à 0,01 kge/kgas, donc le second terme peut être négligé devant le premier.

On retiendra donc :

> 0 reçue par l'extérieur.

### 5.3. Evolution sur le diagramme de l'air humide

Rapport caractéristique  $j = \frac{P_{air}}{qm_{0air}} = \frac{h_2 - h_1}{r_2 - r_1} \text{ [kJ/kg]}$

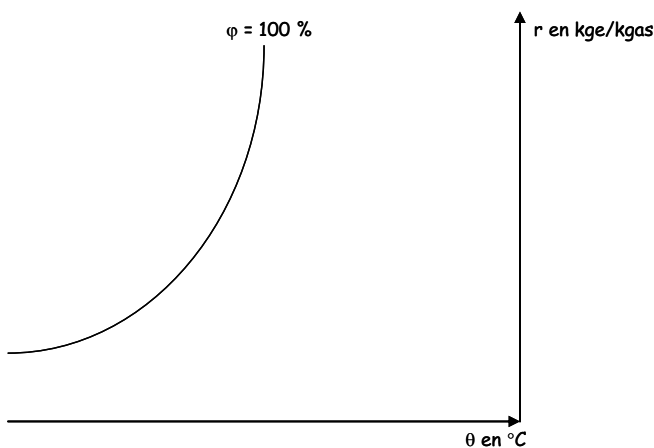
$j$  est fonction du fluide de refroidissement et de la température d'entrée de l'air.

**Point de fin de processus théorique** ( $\theta_{FPT}$ ) ou ( $\theta_{ms}$ )

.....

.....

.....



La température de fin de processus théorique est égale à :

-  $\theta_{FPT}$  : .....  
 pour une batterie à détente directe

-  pour une batterie à eau glacée

Cette température permet de connaître le point de fin de processus théorique (FPT) qui est indispensable pour le tracé de cette évolution dans le diagramme de l'AH.

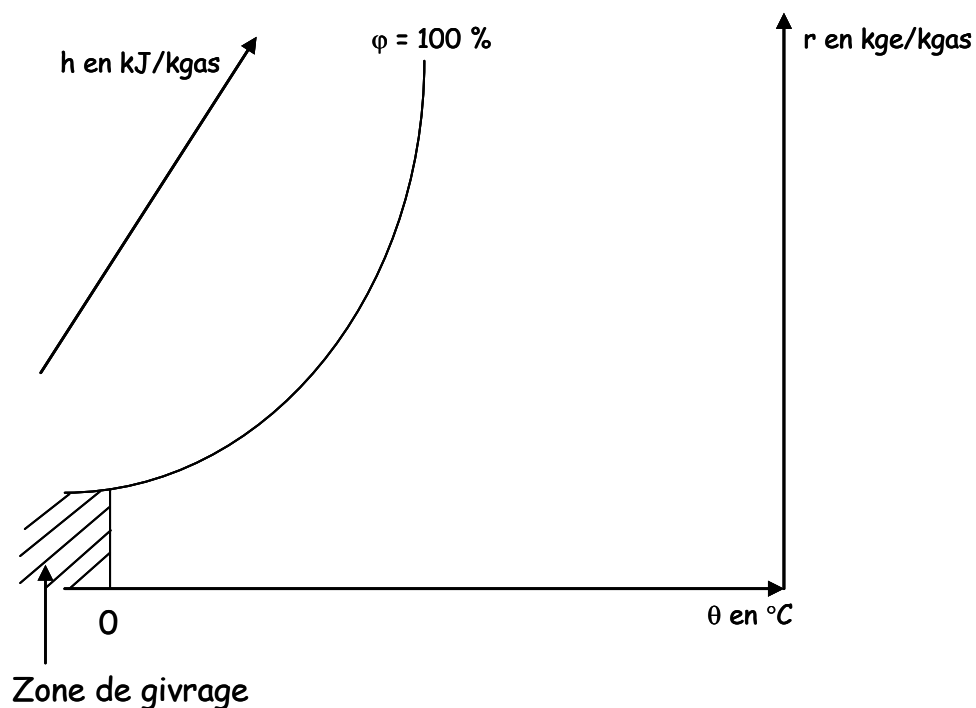
**Modélisation du processus de refroidissement :**

Une partie de l'air dans la batterie en contact avec la surface d'échange va se retrouver à la température  $\theta_{FPT}$ . Une autre partie va la traverser sans être affectée par le traitement. A la sortie de la batterie, ces deux airs vont se mélanger.



.....

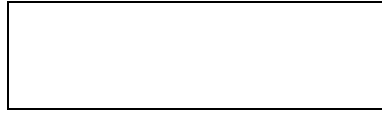
.....



**Efficacité  $\varepsilon$  :**

On définit l'efficacité de la batterie  $\varepsilon$  comme la proportion du mélange :

sur le diagramme,



L'efficacité représente l'énergie réellement échangée par rapport à l'énergie maximale idéale (si  $\theta_2 = \theta_{FPT} = \theta_{ms}$ ) :



Par projection sur les axes  $h$  et  $r$ , l'efficacité de la batterie froide :

$$\varepsilon = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{FPT}} \quad \text{ou} \quad \varepsilon = \frac{r_1 - r_2}{r_1 - r_{FPT}}$$

**Remarque :**

On cherche à éviter le colmatage par givrage de la batterie (dans le cas contraire, on met en place un système de dégivrage) donc la température du fin de processus doit être supérieure à  $0^\circ\text{C}$ , ce qui fixe une limite pratique à la déshumidification de l'ordre de 4 à 5 [g/kgas] (Une température de fin de processus à  $0^\circ\text{C}$  correspond à un teneur en eau de 3,8 g/kgas).

Aussi, pour obtenir une déshumidification suffisante, on cherche des batteries dont l'efficacité de l'ordre de  $\varepsilon = 80 \%$ , grâce à:

- Une surface d'échange importante
- Une grande épaisseur de batterie (plusieurs rangs)
- Un pas d'ailette faible ( $< 3 \text{ mm}$ ) et une bonne irrigation de la batterie (nombre de circuits élevés).
- Une circulation des fluides à contre-courant.

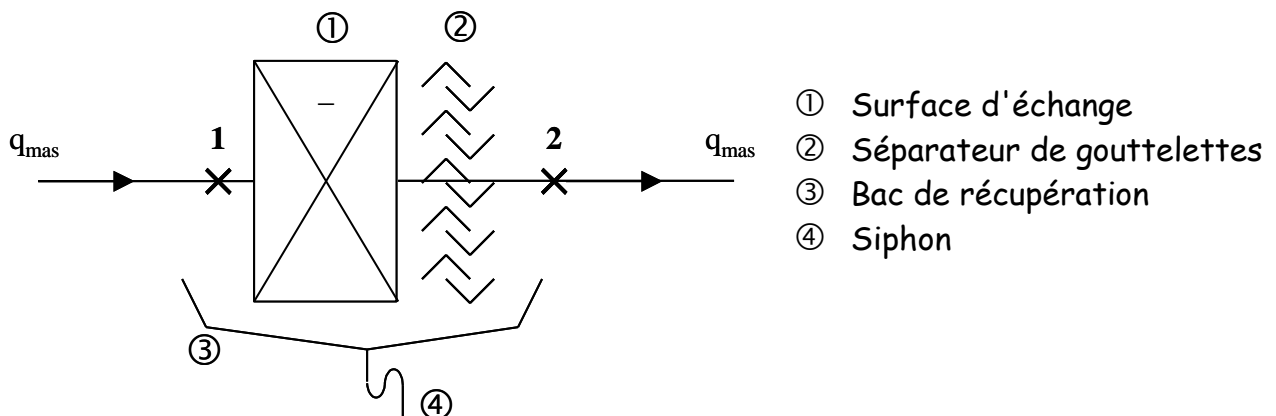
Remarque : Le point  $M_{surf}$  est également nommé ADP (point de rosée apparent).

**5.4. Technologie**

Lorsque l'air a une vitesse supérieure à 3 m/s il est indispensable de prévoir un séparateur de gouttelettes.

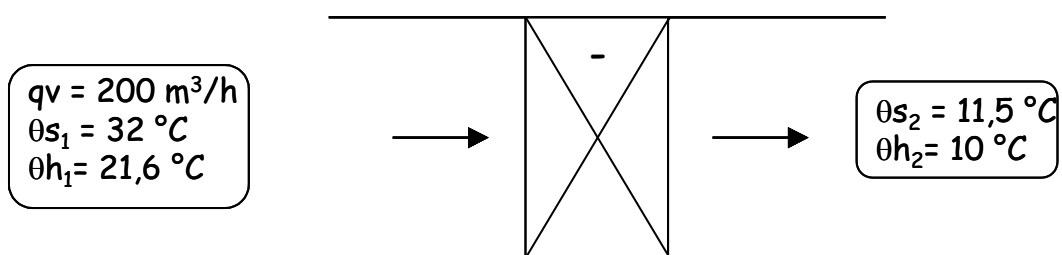


L'eau condensée est collectée dans un bac puis évacuée au travers d'un siphon, dont la garde d'eau évite l'introduction d'air "extérieur" dans la batterie, ce qui empêcherait l'évacuation des condensats.



Lorsqu'un séchage de l'air est nécessaire en-dessous de 5 g/kgas, il faut prévoir un dégivrage (résistance électrique, air chaud, FF chaud par inversion de cycle).

### 5.5. Exercice



Déterminer la puissance, l'efficacité de la batterie froide et le débit d'eau condensée.

Réponse :

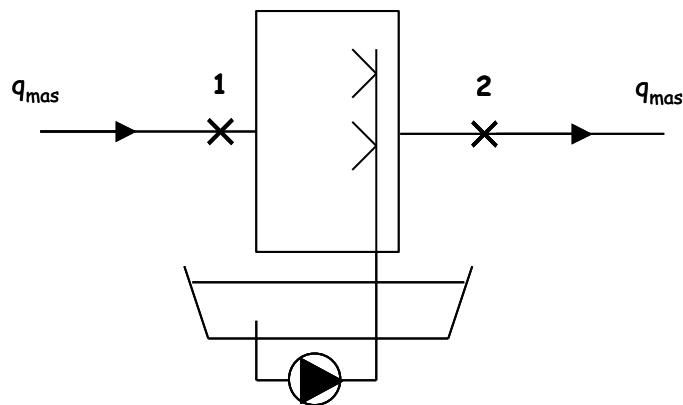
## 6. Humidification par évaporation d'eau

### 6.1. Principe

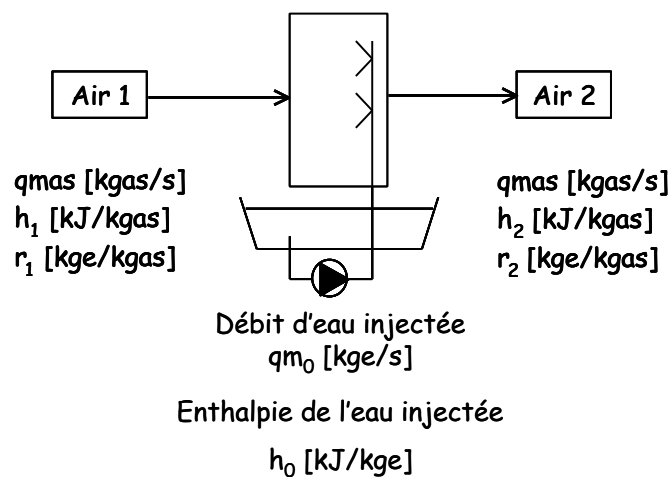
On pulvérise de ..... dans l'air à humidifier. ....

La chaleur sensible que l'air perd en se refroidissant est compensée par la chaleur latente qu'il gagne en s'humidifiant, si bien que la quantité de chaleur totale contenue dans l'air ne varie pas → .....

Pour cette raison, ils sont souvent appelés *humidificateurs adiabatiques* .....



### 6.2. Bilans



#### Bilan en humidité

d'où

Débit d'eau évaporée.

## Bilan enthalpique

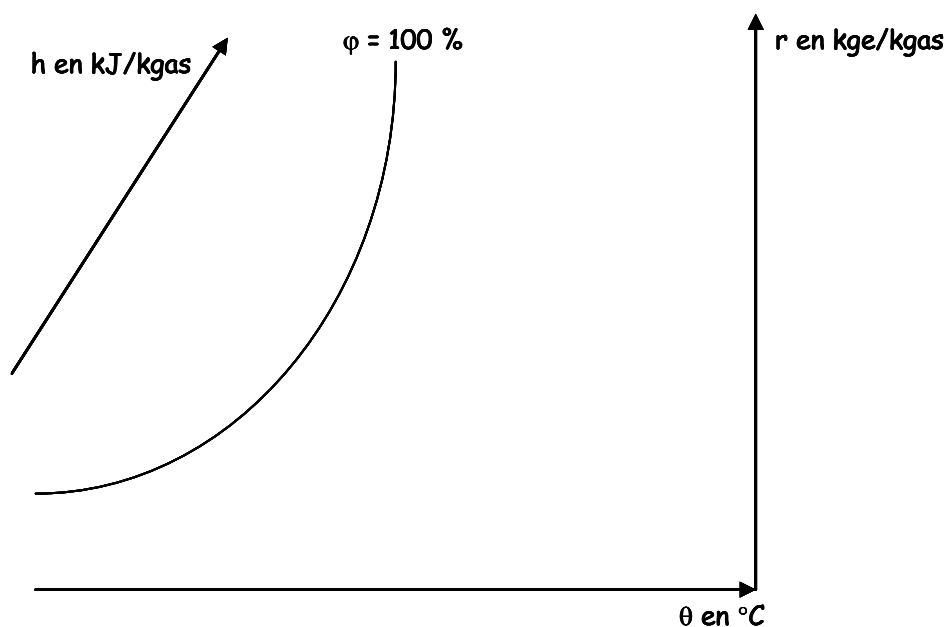
.....

avec  $P$  : puissance apportée par l'eau.

$q_{m0}$  : Débit d'eau évaporée

$h_0$  : Enthalpie de l'eau à la température de l'eau ( $\theta_0$ )

## 6.3. Evolution sur le diagramme de l'air humide



Le rapport caractéristique :  $j = \frac{P}{q_{m0}} = h_0$

En pratique  $10 < \theta_0 < 20^{\circ}\text{C}$  donc  $42 < j < 84$  [kJ/kg]

Le rapport étant proche de 0, l'évolution de l'air donne approximativement une

.....\*

L'efficacité de l'humidificateur est définie comme étant le rapport suivant :

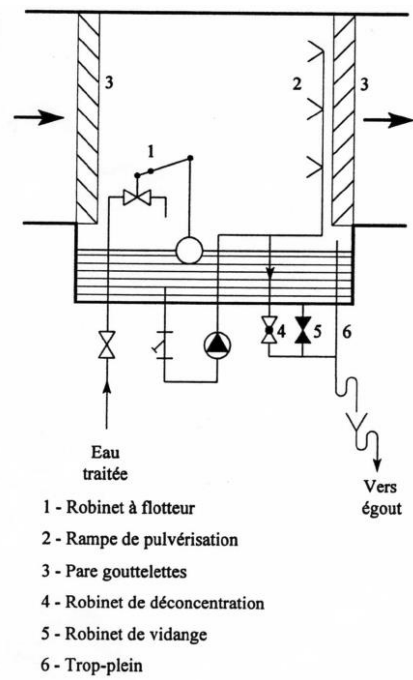
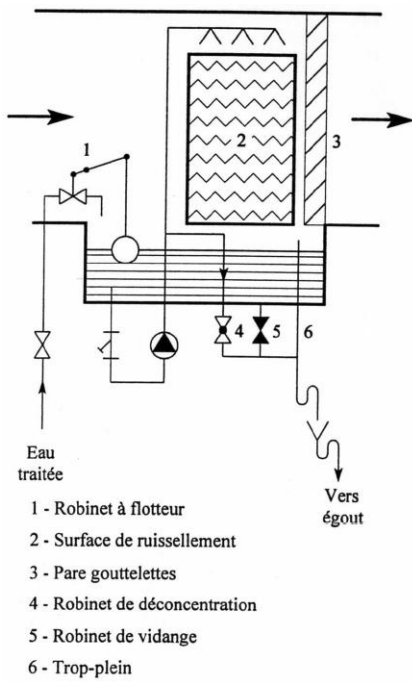
FPT : Fin de Processus Théorique

Le degré de pulvérisation est défini ainsi comme étant le rapport du débit d'eau pulvérisé ( $q_{m0}$ ) au débit d'air sec :

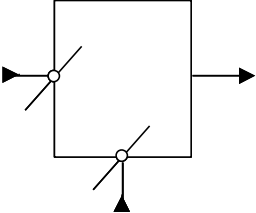
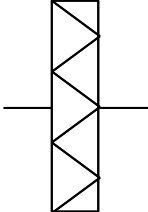
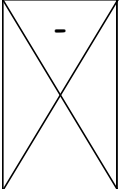
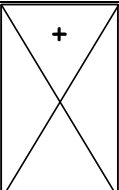
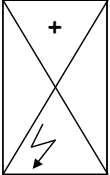
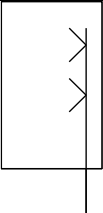
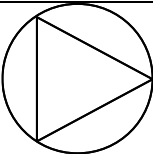
[kge/kgas]

## 6.4. Technologie

Laveurs à ruissellement, laveurs à pulvérisation.



## 7. Composition d'une CTA

Eléments	Symbole	Fonction
Caisson de mélange		Mélanger l'air neuf (AN) et l'air recyclé (AR), les proportions étant fixées par les registres d'air eux-mêmes actionnés par un servomoteur commandé par le régulateur)  Les caractéristiques de l'air obtenu en sortie du caisson dépendent des caractéristiques des airs neuf et repris
Filtre		Retenir les particules en suspension dans l'air.  Il ne modifie pas les caractéristiques thermodynamiques de l'air.
Batterie froide		Refroidir et/ou déshumidifier l'air. La batterie froide agit sur la température de l'air et sur l'humidité spécifique (généralement).  La régulation se fait généralement par vanne 3 voie (en fonction du débit)
Batterie chaude		Réchauffer l'air. Seule la température de l'air est modifiée.  La régulation se fait généralement par vanne 3 voie (en fonction du débit)
Batterie électrique		Réchauffer l'air.  La régulation se fait généralement en cascade avec éventuellement variation de puissance sur le dernier étage de puissance.
Humidificateur		Augmenter la quantité d'eau (vapeur) contenue dans l'air (à traiter). Suivant le type de technologie (à vapeur ou adiabatique), la température reste quasiment constante ou diminue. Dans tous les cas l'humidité spécifique augmente.
Ventilateur		Distribuer l'air dans les réseaux. Ne modifie quasiment pas les caractéristiques de l'air soufflé (léger échauffement ...)

