

Compétences écoles / domaine Physique du bâtiment

Climatisation	
P1	Concevoir et dimensionner les solutions techniques pour la qualité thermique et aéraulique d'un bâtiment
P2	Evaluer l'état de santé, les performances thermiques ou acoustiques d'un bâtiment ou équipement, définir les actions nécessaires

UE : GCU-42-PhB

EC : GCU-42-CLI

<i>Connaissances</i>	<i>Capacités</i>
1. grandeurs caractéristiques de l'air humide (P1, P2) 2. diagramme de l'air humide (P1, P2) 3. transformations simples en conditionnement d'air (P1, P2) 4. typologie des systèmes (P1, P2) 5. centrale de conditionnement d'air et régulations associées (P1, P2)	Voir l'EC : GCU-42-Conception

Climatisation**Systèmes clim.****Air humide****Climatisation****Confort**

Conditionnement d'air

Systèmes de climatisation**Propriétés et diagramme de l'air humide****Transformations de l'air humide****Analyse des systèmes de climatisation****Confort thermique**christian.ghiaus@insa-lyon.fr

Systèmes de climatisation

Climatisation

Systèmes clim.

Définitions

Composition

Classification

Avantages

Désavantages

Alternatives

Air humide

Climatisation

Confort

- **Définitions**

- Les **systèmes de climatisation** réalisent le conditionnement de l'air pour maintenir :
 - le *confort thermique*
 - la *qualité de l'air*dans les *zones* d'un local.
- **zone** désigne des volumes d'air dans le local pour lesquelles les charges et/ou les conditions de confort sont différentes.

Systemes de climatisation

Climatisation

Systèmes clim.

Définitions

Composition

Classification

Avantages

Désavantages

Alternatives

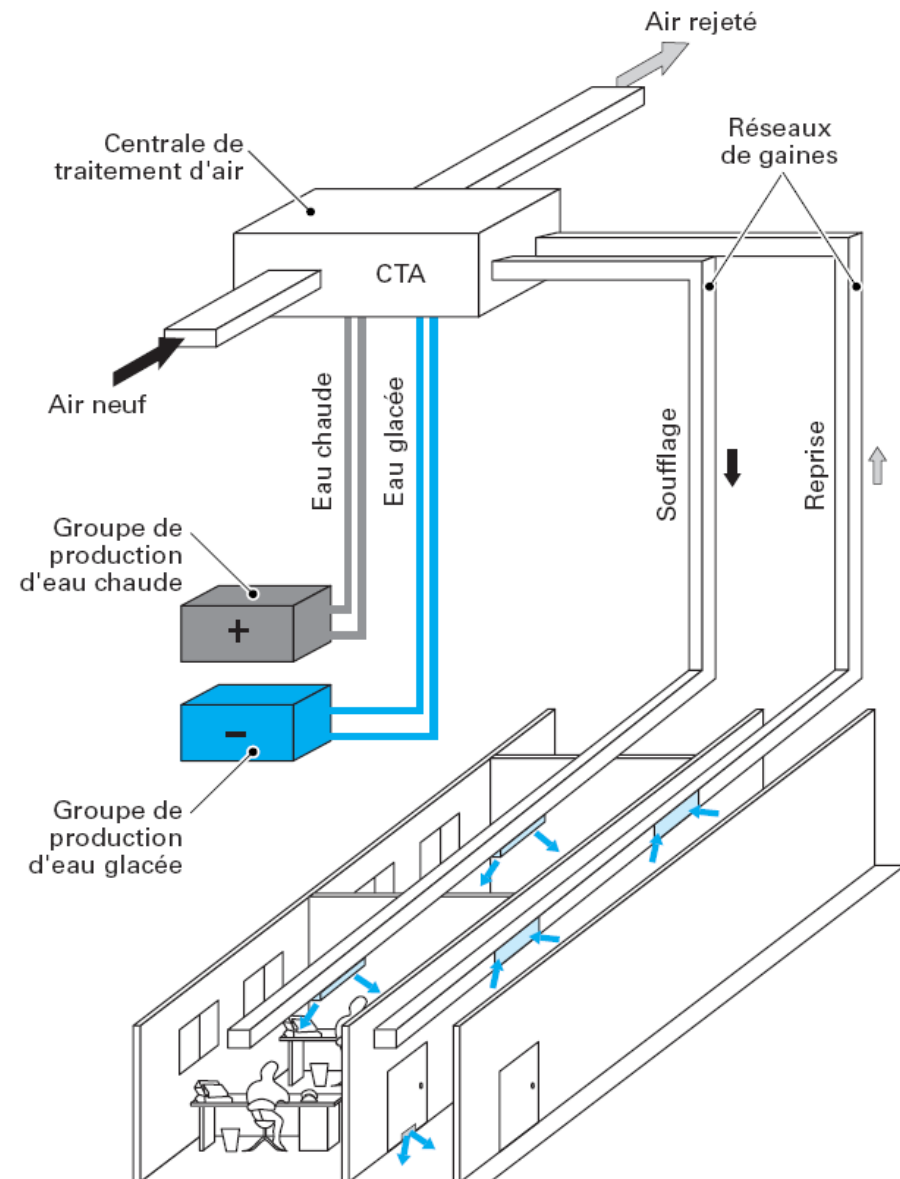
Air humide

Climatisation

Confort

• Composition

- Sources
 - chaud
 - froid
 - eau
- CTA
 - chauffe
 - refroidit
 - humidifie
 - déshumidifie
 - purifie
 - récupère
- Réseau distribution
- Diffuseurs



Systèmes de climatisation

Climatisation

Systèmes clim.

Définitions

Composition

Classification

Avantages

Désavantages

Alternatives

Air humide

Climatisation

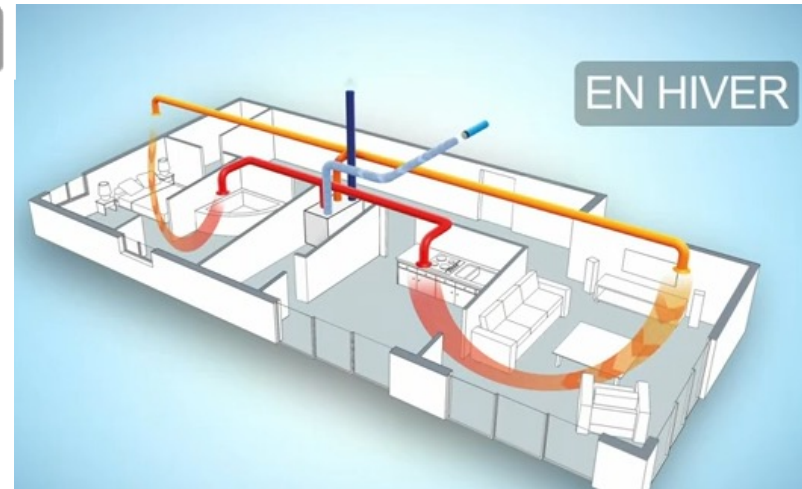
Confort

• Composition

- Sources
 - chaud
 - froid
- CTA
 - chauffe
 - refroidi
 - humidifie
 - déshumidifie
 - purifie
 - récupère
- Réseau distribution
- Diffuseurs



<https://www.youtube.com/watch?v=zlyOQ9tw0xE>



<https://www.youtube.com/watch?v=KapIQZiPaHU>

Systèmes de climatisation

Climatisation

Systèmes clim.

Définitions

Composition

Classification

Avantages

Désavantages

Alternatives

Air humide

Climatisation

Confort

- **Éléments d'une CTA**

<https://formation.xpair.com/cours/constitution-centrales.htm>



Une grille de prise d'air neuf extérieure.



La centrale d'air peut être raccordée à une grille de rejet d'air extrait.



Systèmes de climatisation

Climatisation

Systèmes clim.

Définitions

Composition

Classification

Avantages

Désavantages

Alternatives

Air humide

Climatisation

Confort

• Éléments d'une CTA

<https://formation.xpair.com/cours/constitution-centrales.htm>

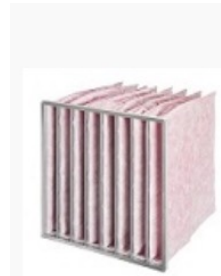
Une ou plusieurs sections de filtration.



Symbole
général du
filtre



Filtre plan
plissé

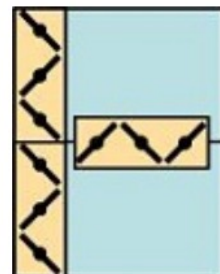


Filtre à poche

Un registre d'entrée d'air neuf



Un ensemble de 2 ou 3 registres permettant le réglage des débits d'air neuf, d'air recyclé, d'air rejeté, le tout constitue le caisson de mélange.



Systèmes de climatisation

Climatisation

Systèmes clim.

Définitions

Composition

Classification

Avantages

Désavantages

Alternatives

Air humide

Climatisation

Confort

• Éléments d'une CTA

<https://formation.xpair.com/cours/constitution-centrales.htm>

Une ou plusieurs batteries de chauffage à eau chaude, à vapeur ou électriques.



Une batterie froide soit :

- à eau glacée
- à détente directe (la batterie est dans ce cas directement alimentée par le fluide frigorigène).



Une pare-gouttelette parfois constitué d'un simple grillage qui évite l'entraînement de l'eau de condensation sur la batterie froide.



Systèmes de climatisation

Climatisation

Systèmes clim.

Définitions

Composition

Classification

Avantages

Désavantages

Alternatives

Air humide

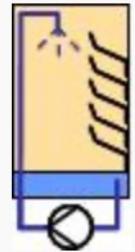
Climatisation

Confort

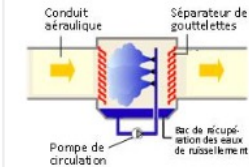
• Éléments d'une CTA

<https://formation.xpair.com/cours/constitution-centrales.htm>

Un humidificateur à ruissellement à eau recyclée.



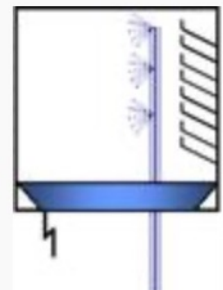
Un humidificateur à pulvérisation à eau recyclée.



Source énergie+



Un humidificateur à pulvérisation à débit variable (brumisateurs).



Systèmes de climatisation

Climatisation

Systèmes clim.

Définitions

Composition

Classification

Avantages

Désavantages

Alternatives

Air humide

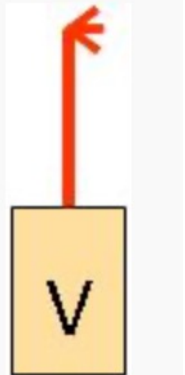
Climatisation

Confort

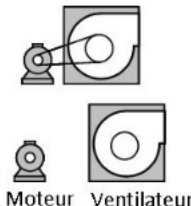
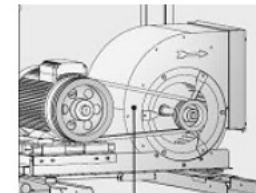
- **Éléments d'une CTA**

<https://formation.xpair.com/cours/constitution-centrales.htm>

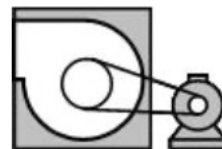
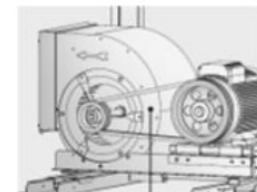
Un humidificateur à vapeur.



Un groupe moto ventilateur à entraînement direct (raccordement direct par l'arbre de transmission) ou par un jeu de poulies-courroie.



Le caisson de reprise (ou d'extraction) de la centrale d'air comporte un groupe moto ventilateur de reprise.



Systemes de climatisation

Climatisation

Systèmes clim.

Définitions

Composition

Classification

Avantages

Désavantages

Alternatives

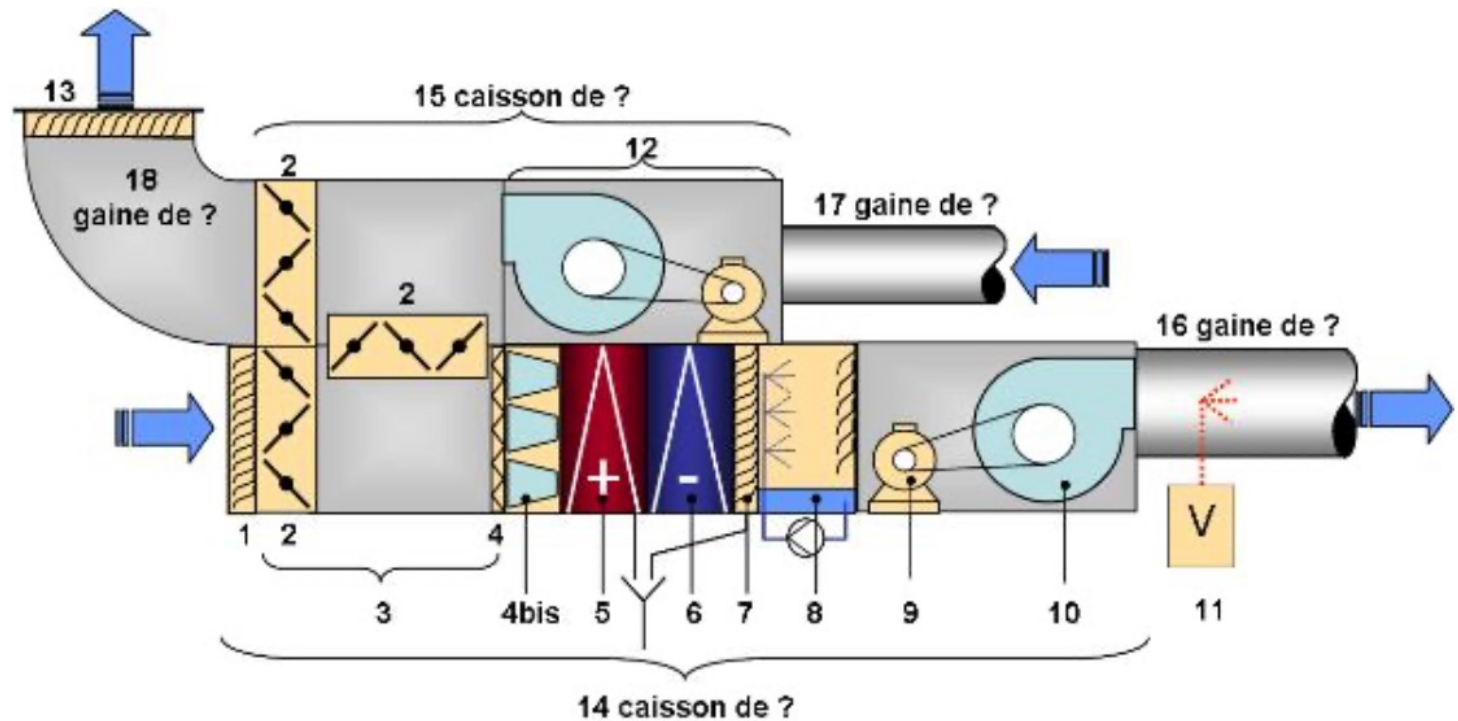
Air humide

Climatisation

Confort

• Eléments d'une CTA

<https://formation.xpair.com/cours/constitution-centrales.htm>



Climatisation

Systemes clim.

Définitions

Composition

Classification

Avantages

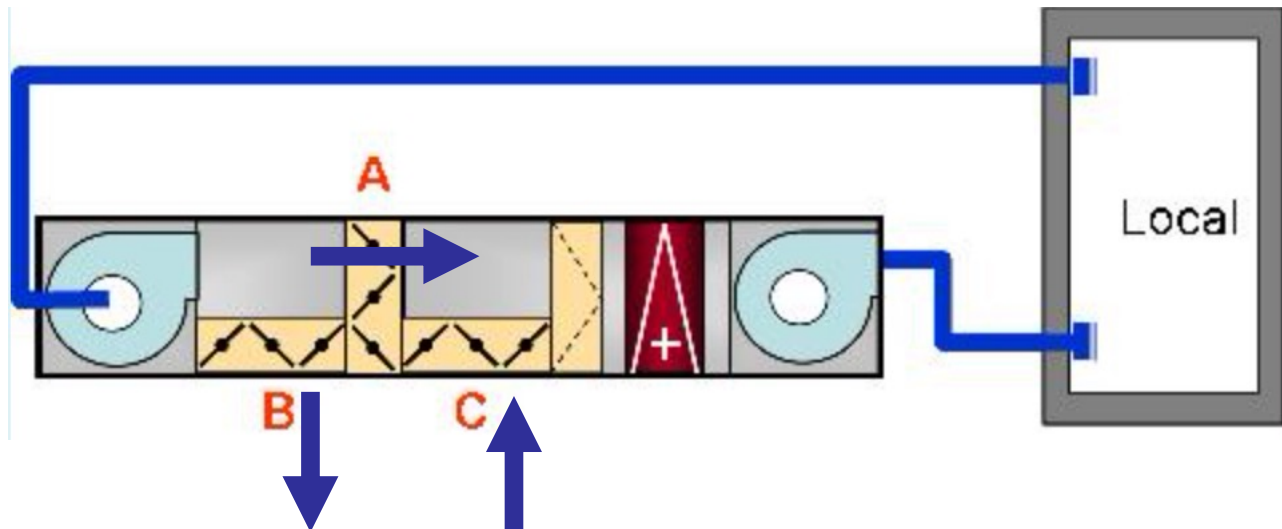
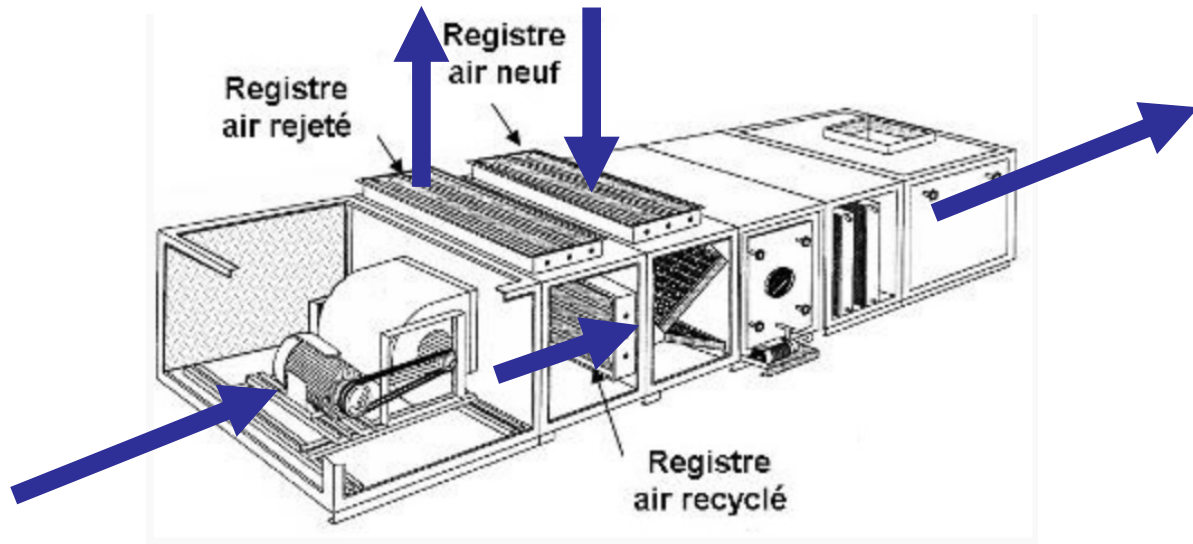
Désavantages

Alternatives

Air humide

Climatisation

Confort



Systemes de climatisation

Climatisation

Systemes clim.

Définitions

Composition

Classification

Avantages

Désavantages

Alternatives

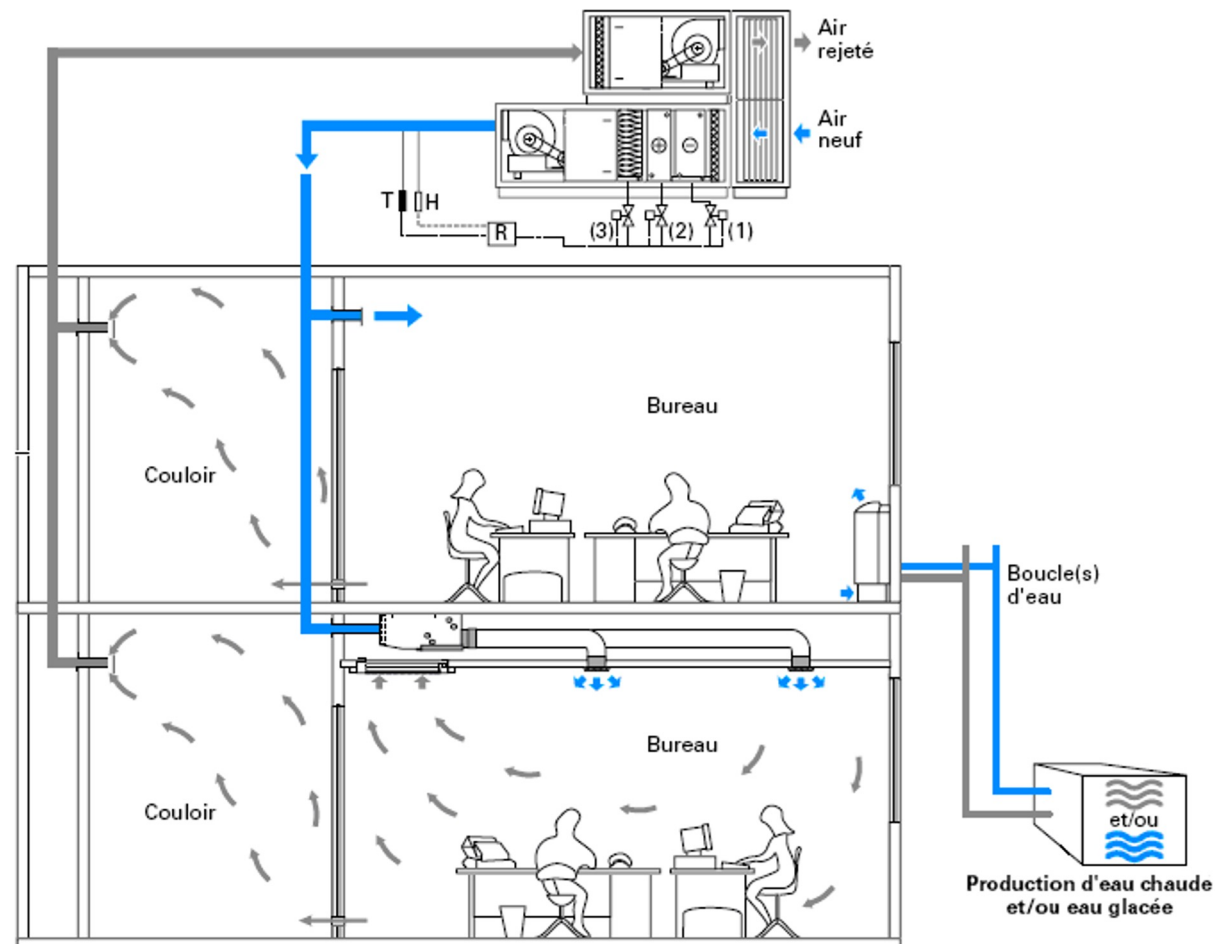
Air humide

Climatisation

Confort

- **Source de chaud et de froid**

- centralisée
- décentralisée
- mixte



Systèmes de climatisation

Climatisation

Systèmes clim.

Définitions

Composition

Classification

Avantages

Désavantages

Alternatives

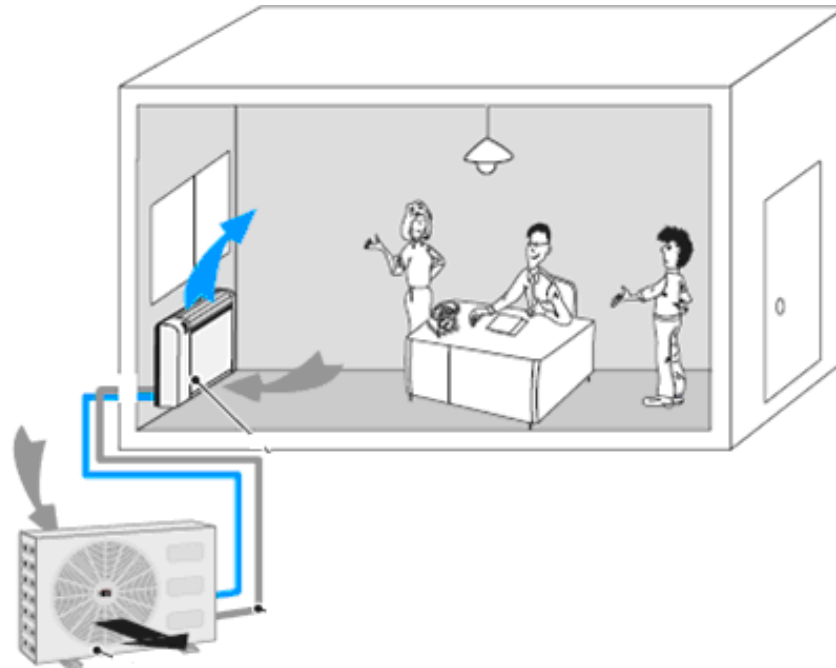
Air humide

Climatisation

Confort

- **Source de chaud et de froid**

- centralisée
- **décentralisée**
- mixte



Systèmes de climatisation

Climatisation

Systèmes clim.

Définitions

Composition

Classification

Avantages

Désavantages

Alternatives

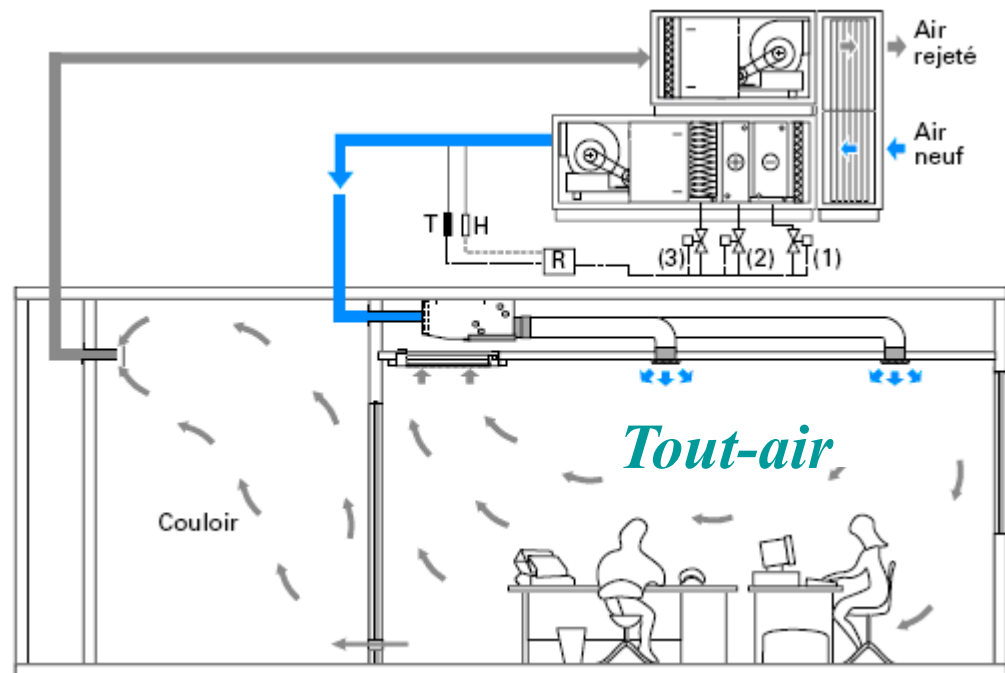
Air humide

Climatisation

Confort

• Distribution de l'énergie

- tout-air
- tout-eau
- air-eau



Systèmes de climatisation

Climatisation

Systèmes clim.

Définitions

Composition

Classification

Avantages

Désavantages

Alternatives

Air humide

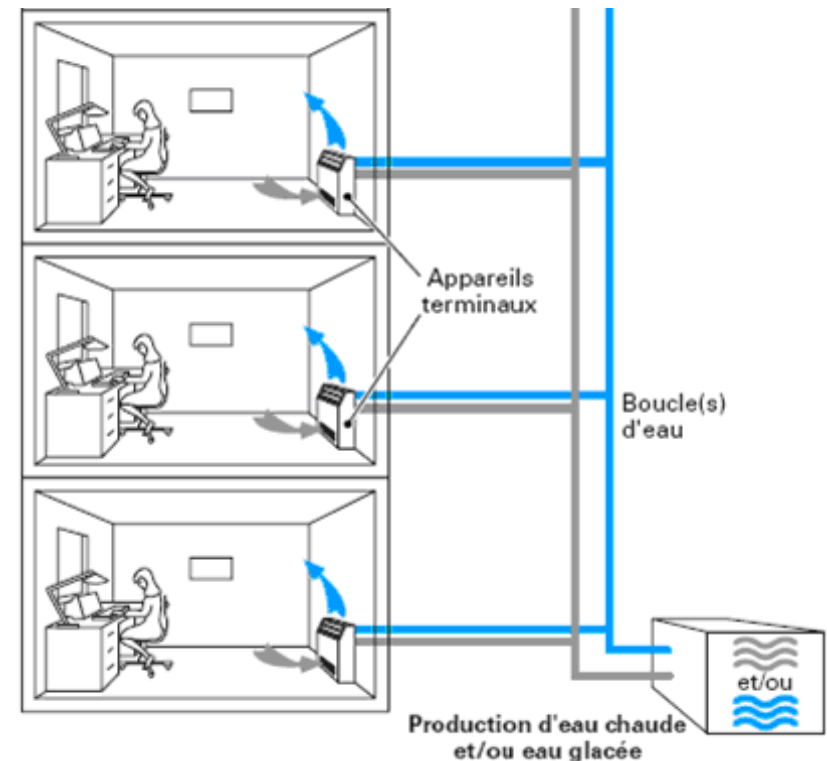
Climatisation

Confort

• Distribution de l'énergie

- tout-air
- **tout-eau**
- air-eau

Tout-eau



Systèmes de climatisation

Climatisation

Systèmes clim.

Définitions

Composition

Classification

Avantages

Désavantages

Alternatives

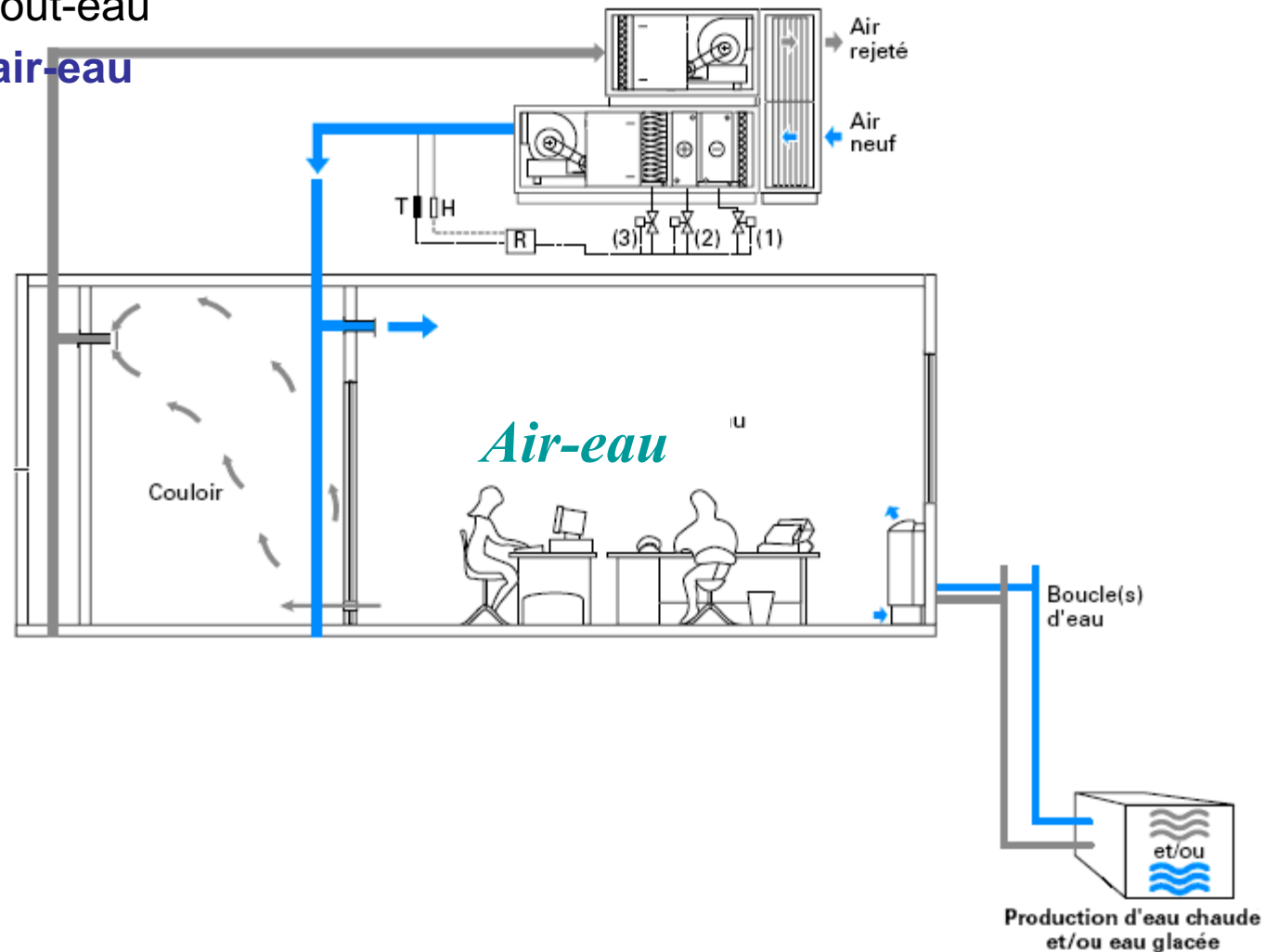
Air humide

Climatisation

Confort

• Distribution de l'énergie

- tout-air
- tout-eau
- **air-eau**



Systèmes de climatisation

Climatisation

Systèmes clim.

Définitions

Composition

Classification

Avantages

Désavantages

Alternatives

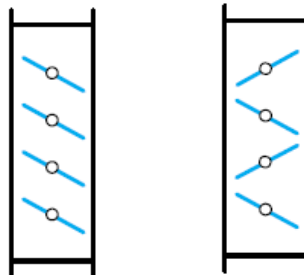
Air humide

Climatisation

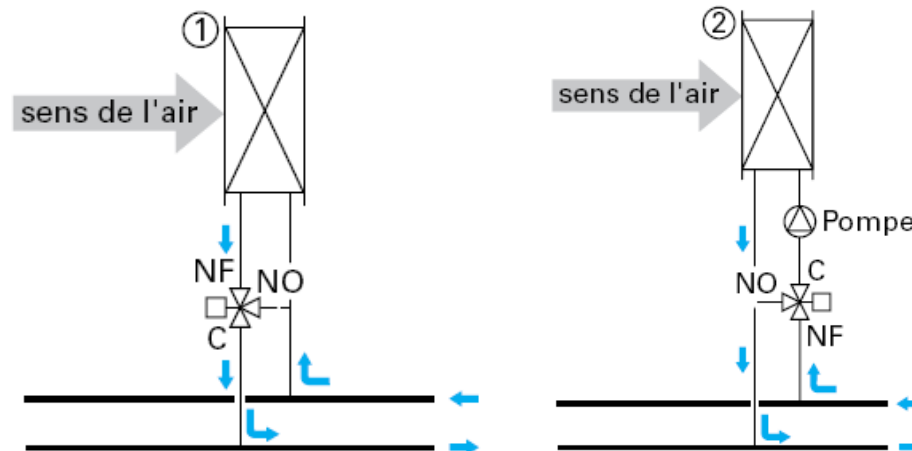
Confort

• Régulation

- varier le débit d'air



- varier la température de l'air



Systèmes de climatisation

Climatisation

Systèmes clim.

Définitions

Composition

Classification

Avantages

Désavantages

Alternatives

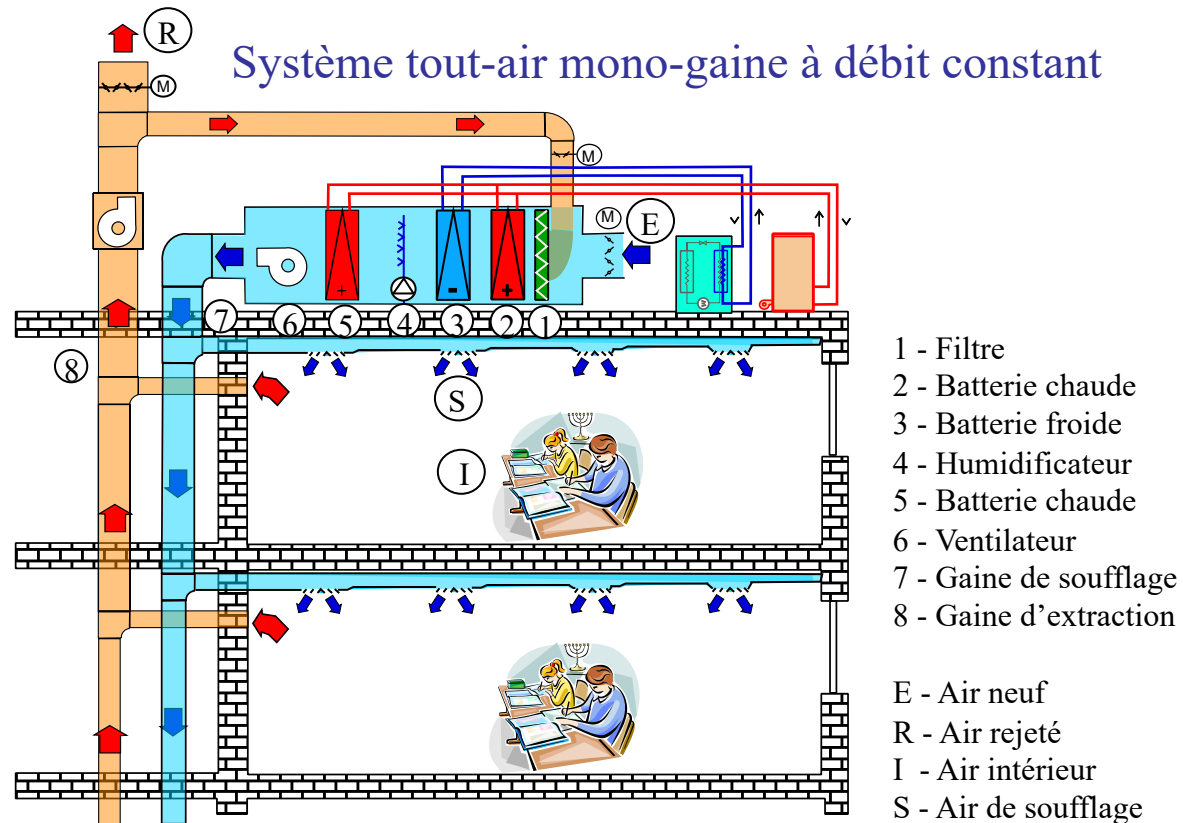
Air humide

Climatisation

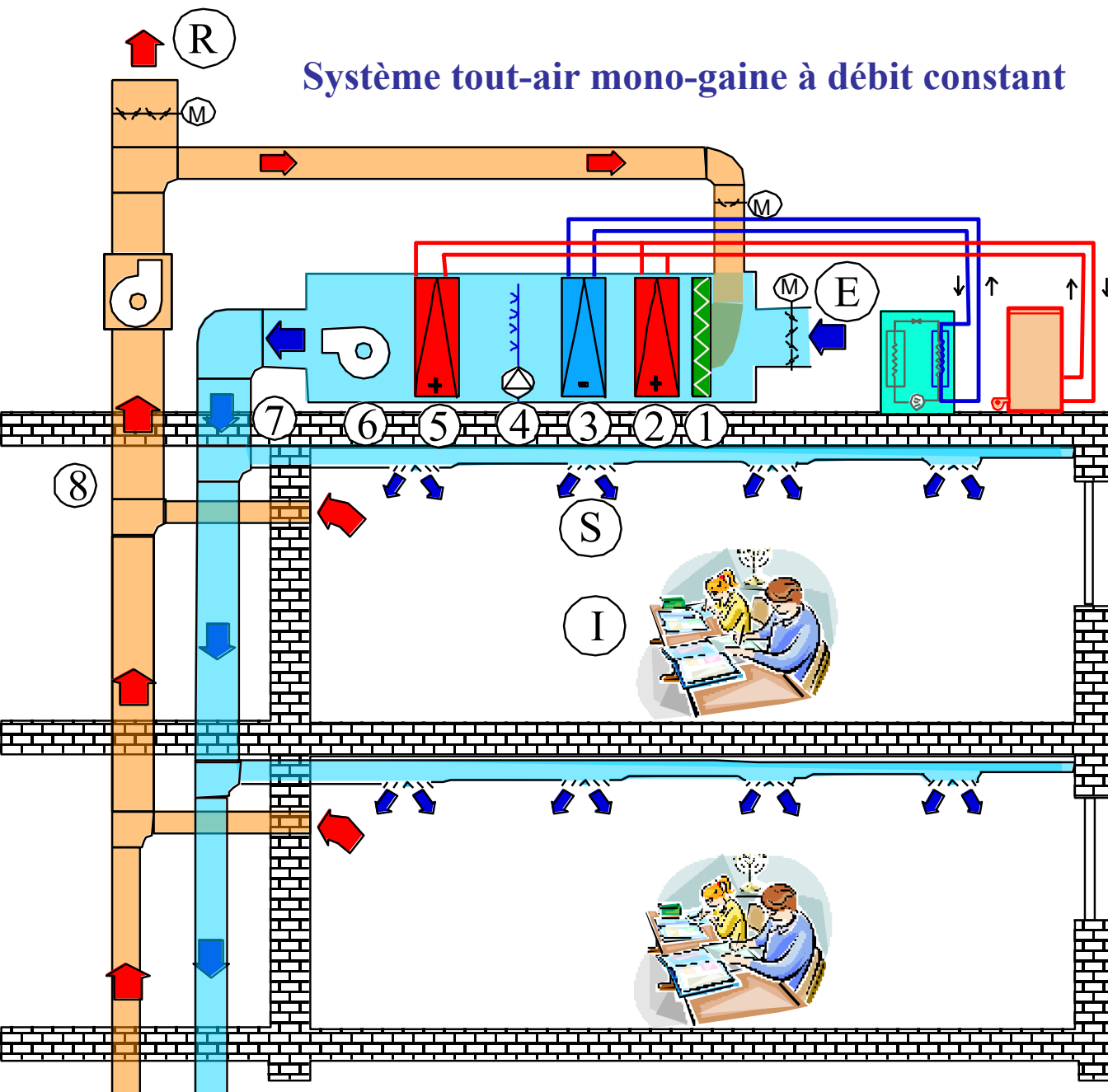
Confort

• Systèmes tout-air

- mono-gaine
- double-gaine
 - séparé chaud / froid
 - distinct pour chaque zone



Système tout-air mono-gaine à débit constant



- 1 - Filtre
- 2 - Batterie chaude
- 3 - Batterie froide
- 4 - Humidificateur
- 5 - Batterie chaude
- 6 - Ventilateur
- 7 - Gaine de soufflage
- 8 - Gaine d'extraction

- E - Air neuf
- R - Air rejeté
- I - Air intérieur
- S - Air de soufflage

Systèmes de climatisation

Climatisation

Systèmes clim.

Définitions

Composition

Classification

Avantages

Désavantages

Alternatives

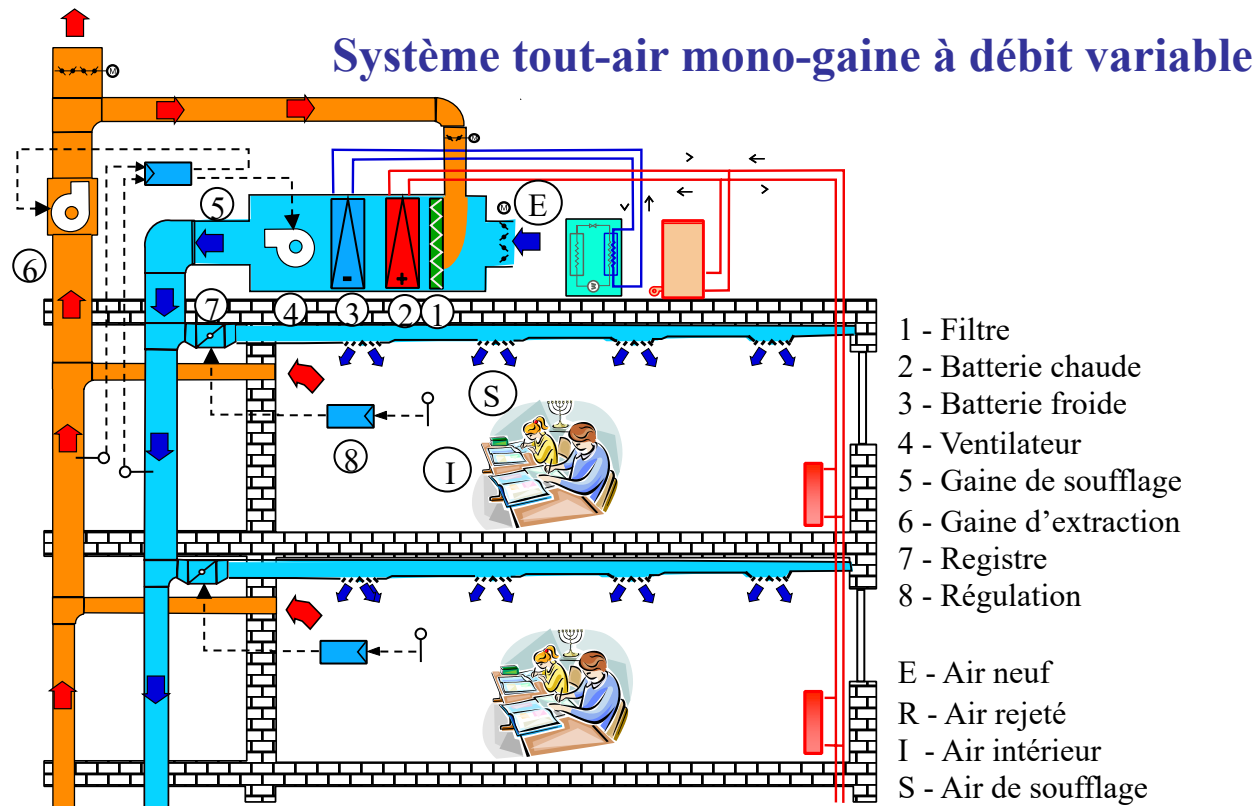
Air humide

Climatisation

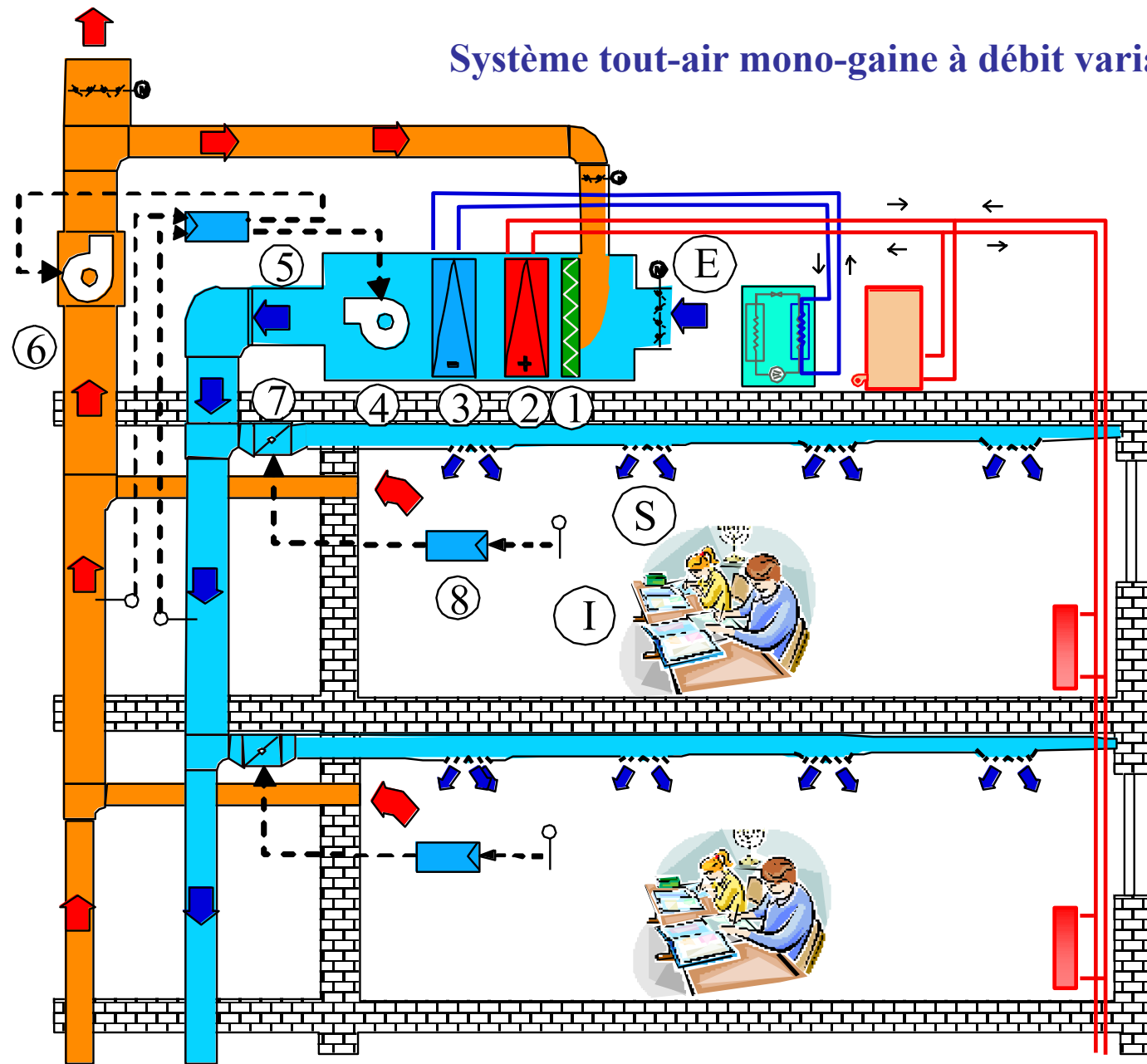
Confort

• Systèmes tout-air

- mono-gaine
- double-gaine
 - séparé chaud / froid
 - distinct pour chaque zone



Systeme tout-air mono-gaine à debit variable



- 1 - Filtre
- 2 - Batterie chaude
- 3 - Batterie froide
- 4 - Ventilateur
- 5 - Gaine de soufflage
- 6 - Gaine d'extraction
- 7 - Registre
- 8 - Régulation

- E - Air neuf
- R - Air rejeté
- I - Air intérieur
- S - Air de soufflage

Systèmes de climatisation

Climatisation

Systemes clim.

Définitions

Composition

Classification

Avantages

Désavantages

Alternatives

Air humide

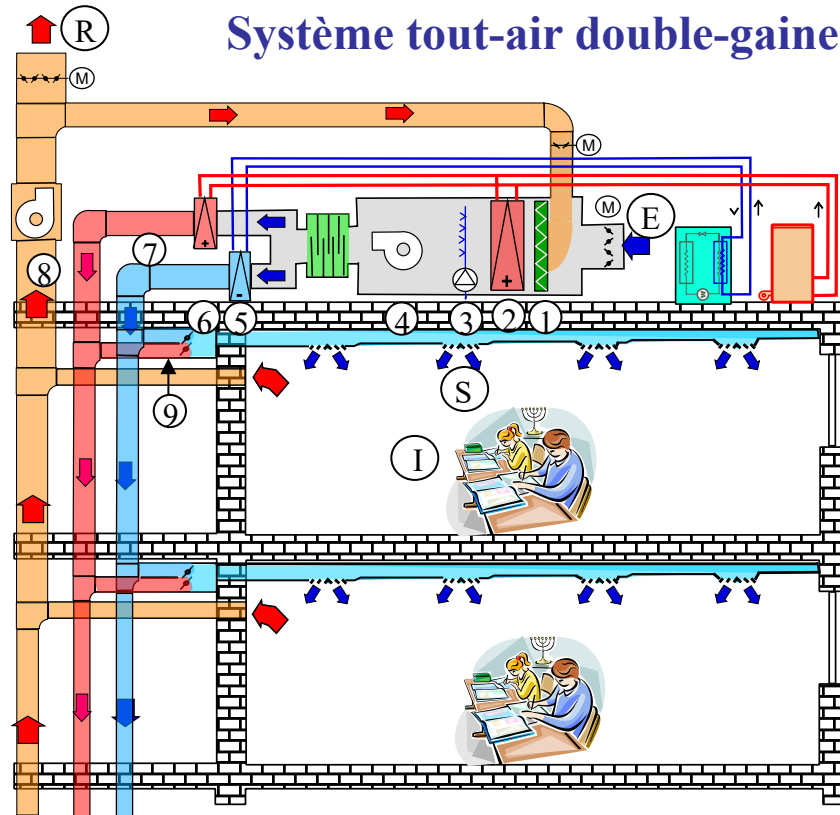
Climatisation

Confort

- **Systemes tout-air**

- mono-gaine
- **double-gaine**
 - **séparé chaud / froid**
 - distinct pour chaque zone

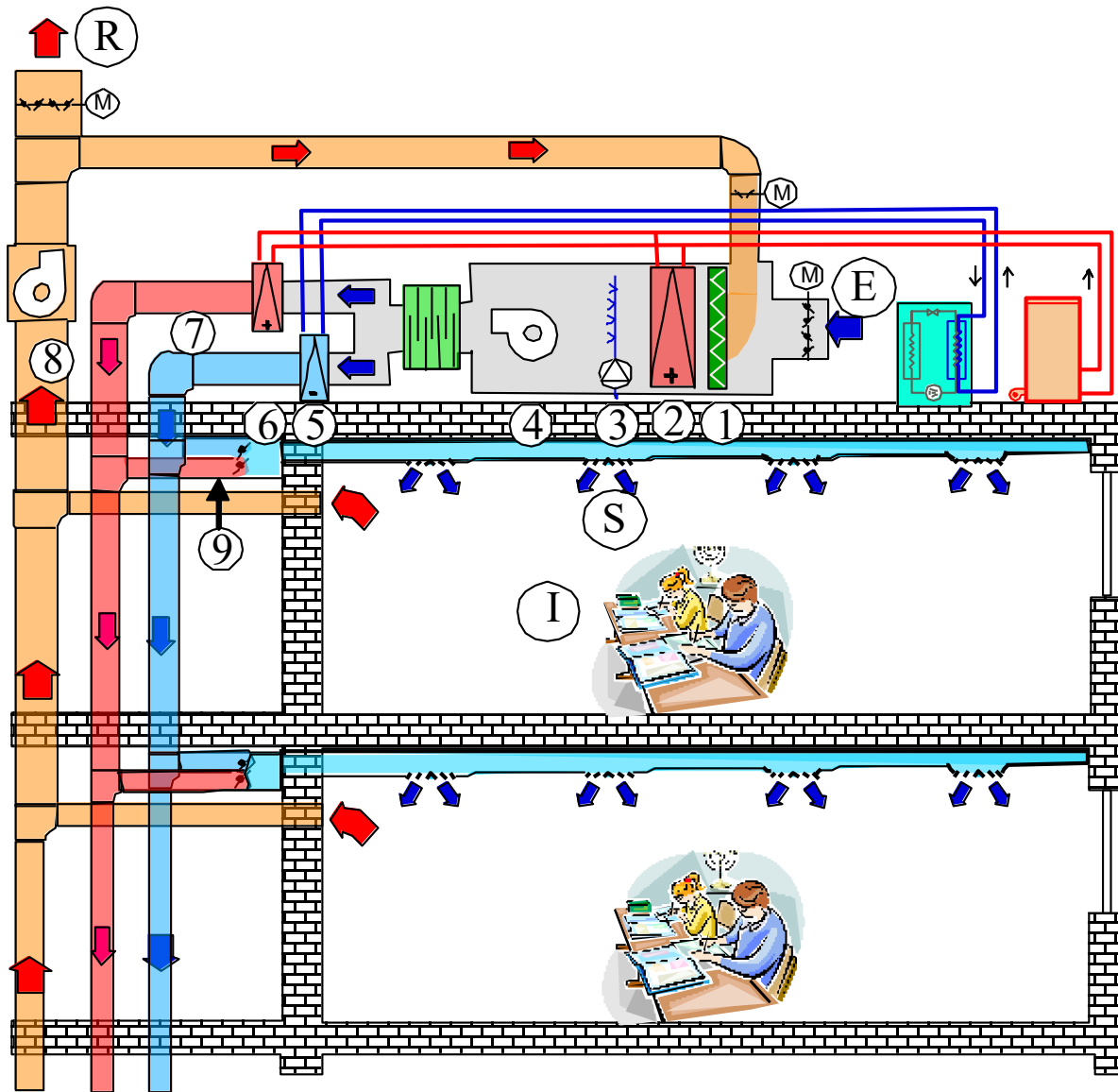
Système tout-air double-gaine à débit constant



- 1 - Filtre
- 2 - Batterie chaude
- 3 - Humidificateur
- 4 - Ventilateur
- 5 - Batterie froide
- 6 - Batterie chaude
- 7 - Gaine de soufflage
- 8 - Gaine d'extraction
- 9 - Caisson de mélange

- E - Air neuf
R - Air rejeté
I - Air intérieur
S - Air de soufflage

Systeme tout-air double-gaine à debit constant



- 1 - Filtre
- 2 - Batterie chaude
- 3 - Humidificateur
- 4 - Ventilateur
- 5 - Batterie froide
- 6 - Batterie chaude
- 7 - Gaine de soufflage
- 8 - Gaine d'extraction
- 9 - Caisson de mélange

- E - Air neuf
- R - Air rejeté
- I - Air intérieur
- S - Air de soufflage

Système tout-air double-gaine à débit constant

Climatisation

Systèmes clim.

Définitions

Composition

Classification

Avantages

Désavantages

Alternatives

Air humide

Climatisation

Confort



CTA

Débit constant

Débit variable



Diffuseur d'air

Climatisation

Systemes clim.

Définitions

Composition

Classification

Avantages

Désavantages

Alternatives

Air humide

Climatisation

Confort

Systèmes de climatisation

Climatisation

Systèmes clim.

Définitions

Composition

Classification

Avantages

Désavantages

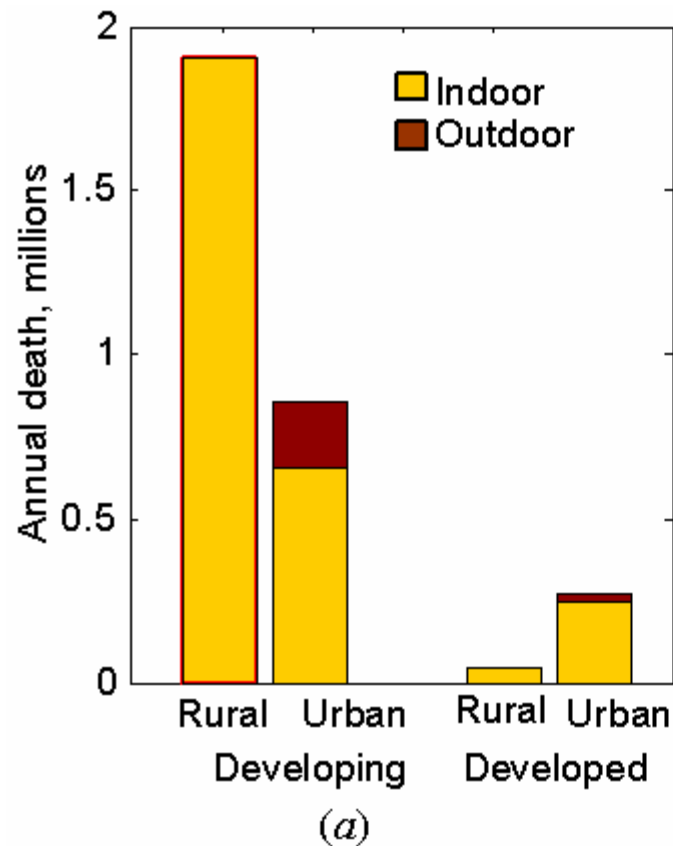
Alternatives

Air humide

Climatisation

Confort

- Importance du confort et de la qualité de l'air



Building:

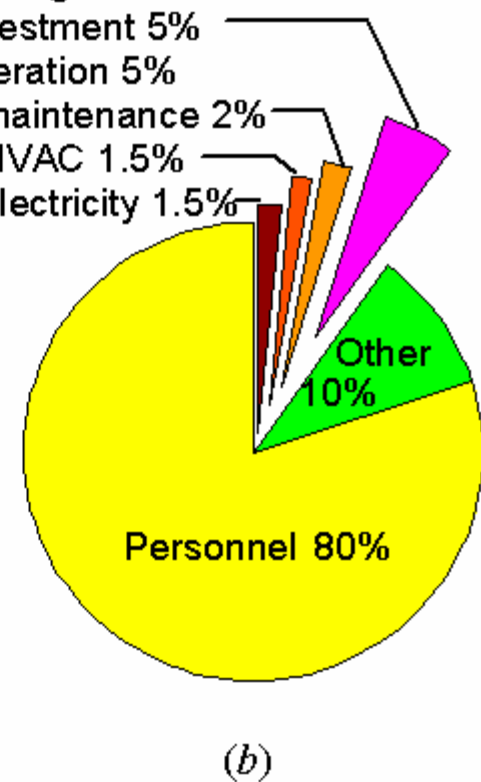
*investment 5%

*operation 5%

-maintenance 2%

-HVAC 1.5%

-electricity 1.5%



Systèmes de climatisation

Climatisation

Systèmes clim.

Définitions

Composition

Classification

Avantages

Désavantages

Alternatives

Air humide

Climatisation

Confort

- Avantages



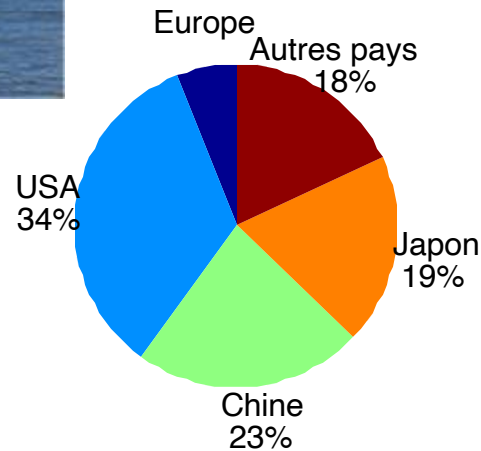
Stockholm, Suède *



Hong Kong, Chine*



New York City, USA*



Marché de l'air conditionné (in volume) en 2000*



Systèmes de climatisation

Climatisation

Systèmes clim.

Définitions

Composition

Classification

Avantages

Désavantages

Alternatives

Air humide

Climatisation

Confort

- **Désavantages**

- Santé

- proliférations de legionella
 - encrassement des filtres
 - taux faible de renouvellement de l'air
 - choc thermique intérieur / extérieur

- Environnement

- consommation énergétique
 - augmentation des pics de consommation
 - fluides frigorigènes 2'000 fois l'effet de serre de CO₂

Systèmes de climatisation

Climatisation

Systèmes clim.

Définitions

Composition

Classification

Avantages

Désavantages

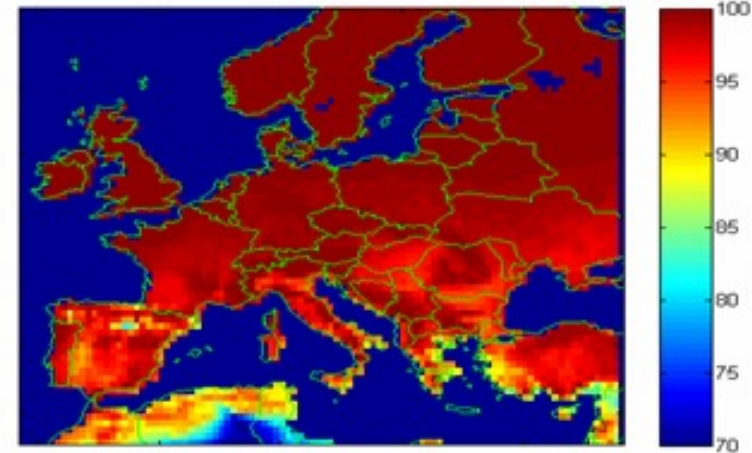
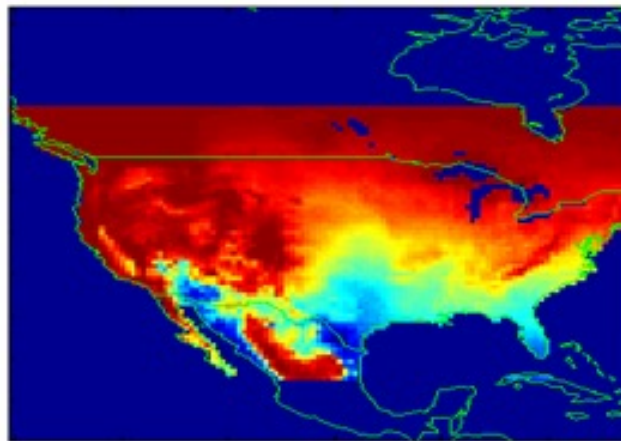
Alternatives

Air humide

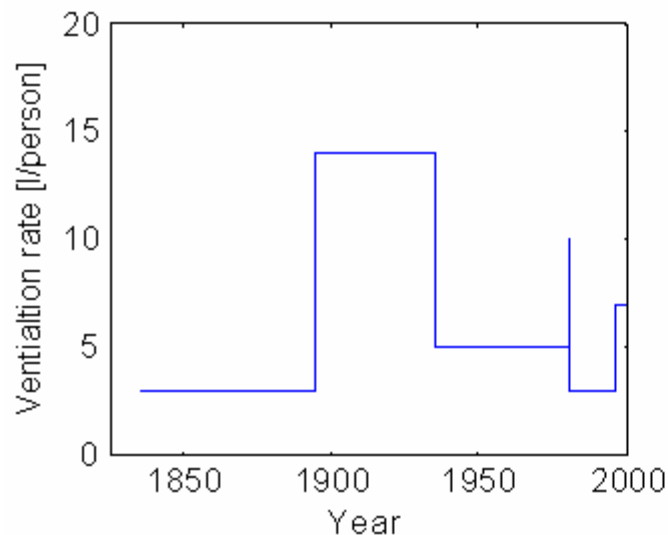
Climatisation

Confort

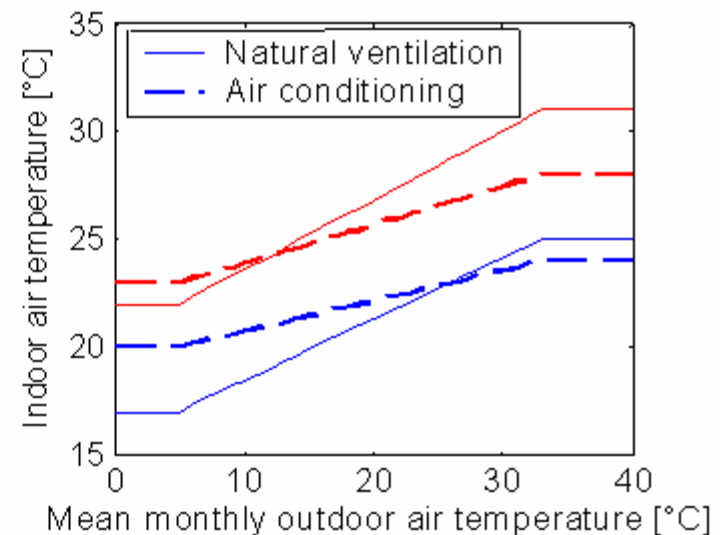
• Refroidissement par ventilation naturelle



Estimation du pourcentage de l'énergie économisée par l'utilisation de



(a)



(b)

Propriétés de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Atmosphère std.

Air sec

Vapeurs d'eau

Air humide

Diagramme air hum.

Climatisation

Confort

- **Atmosphère standard**

- **Air sec** = gaz
- **Air humide** = air sec + vapeurs eau
- **Air atmosphérique** = air humide + polluants
(**humide pollué**) humidité entre zéro (air sec) et saturation (état d'équilibre entre l'air humide et une surface d'eau en état condensée, liquide ou solide)
- **Atmosphère normalisée** gaz idéal

$$g = 9.807 \text{ m/s}^2 \quad \text{au niveau de la mer}$$

$$p_{an} = 101.325 \text{ kPa}$$

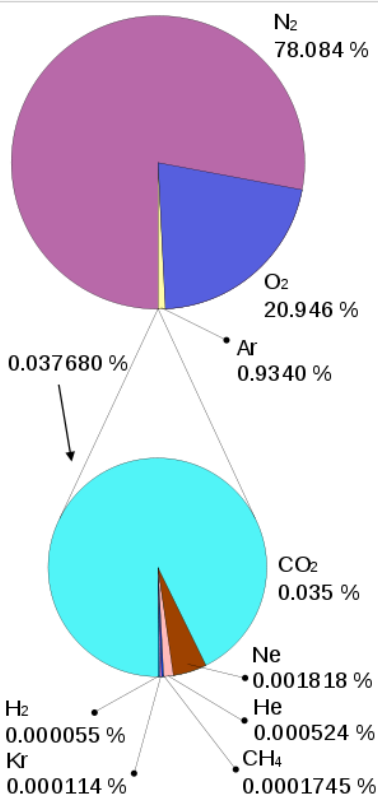
$$\theta_{an} = 15 \text{ °C} \quad T_{an} = 288.15 \text{ K}$$

- en fonction d'altitude

$$p = 101.325(1 - 2.25577 \cdot 10^{-5} \times Z)^{5.2559} [\text{kPa}]$$

$$\theta = 15 - 0.0065 \times Z [\text{°C}]$$

Propriétés de l'air humide



• Air sec

Gaz constituants l'air sec	Symbole	Masse molaire $M [g \cdot mol^{-1}]$	Pourcentage du volume $p [\%]$
Azote	N ₂	28.016	78.084
Oxygène	O ₂	32.000	20.948
Argon	Ar	40.944	0.934
Gaz carbonique	CO ₂	44.010	0.030
Néon	Ne	20.183	$1.8 \cdot 10^{-3}$
Hélium	He	4.003	$5.24 \cdot 10^{-4}$
Krypton	Kr	83.070	$1.14 \cdot 10^{-4}$
Hydrogène	H ₂	2.016	$5.0 \cdot 10^{-5}$
Xénon	Xe	131.300	$8.7 \cdot 10^{-6}$
Ozone	O ₃	48.000	$0.4 \cdot 10^{-6}$
Radon	Rn	222.000	$6.0 \cdot 10^{-18}$

1 mol = $6,022 \times 10^{23}$ entités (n° Avogadro) (unité de comptage)

$$M_{as} = 28.9645 g \cdot mol^{-1}$$

Propriétés de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Atmosphère std.

Air sec

Vapeurs d'eau

Air humide

Diagramme air hum.

Climatisation

Confort

- gaz parfait

$$p_{as} V_{as} = \frac{m_{as}}{M_{as}} R T_{as} = n R T_{as}$$

$$n = \frac{m_{as}}{M_{as}}; n \text{ [kmol]}; m_{as} \text{ [kg]}; M \text{ [kg} \cdot \text{kmol}^{-1}]$$

$$R = 8314 \text{ J/(kmol} \cdot \text{K)} \quad \text{Constante universelle}$$

– masse volumique

$$\rho_{as} \equiv \frac{m_{as}}{V_{as}} = \frac{M_{as}}{R} \frac{p_{as}}{T_{as}}$$

– volume massique

$$v_{as} \equiv \frac{V_{as}}{m_{as}} \equiv \frac{1}{\rho_{as}} = \frac{R}{M_{as}} \frac{T_{as}}{p_{as}}$$

$$R_{s,as} = \frac{R}{M_{as}} = 287 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Constante spécifique

Propriétés de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Atmosphère std.

Air sec

Vapeurs d'eau

Air humide

Diagramme air hum.

Climatisation

Confort

- chaleur massique

$$Q_{12} = m_{as} c_{as} (T_2 - T_1)$$

$$c_{as} = \frac{Q_{12}}{m_{as} (T_2 - T_1)}$$

$$c_{as} = 1 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

Transformations à :

- pression constante (isobare)
- volume constant (isochore)

à pression constante

température $-40^\circ\text{C} \dots 100^\circ\text{C}$

Propriétés de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Atmosphère std.

Air sec

Vapeurs d'eau

Air humide

Diagramme air hum.

Climatisation

Confort

- enthalpie (chaleur contenue)
 - quantité de chaleur mis en jeu dans une transformation isobare
 - dépend de l'état initial et final
 - état initial

$$0\text{ }^{\circ}\text{C} \quad H_{as} \big|_{\theta=0^{\circ}\text{C}} = 0 \text{ kJ}$$

- enthalpie

$$H_{as} = m_{as} c_{as} \theta$$

- enthalpie massique

$$h_{as} \equiv \frac{H_{as}}{m_{as}} = c_{as} \theta \quad c_{as} = 1 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

Propriétés de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Atmosphère std.

Air sec

Vapeurs d'eau

Air humide

Diagramme air hum.

Climatisation

Confort

• Vapeurs d'eau

– gaz parfait pour $\theta_v < 60^\circ\text{C}$

– masse molaire $M_v = 18 \text{ kg/kmol}$

– masse volumique $\rho_v \equiv \frac{m_v}{V_v} = \frac{M_v}{R} \frac{p_v}{T_v}$

– volume massique $v_v \equiv \frac{1}{\rho_v} = \frac{R}{M_v} \cdot \frac{T_v}{p_v}$

$$R_{s,v} = \frac{R}{M_v} = 462 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Propriétés de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Atmosphère std.

Air sec

Vapeurs d'eau

Air humide

Diagramme air hum.

Climatisation

Confort

- chaleur massique à pression constante

$$c_v = \frac{Q_{12}}{m_v (T_2 - T_1)} \quad c_v = 1.96 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

- chaleur latente de vaporisation

$$l_v = 2495 \text{ kJ/kg}$$

- enthalpie (relative au point triple = phase liquide à 0°C)

$$H_v = m_v (l_v + c_v \theta_v)$$

- enthalpie massique

$$h_v \equiv \frac{H_v}{m_v} = l_v + c_v \theta \quad h_v = 2500 \text{ kJ/kg}$$

Propriétés de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Atmosphère std.

Air sec

Vapeurs d'eau

Air humide

Diagramme air hum.

Climatisation

Confort

• Air humide

- mélange d'air sec et de vapeur d'eau
- masse d'air sec constante
- masse de vapeur d'eau variable +évaporation / -condensation
- **pression partielle** : chaque composant dans tout le volume

$$pV = \frac{m}{M} RT$$

$$pV = nRT$$

$$\frac{m}{M} = \frac{m_{as}}{M_{as}} + \frac{m_v}{M_v}$$

$$n = n_{as} + n_v$$

$$p = p_{as} + p_v$$

Propriétés de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Atmosphère std.

Air sec

Vapeurs d'eau

Air humide

Diagramme air hum.

Climatisation

Confort

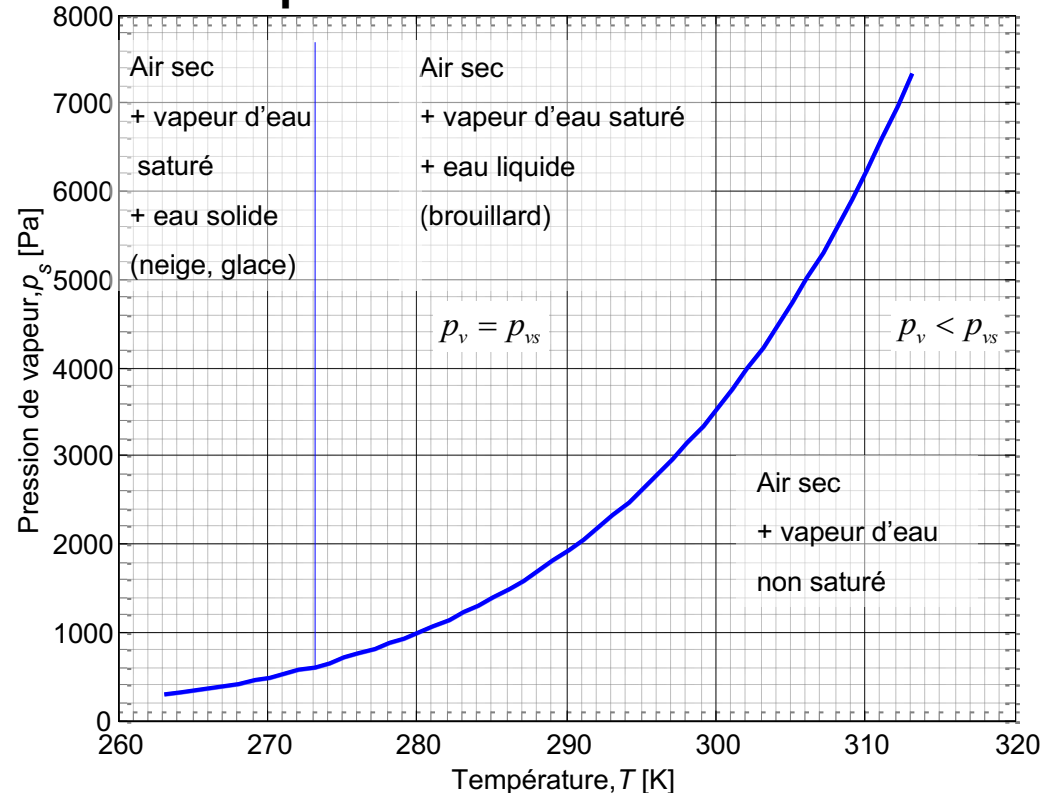
- pression partielle de vapeur d'eau

$$p_v = \frac{R}{M_v} \cdot \frac{m_v T}{V} \quad \frac{R}{M_v} = 462 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$T = ct, V = ct : m_v \uparrow \Rightarrow p_v \uparrow \rightarrow p_{vs}$$

- pression partielle de vapeur saturante

$$p_{vs} = f(T)$$



Propriétés de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Atmosphère std.

Air sec

Vapeurs d'eau

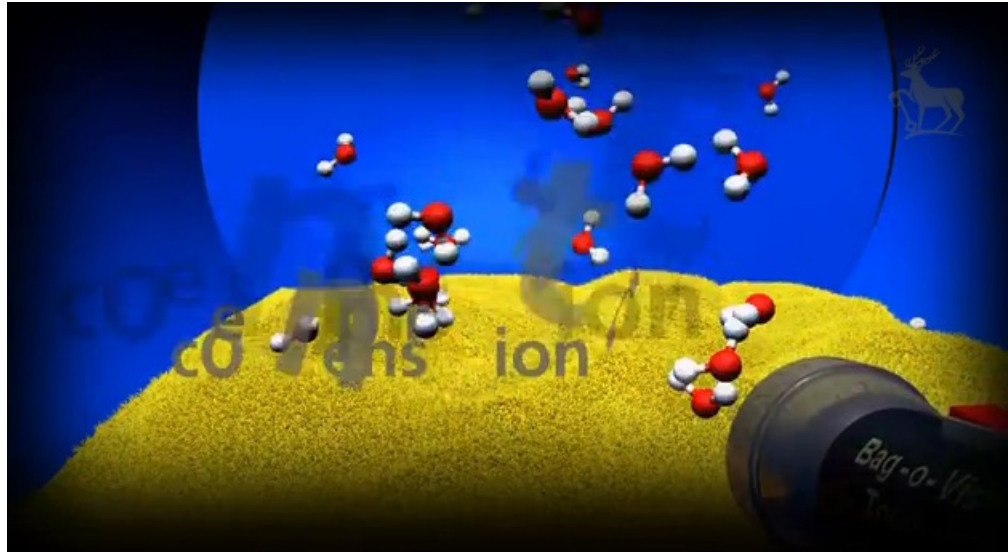
Air humide

Diagramme air hum.

Climatisation

Confort

– Equilibre dynamique



Source: <http://www.youtube.com/watch?v=JsoawKguU6A>

Propriétés de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Atmosphère std.

Air sec

Vapeurs d'eau

Air humide

Diagramme air hum.

Climatisation

Confort

- **teneur en humidité** / humidité spécifique / rapport de mélange

$$r \equiv \frac{m_v}{m_{as}} \text{ [kg}_v\text{/kg}_{as}\text{]} \quad V_v = V_{as} = V \quad r = \frac{\rho_v}{\rho_{as}}$$

$$n \equiv m / M$$

$$r = \frac{M_v}{M_{as}} \frac{n_v}{n_{as}} \quad T_v = T_{as} = T$$

$$r = \frac{M_v}{M_{as}} \frac{p_v}{p_{as}}$$

$$r = \frac{M_v}{M_{as}} \frac{p_v}{p - p_v}$$

- **teneur en humidité à la saturation** $p_v = p_{vs}$

$$r_s = \frac{M_v}{M_{as}} \frac{p_{vs}}{p - p_{vs}}$$

$$\frac{M_v}{M_{as}} = 0.62198$$

Propriétés de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Atmosphère std.

Air sec

Vapeurs d'eau

Air humide

Diagramme air hum.

Climatisation

Confort

– degré hygrométrique / humidité relative

$$\varphi \equiv \frac{p_v}{p_{vs}} \Big|_{\theta} \qquad r = \frac{M_v}{M_{as}} \frac{\varphi \cdot p_{vs}}{p - \varphi \cdot p_{vs}}$$

– masse volumique (diminue avec l'humidité)

$$\rho \equiv \frac{m}{V} = \frac{m_{as} + m_v}{V} = \rho_{as} + \rho_v$$

$$\rho = \frac{M_{as}}{R} \frac{p_{as}}{T} + \frac{M_v}{R} \frac{p_v}{T} = \frac{M_{as}}{R} \frac{p}{T} - \frac{(M_{as} - M_v)}{R} \frac{\varphi \cdot p_{vs}}{T}$$

Propriétés de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Atmosphère std.

Air sec

Vapeurs d'eau

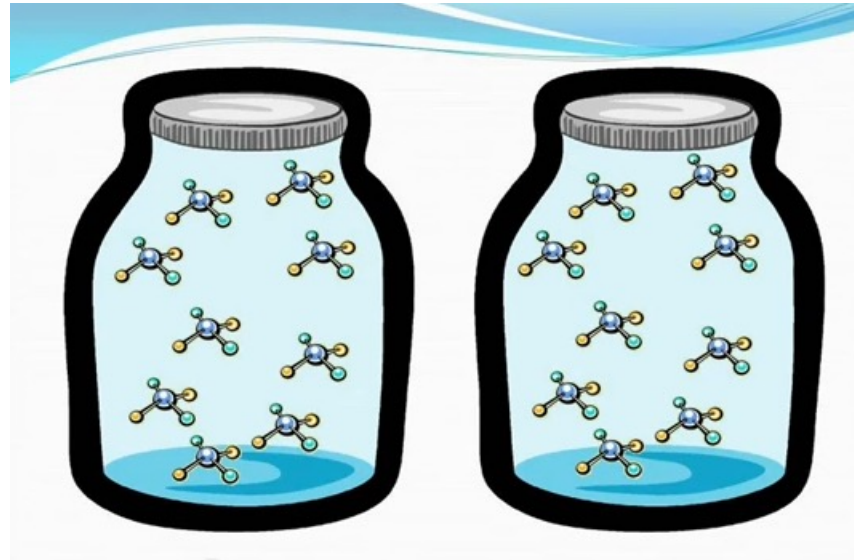
Air humide

Diagramme air hum.

Climatisation

Confort

- masse volumique (diminue avec l'humidité)



Source: <https://www.youtube.com/watch?v=w5m7SD4SpUo>

$$\rho = \frac{M_{as}}{R} \frac{p}{T} - \frac{(M_{as} - M_v)}{R} \frac{\varphi \cdot p_{vs}}{T} = \rho_{as} - \frac{(M_{as} - M_v)}{R} \frac{\varphi \cdot p_{vs}}{T}$$

Propriétés de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Atmosphère std.

Air sec

Vapeurs d'eau

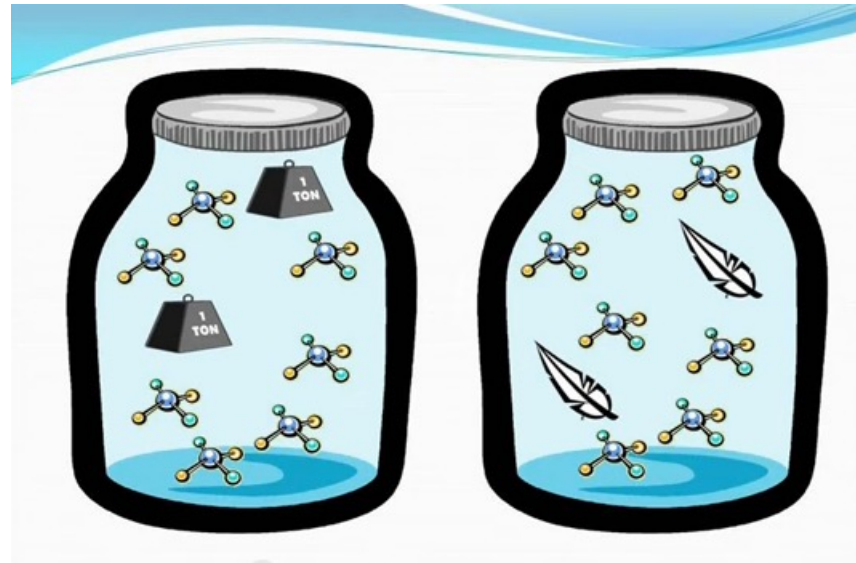
Air humide

Diagramme air hum.

Climatisation

Confort

- masse volumique (diminue avec l'humidité)



Propriétés de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Atmosphère std.

Air sec

Vapeurs d'eau

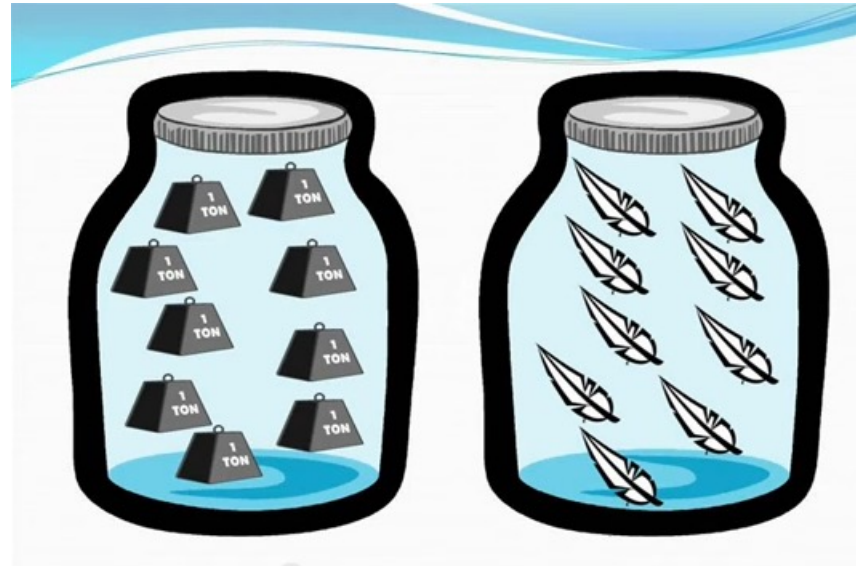
Air humide

Diagramme air hum.

Climatisation

Confort

- masse volumique (diminue avec l'humidité)



Propriétés de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Atmosphère std.

Air sec

Vapeurs d'eau

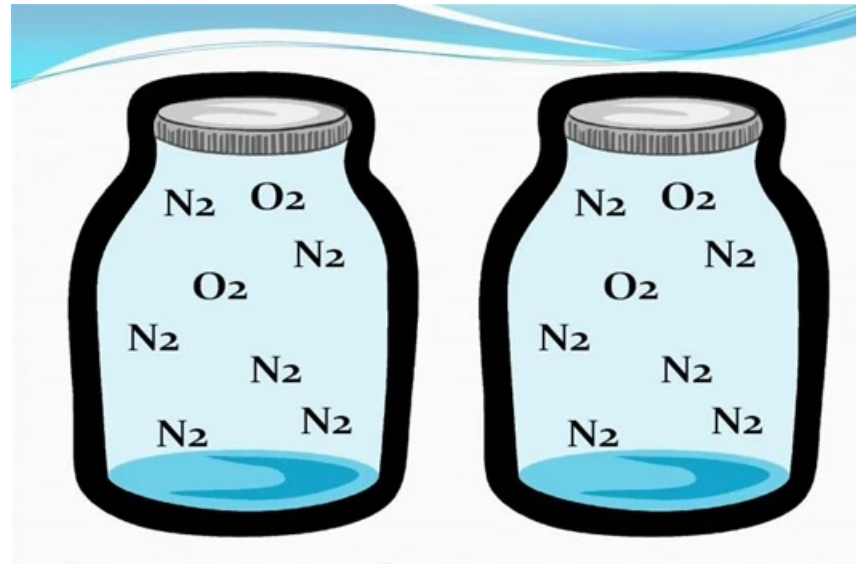
Air humide

Diagramme air hum.

Climatisation

Confort

- masse volumique (diminue avec l'humidité)



Propriétés de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Atmosphère std.

Air sec

Vapeurs d'eau

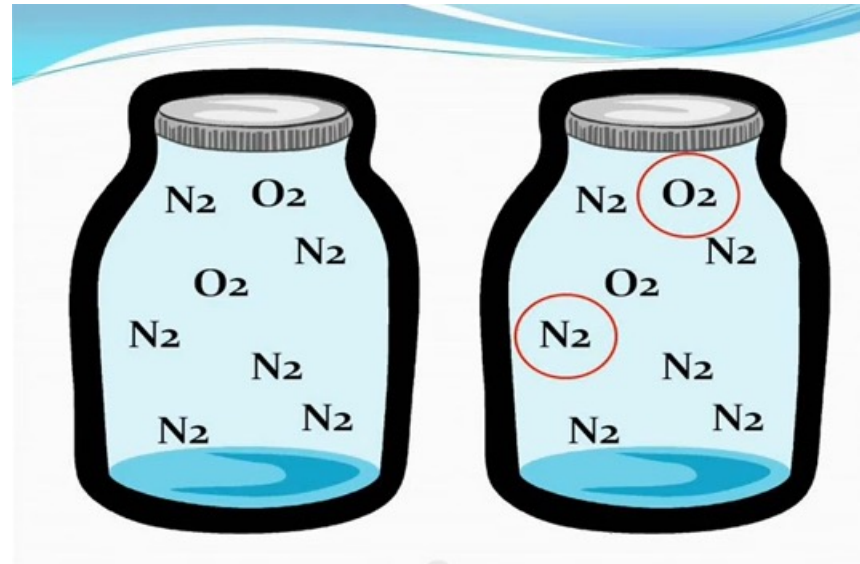
Air humide

Diagramme air hum.

Climatisation

Confort

- masse volumique (diminue avec l'humidité)



Propriétés de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Atmosphère std.

Air sec

Vapeurs d'eau

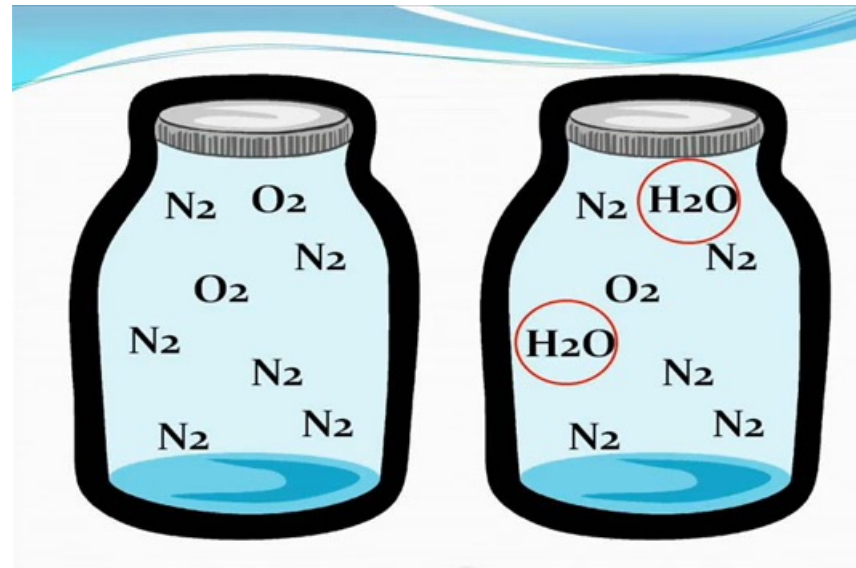
Air humide

Diagramme air hum.

Climatisation

Confort

- masse volumique (diminue avec l'humidité)



Propriétés de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Atmosphère std.

Air sec

Vapeurs d'eau

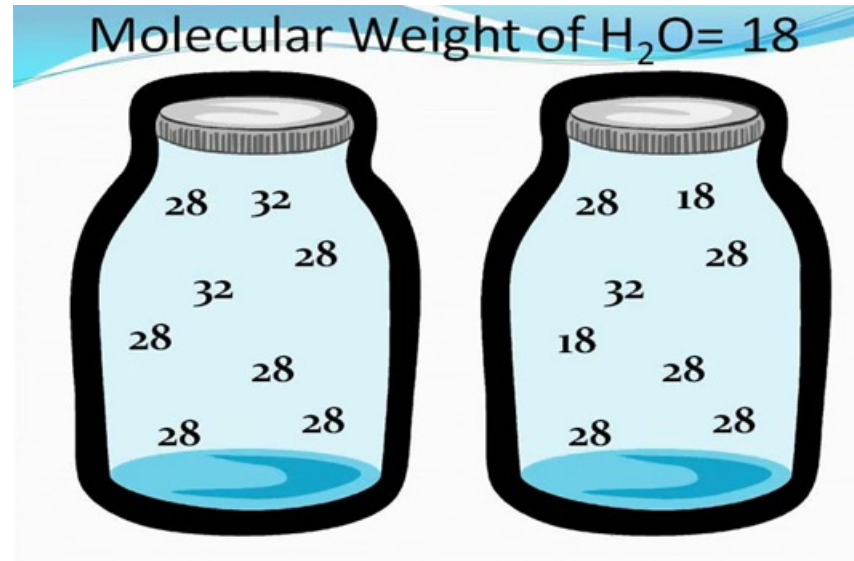
Air humide

Diagramme air hum.

Climatisation

Confort

- masse volumique (diminue avec l'humidité)



Propriétés de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Atmosphère std.

Air sec

Vapeurs d'eau

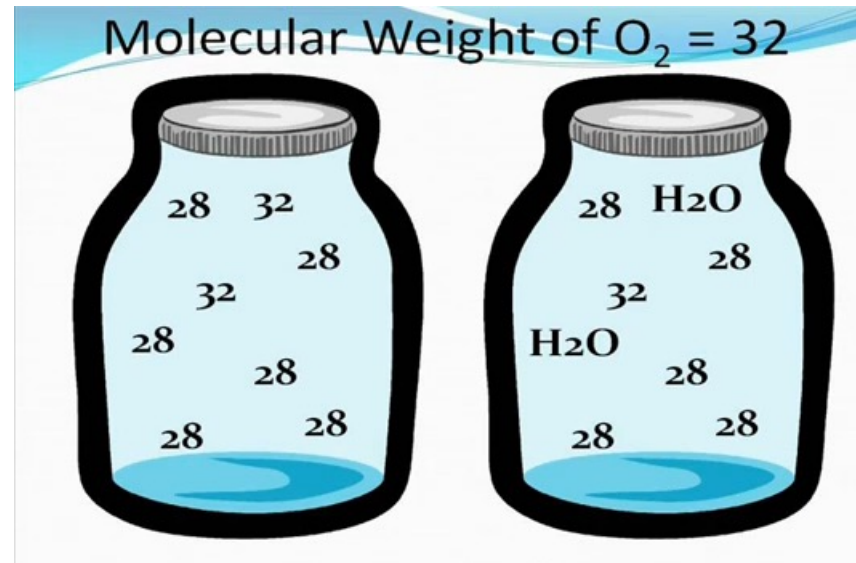
Air humide

Diagramme air hum.

Climatisation

Confort

- masse volumique (diminue avec l'humidité)



Propriétés de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Atmosphère std.

Air sec

Vapeurs d'eau

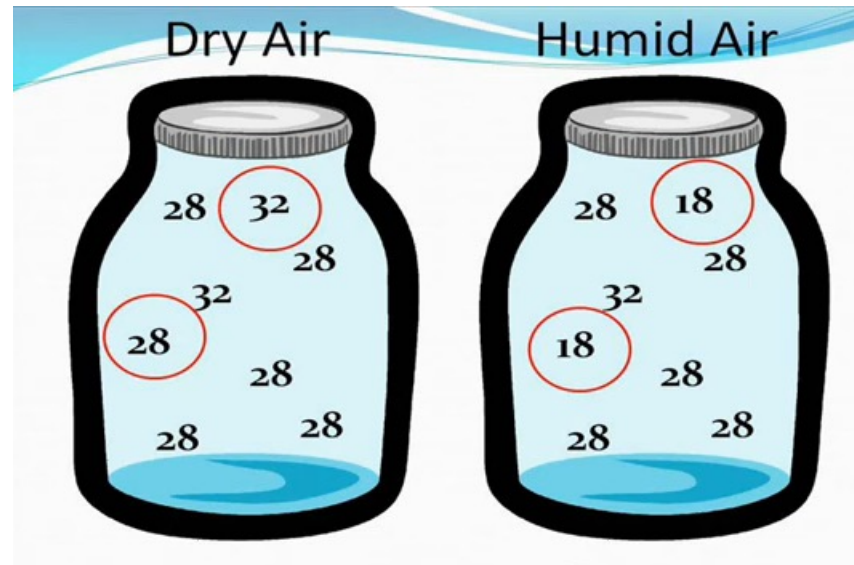
Air humide

Diagramme air hum.

Climatisation

Confort

- masse volumique (diminue avec l'humidité)



Propriétés de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Atmosphère std.

Air sec

Vapeurs d'eau

Air humide

Diagramme air hum.

Climatisation

Confort

– volume spécifique

$$v_{as} \equiv \frac{V}{m_{as}} = \frac{1}{\rho_{as}}$$

$$v_{as} = \frac{R}{M_{as}} \left(\frac{M_v}{M_{as}} + r \right) \frac{T}{p}$$

– volume massique

$$v \equiv \frac{V}{m_{as} + m_v} = \frac{1}{\rho_{ah}}$$

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{M_{as}}{R} \frac{p}{T} - \frac{(M_{as} - M_v)}{R} \frac{\varphi \cdot p_{vs}}{T} \\ &= \rho_{as} - \frac{(M_{as} - M_v)}{R} \frac{\varphi \cdot p_{vs}}{T} \end{aligned}$$

– débit volumique d'air humide

$$\dot{V} = v \dot{m}_{as}$$

Propriétés de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Atmosphère std.

Air sec

Vapeurs d'eau

Air humide

Diagramme air hum.

Climatisation

Confort

– enthalpie de l'air humide

$$H = H_{as} + H_v = m_{as} h_{as} + m_v h_v$$

$$H = m_{as} \left(h_{as} + \frac{m_v}{m_{as}} h_v \right) = m_{as} (h_{as} + r h_v)$$

$$H = m_{as} [c_{as} \theta + r(1_v + c_v \theta)]$$

$$h = c_{as} \theta + r(1_v + c_v \theta)$$

$$c_{as} = 1 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$1_v = 2495 \text{ kJ/kg}; \quad c_v = 1.96 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

Propriétés de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Atmosphère std.

Air sec

Vapeurs d'eau

Air humide

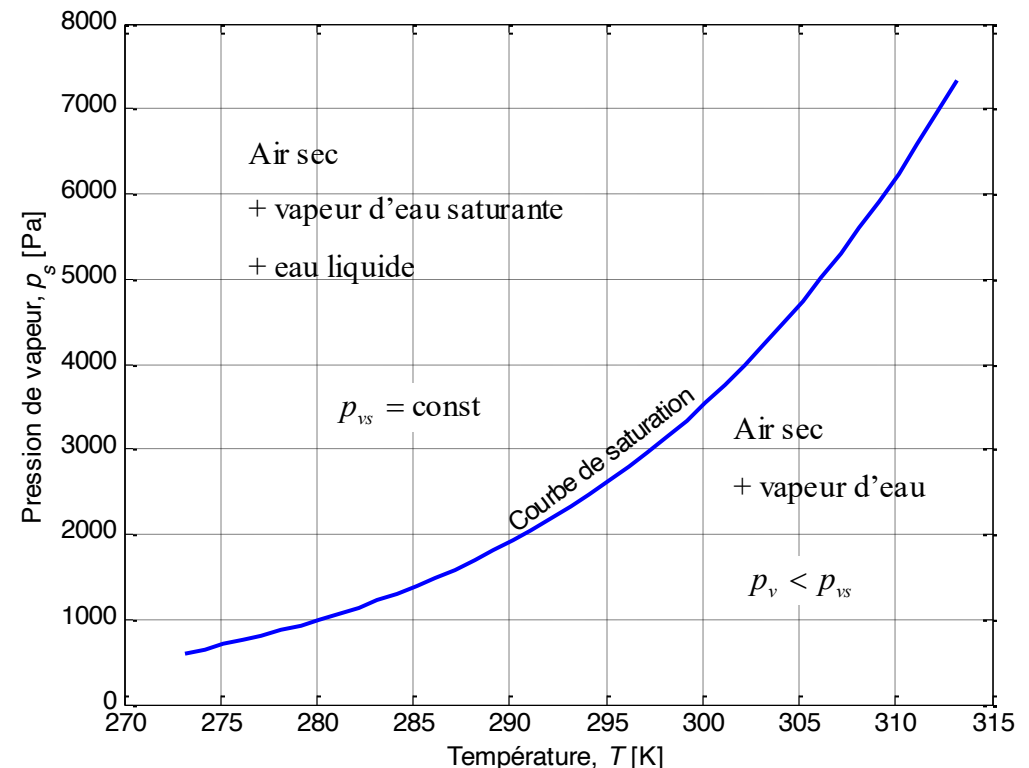
Diagramme air hum.

Climatisation

Confort

- **température de rosée** = température de l'air humide saturé à la même pression et ayant la même teneur en humidité que l'air humide

$$r_s(p, \theta_r) = r \Rightarrow \theta_r = f(p_{vs})$$



Propriétés de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Atmosphère std.

Air sec

Vapeurs d'eau

Air humide

Diagramme air hum.

Climatisation

Confort

– Solutions sursaturées



<http://www.youtube.com/watch?v=1y3bKIOkcmk>



<http://www.youtube.com/watch?v=E8AvfXar9zs>

Propriétés de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Atmosphère std.

Air sec

Vapeurs d'eau

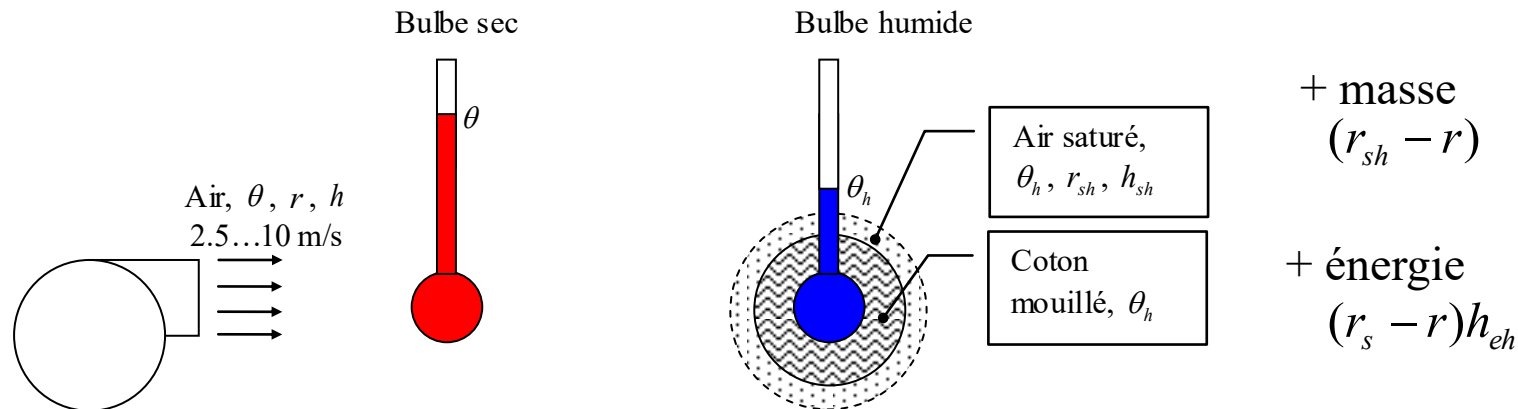
Air humide

Diagramme air hum.

Climatisation

Confort

– température du bulbe humide



- **température thermodynamique du thermomètre humide =** l'eau liquide s'évapore dans l'air pour l'amener à la saturation à la même température

- Enthalpie de l'air saturé :

$$h_{sh} = c_{as} \theta_h + r_{sh} (1_v + c_v \theta_h)$$

- Teneur en humidité :

$$r = \frac{[1_v - (c_e - c_v) \theta_h] r_{sh} - c_v (\theta - \theta_h)}{1_v + c_v \theta - c_e \theta_h} = f(\theta, \theta_h)$$

Propriétés de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Atmosphère std.

Air sec

Vapeurs d'eau

Air humide

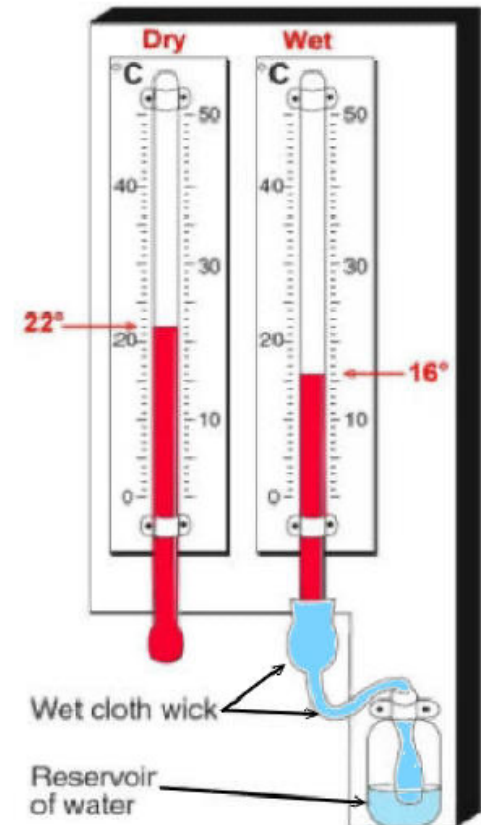
Diagramme air hum.

Climatisation

Confort

– Psychromètre

- Quand le thermomètre est mis dans un courant d'air, l'eau s'évapore.
- Evaporation → refroidissement
- → Température d'équilibre = température du thermomètre humide.
- Un processus de transfert de chaleur et de masse, pas un processus adiabatique.
- Température thermodynamique approx. égale température du thermomètre humide



Propriétés de l'air humide

Climatisation	Air sec	Vapeur d'eau	Air humide
Introduction	Pression $p_{as} = \frac{R}{M_{as}} \cdot \frac{m_{as} T}{V}$	Pression $p_v = \frac{R}{M_v} \cdot \frac{m_v T}{V}$ $p_{vs} = f(T)$	$p = p_{as} + p_v$
Propriétés air humide	Masse molaire $M_{as} = 28.9645 \text{ kg/kmol}$	$M_v = 18 \text{ kg/kmol}$	$\frac{m}{M} = \frac{m_{as}}{M_{as}} + \frac{m_v}{M_v}$ $n = n_{as} + n_v$
Atmosphère std.			
Air sec			
Vapeurs d'eau			
Air humide			
Diagramme air hum.			
Climatisation	Masse volumique $\rho_{as} \equiv \frac{m_{as}}{V_{as}} = \frac{M_{as}}{R} \frac{p_{as}}{T_{as}}$	$\rho_v \equiv \frac{m_v}{V_v} = \frac{M_v}{R} \frac{p_v}{T_v}$	$\rho = \frac{M_{as}}{R} \frac{p}{T} - \frac{(M_{as} - M_v)}{R} \frac{\phi p_{vs}}{T}$
Confort	Volume massique $v_{as} \equiv \frac{1}{\rho_{as}} = \frac{R}{M_{as}} \frac{T_{as}}{p_{as}}$	$v_v \equiv \frac{1}{\rho_v} = \frac{R}{M_v} \cdot \frac{T_v}{p_v}$	$v = \frac{R}{M_v} \left(\frac{M_v}{M_{as}} + r \right) \frac{T}{p}$
	Chaleur massique $c_{as} = \frac{Q_{12}}{m_{as} (T_2 - T_1)}$ $c_{as} = 1 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$	$c_v = \frac{Q_{12}}{m_v (T_2 - T_1)}$ $c_v = 1.96 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$	
	Enthalpie $H_{as} = m_{as} c_{as} \theta$	$H_v = m_v (l_v + c_v \theta_v)$ $l_v = 2495 \text{ kJ/kg}$	$H = m_{as} [c_{as} \theta + r(l_v + c_v \theta)]$
	Enthalpie massique $h_{as} \equiv \frac{H_{as}}{m_{as}} = c_{as} \theta$	$h_v \equiv \frac{H_v}{m_v} = l_v + c_v \theta$ $h_v = 2500 \text{ kJ/kg}$	$h = c_{as} \theta + r(l_v + c_v \theta)$

Diagramme de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Confort

- **Diagramme psychrométrique**

- pour une pression donnée, les propriétés de l'air humide peuvent être déterminées en connaissant deux d'entre eux
- le choix des coordonnées du diagramme est arbitraire

$$r_s = \frac{M_v}{M_{as}} \frac{p_{vs}}{p - p_{vs}}$$

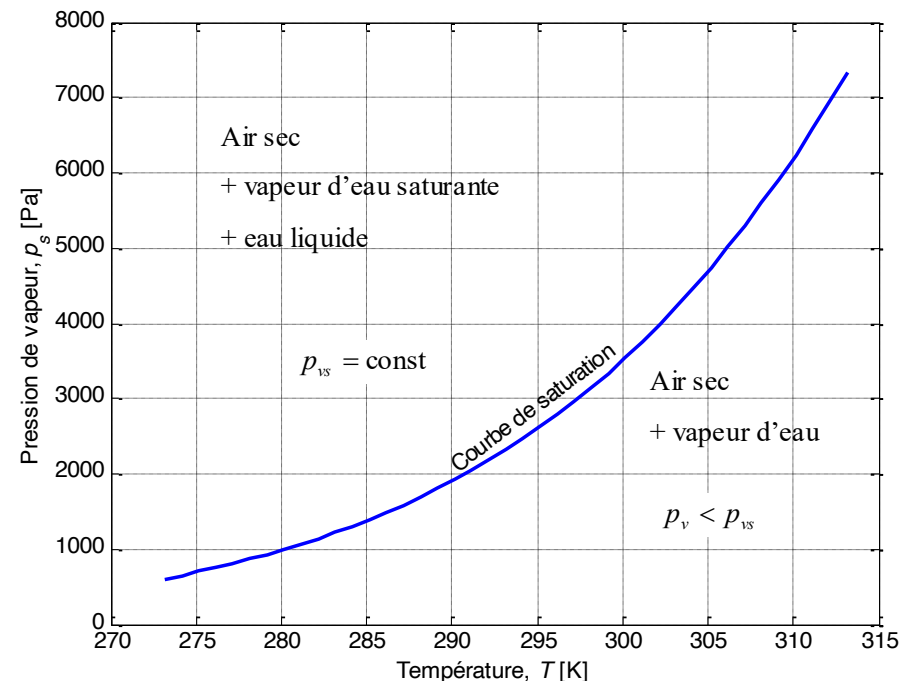


Diagramme de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Confort

- Diagramme psychrométrique

$$r_s = \frac{M_v}{M_{as}} \frac{p_{vs}}{p - p_{vs}} \quad p_{vs} = f(T)$$

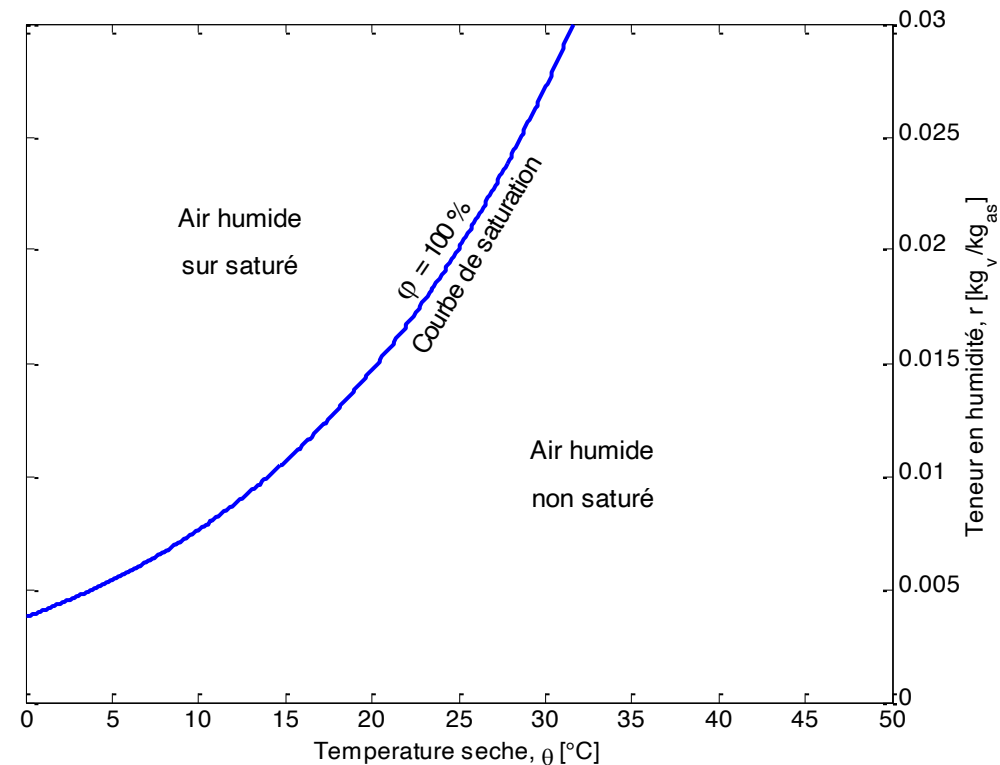


Diagramme de l'air humide

Climatisation

- température de rosée

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Confort

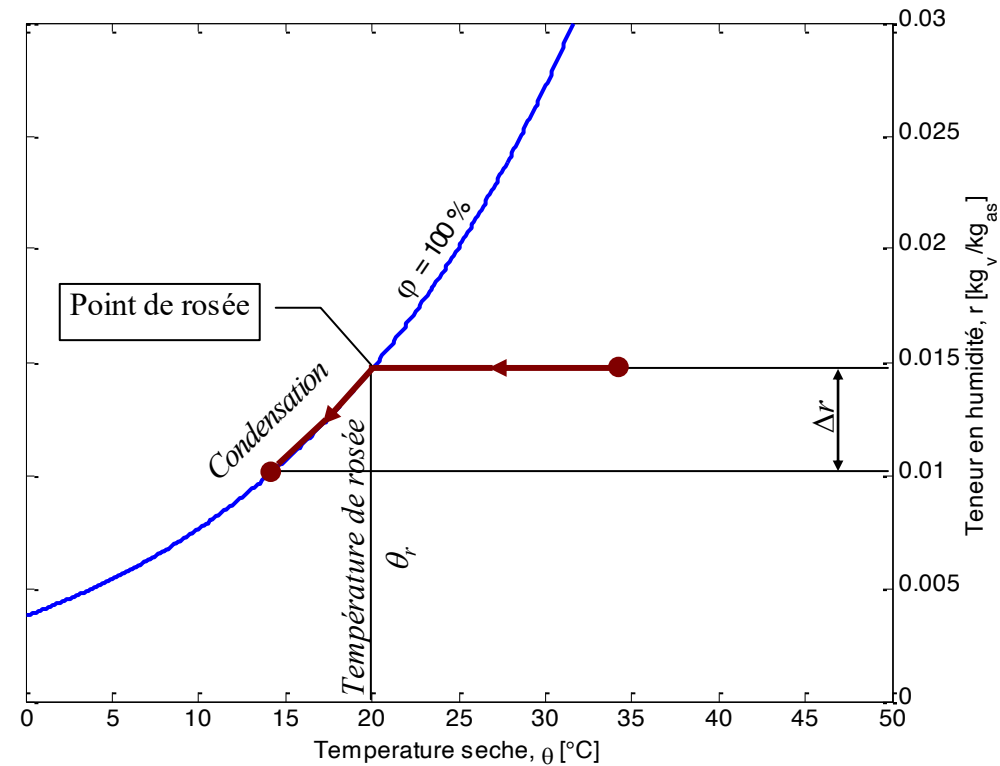


Diagramme de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Confort

- courbes d'égal degré hygrométrique

$$r = \frac{M_v}{M_{as}} \frac{\varphi \cdot p_{vs}(\theta)}{p - \varphi \cdot p_{vs}(\theta)}$$

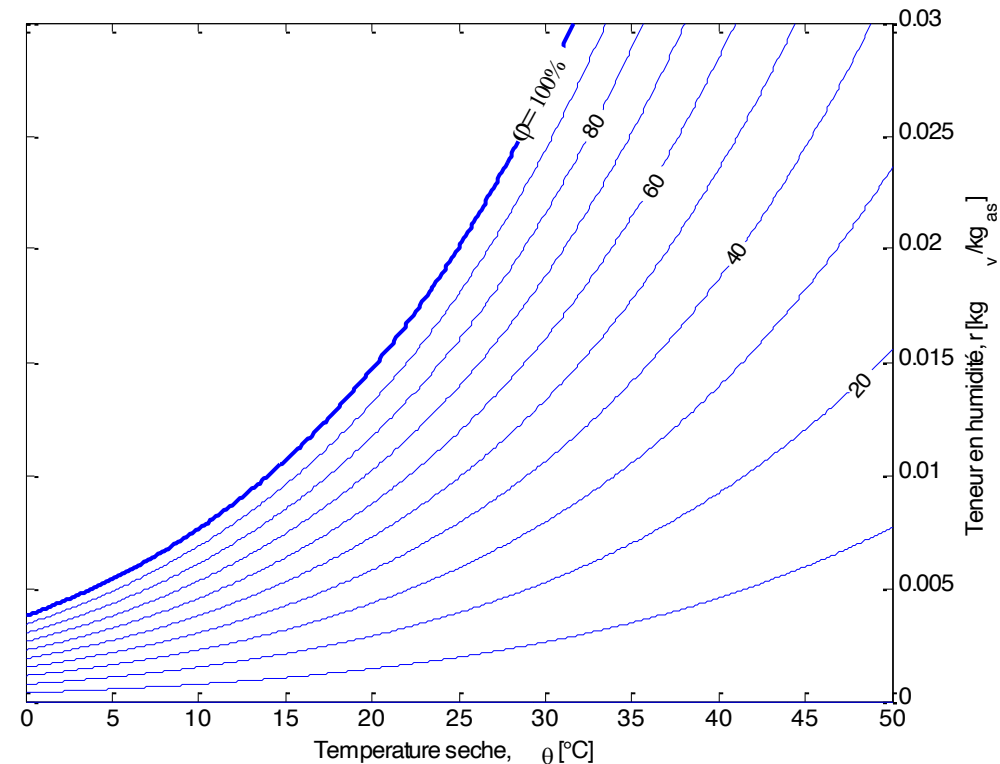


Diagramme de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Confort

– courbes d'égale enthalpie

$$r = \frac{h - c_{as}\theta}{l_v + c_v\theta} \cong \frac{h - c_{as}\theta}{l_v}; h = c_{as}\theta + l_v r$$

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} c_{as} & 0 \\ 0 & l_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ r \end{bmatrix}$$

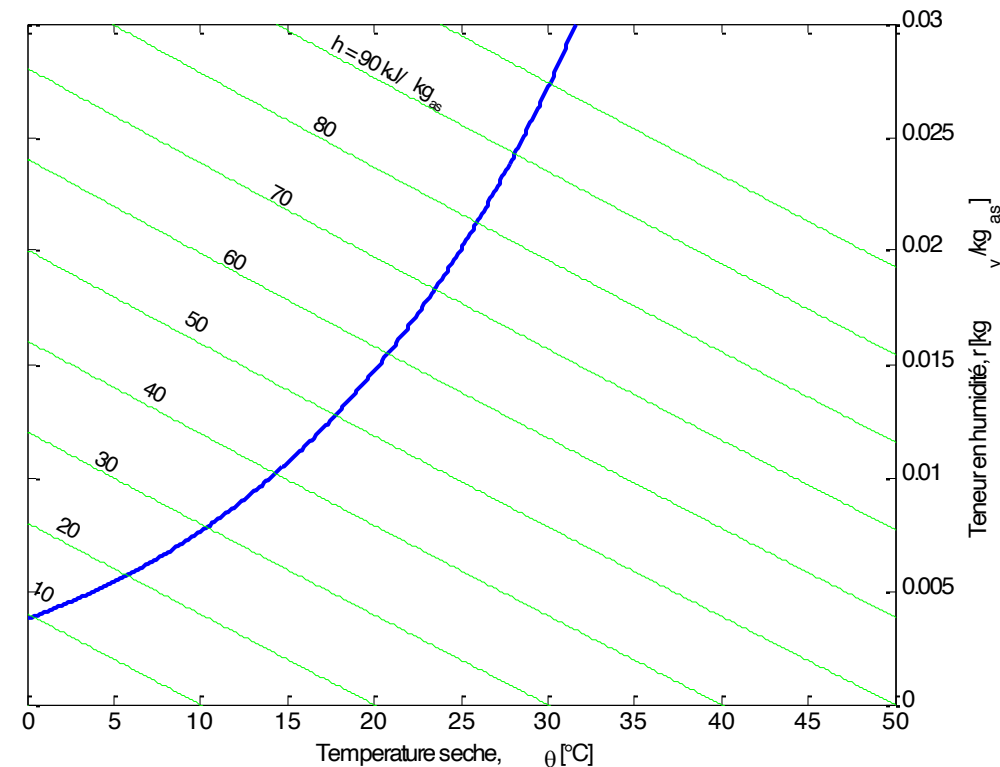


Diagramme de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Confort

- courbes d'égal volume spécifique

$$r = \frac{M_v}{R} \frac{v_p}{(273.15 + \theta)} - \frac{M_v}{M_{as}}$$

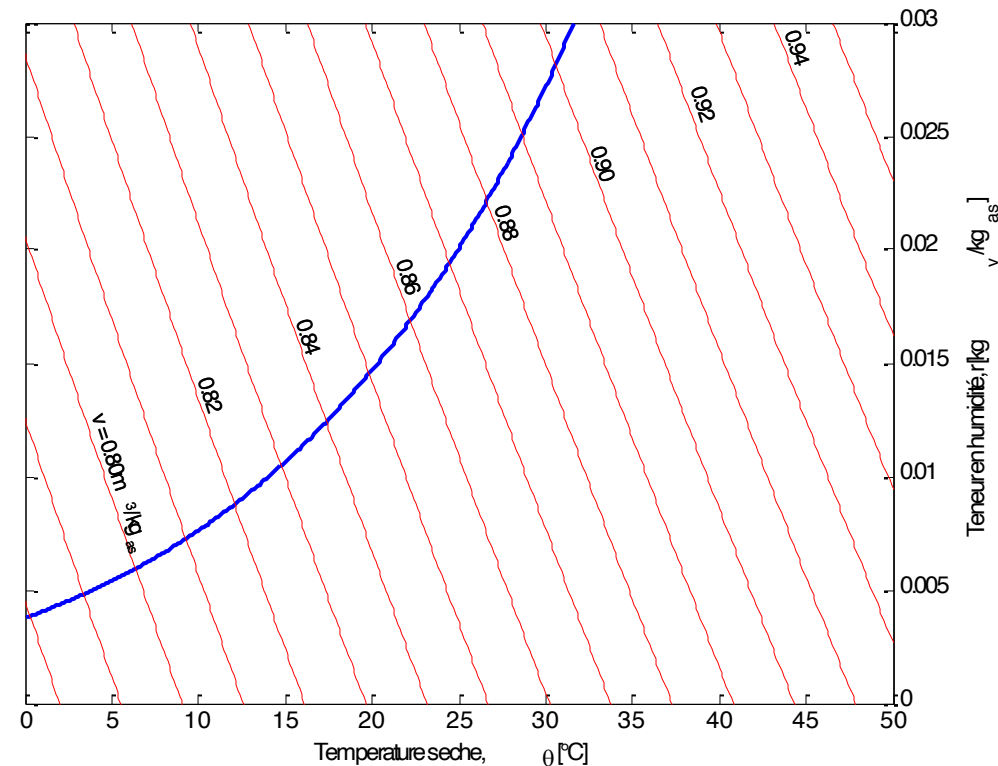


Diagramme de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Confort

- courbes d'égal volume spécifique

$$r = \frac{M_v}{R} \frac{vp}{(273.15 + \theta)} - \frac{M_v}{M_{as}}$$

$$f(\mathbf{x}) \cong f(\mathbf{x}_0) + Df(\mathbf{x}_0) (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)$$

$$Df(\mathbf{x}_0)_{ij} \equiv \left. \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \right|_{\mathbf{x}_0}$$

$$Dv = \begin{bmatrix} \frac{\partial v}{\partial \theta} & \frac{\partial v}{\partial r} \end{bmatrix} = \frac{1}{p} \frac{R}{M_v} \begin{bmatrix} \frac{M_v}{M_{as}} + r_0 & 273.15 + \theta_0 \end{bmatrix}$$

$$v \approx v_0 + \frac{1}{p} \frac{R}{M_v} \begin{bmatrix} \frac{M_v}{M_{as}} + r_0 & 273.15 + \theta_0 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} \theta \\ r \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \theta_0 \\ r_0 \end{bmatrix} \right)$$

Diagramme de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Confort

– courbes d'égale température humide

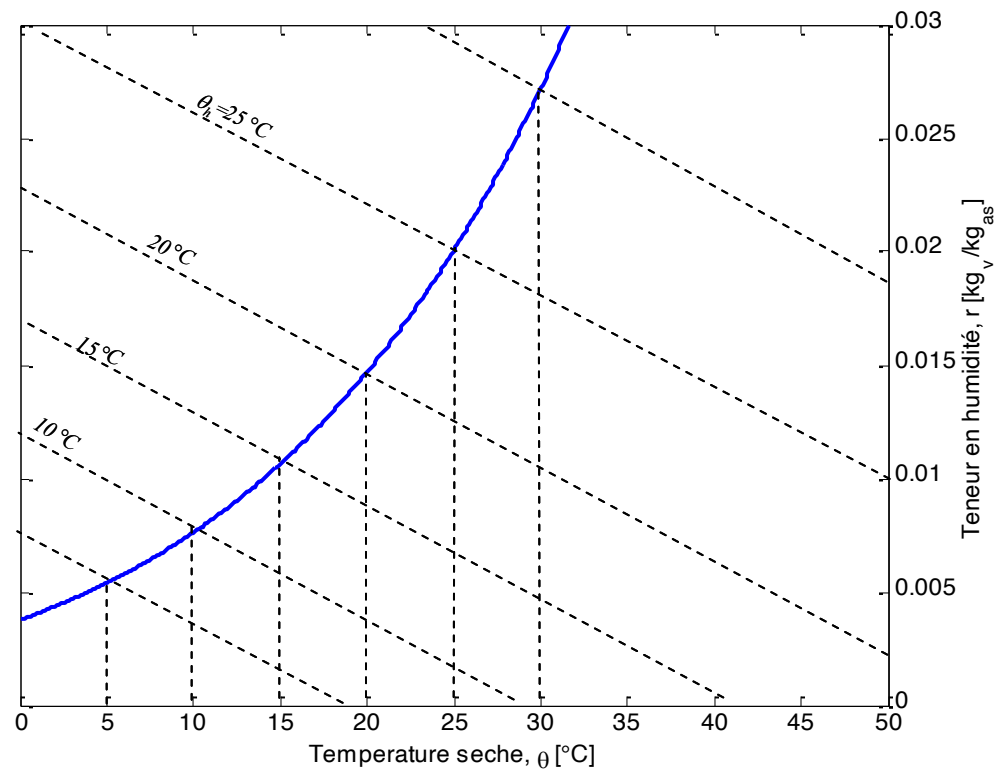


Diagramme de l'air humide

Climatisation

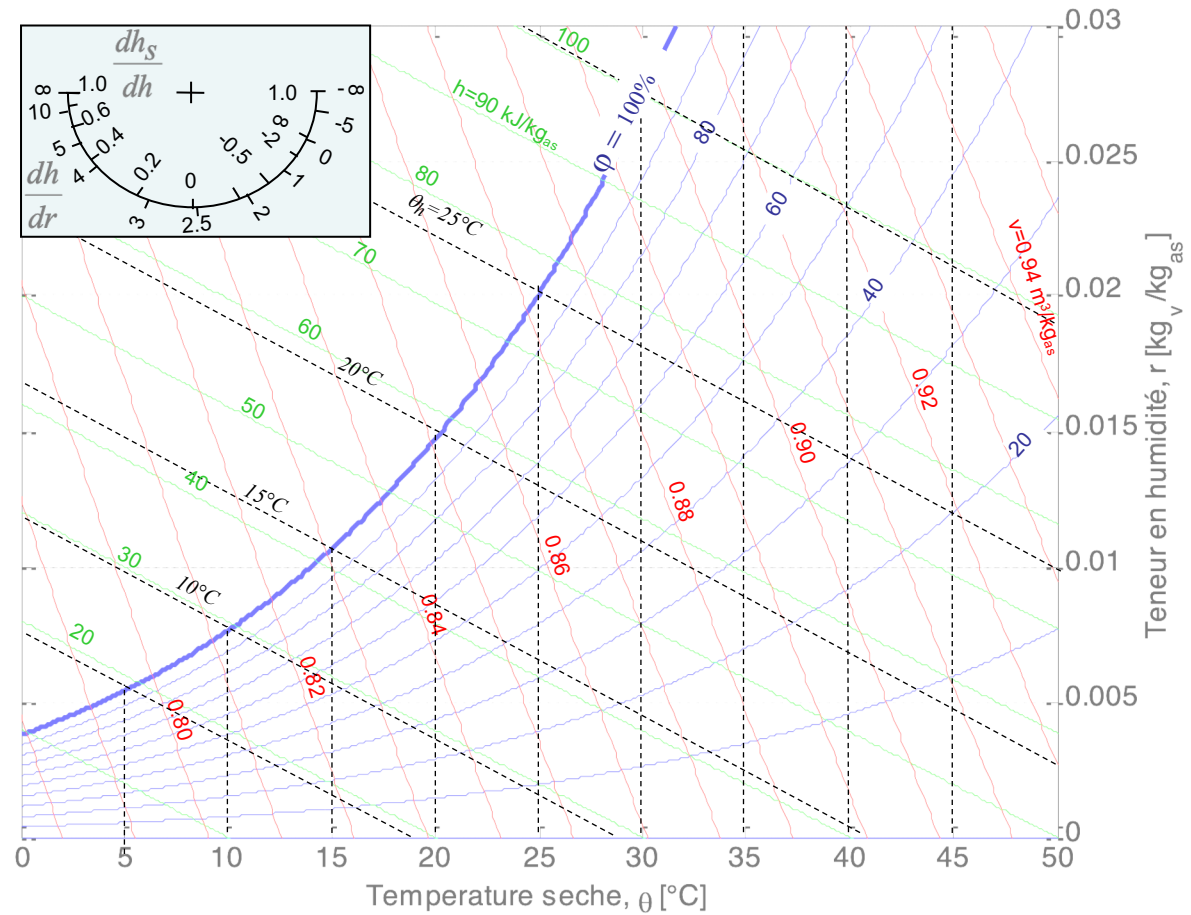
Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Confort



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

- **Problème de conditionnement de l'air**
- climatiser =
 - maintenir
 - la qualité de l'air intérieur et
 - le confort thermique
 - maîtrisant
 - débit
 - température
 - humidité de l'air de soufflage

Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

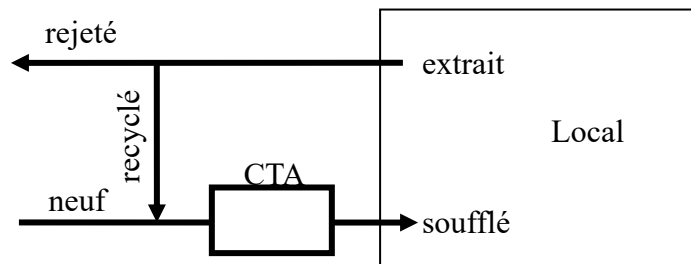
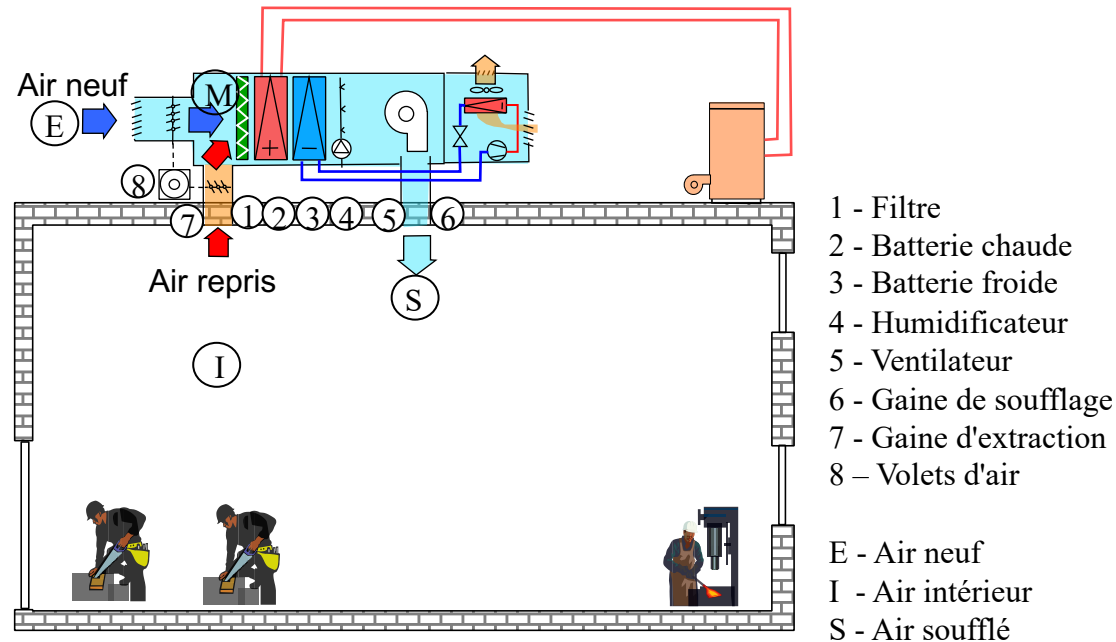
Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

• Principe



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

- **Problèmes :**

1. Quelles sont les **conditions de l'air de soufflage** pour que l'air intérieur soit maintenu aux paramètres requis dans la présence des charges variables de chaleurs sensible et latente ?
2. Quelles sont les **transformations requises** pour que l'air mélangé soit amené aux conditions de soufflage.

Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

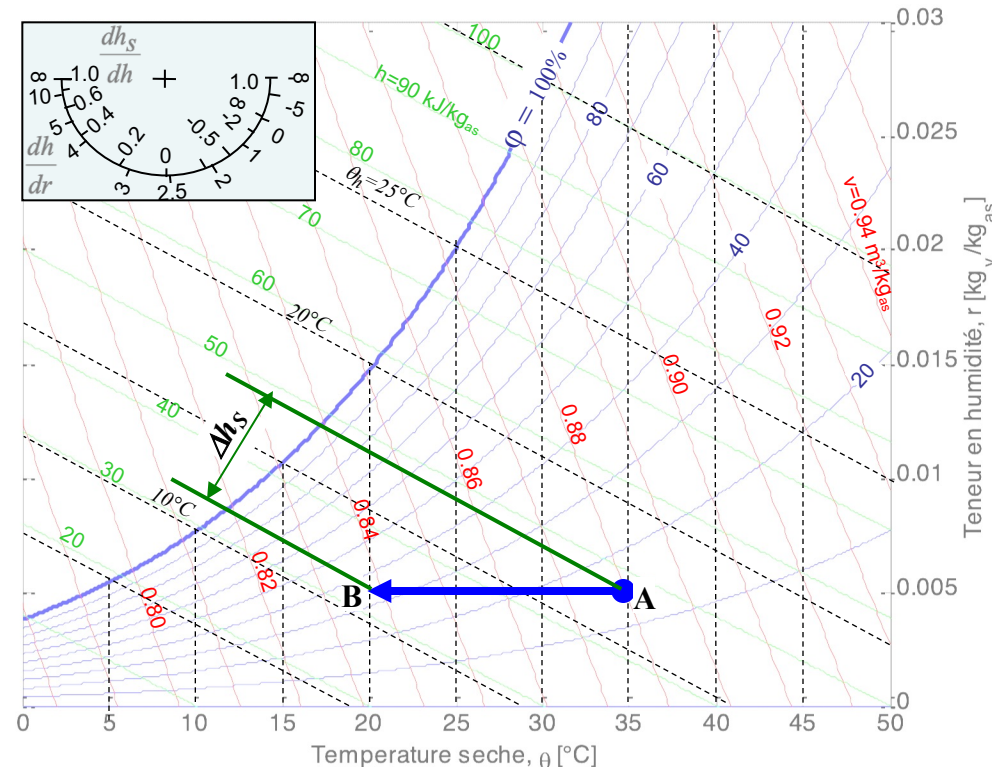
Confort

• Conditions de l'air de soufflage

- doivent compenser les échanges en chaleur et humidité de l'ambiance du local avec l'extérieur et les sources internes

• Chaleur sensible

$$\dot{Q}_s = \dot{m}_{as} h_s$$



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

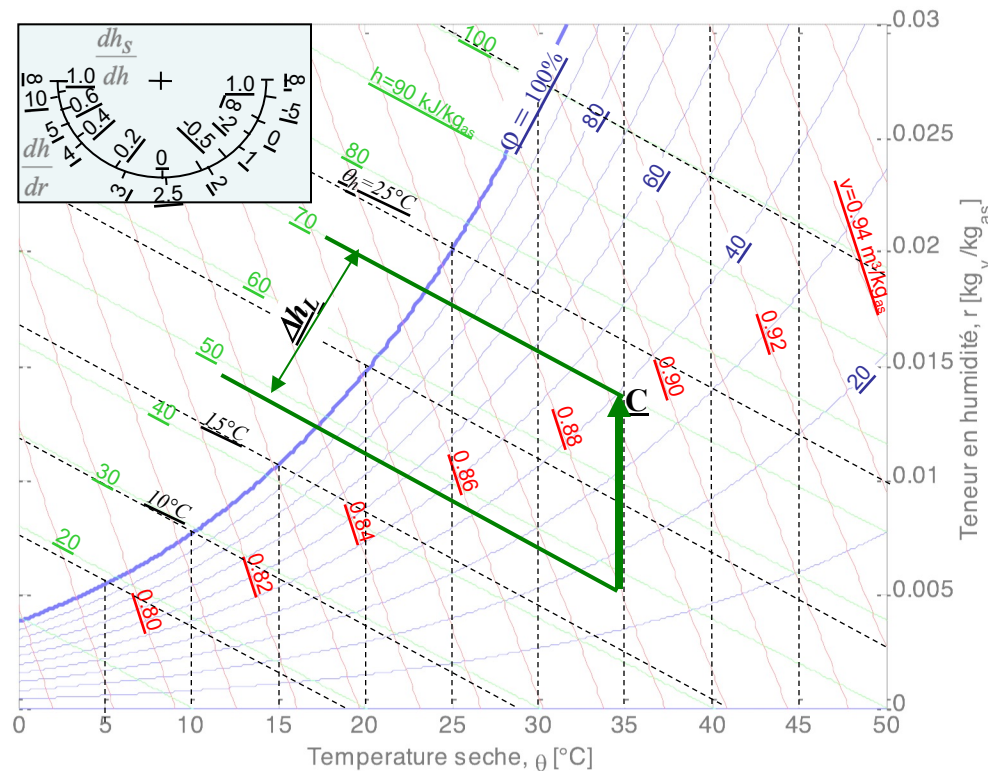
Récupération

Analyse

Confort

• Chaleur latente

$$\dot{Q}_L = \dot{m}_{as} h_L$$



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

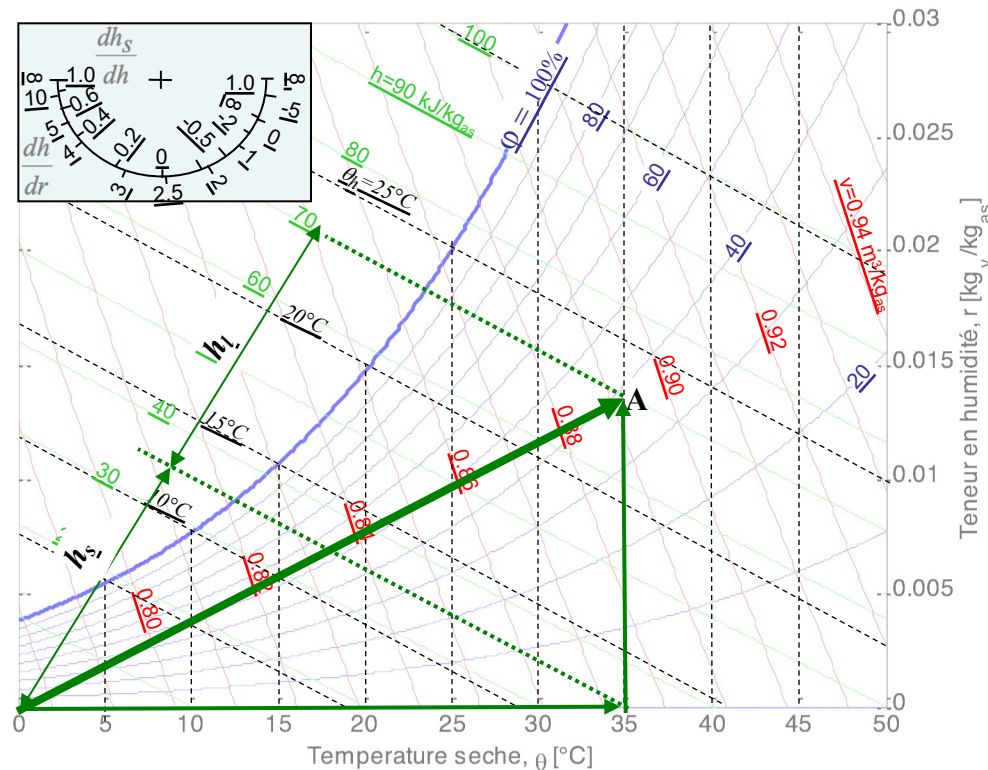
Analyse

Confort

- Chaleur totale

$$\dot{Q}_{tot} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Q}_s \\ \dot{Q}_l \end{bmatrix} = \dot{Q}_s + \dot{Q}_l$$

$$\dot{Q} = \begin{bmatrix} \dot{Q}_s \\ \dot{Q}_l \end{bmatrix} = \dot{m}_{as} \begin{bmatrix} \Delta h_s \\ \Delta h_l \end{bmatrix} = \dot{m}_{as} \begin{bmatrix} c_{as} & 0 \\ 0 & l_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta r \end{bmatrix}$$



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

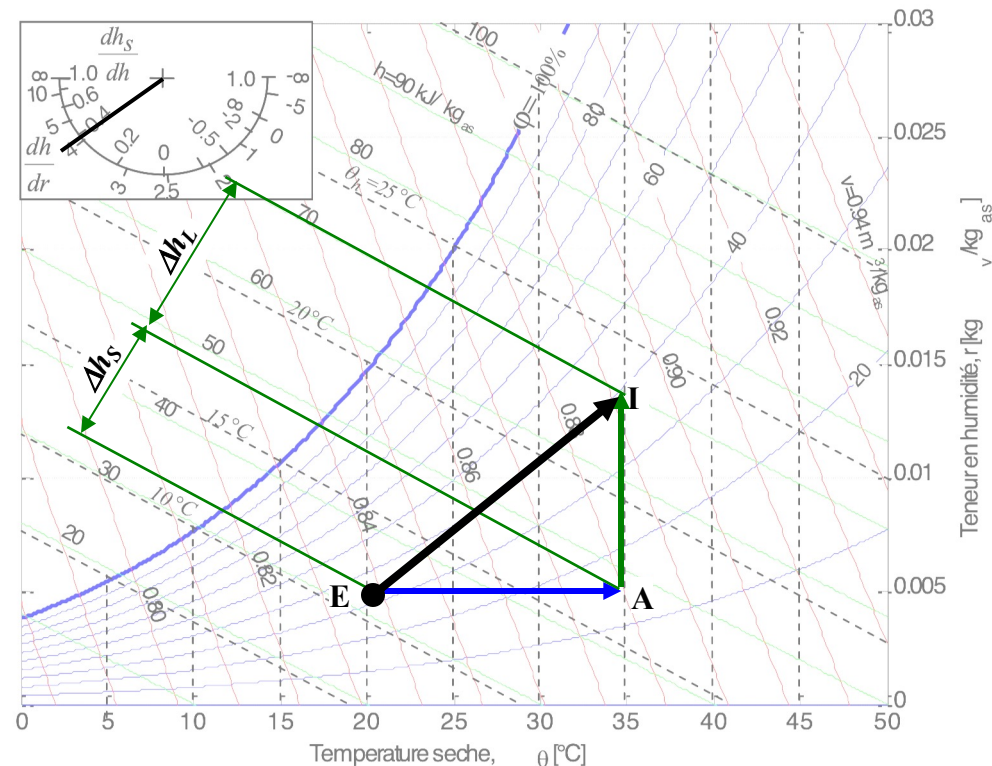
Analyse

Confort

• Changement d'état

$$\dot{H}_E = \dot{m}_{as} h_E = \dot{m}_{as} (c_{as} \theta_E + r_E (1_v + c_v \theta_E))$$

$$\dot{H}_I = \dot{m}_{as} h_I = \dot{m}_{as} (c_{as} \theta_I + r_I (1_v + c_v \theta_I))$$



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Confort

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

• Changement d'enthalpie

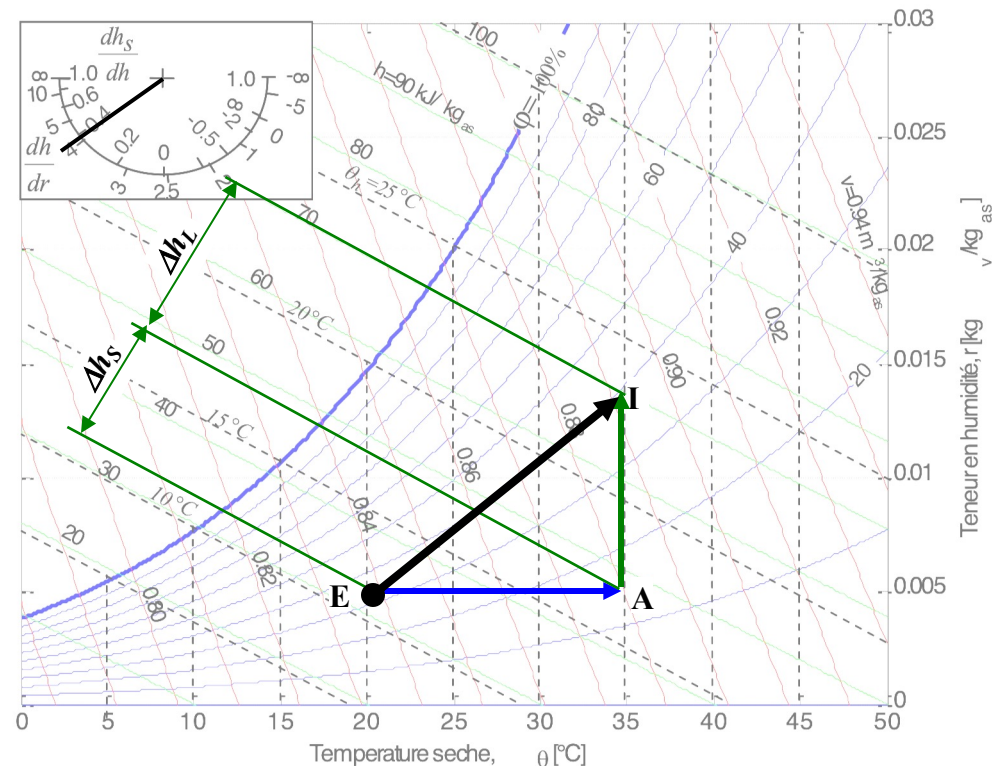
$$\dot{H}_I - \dot{H}_E = \dot{m}_{as} (h_I - h_E) = \dot{m}_{as} [(h_I - h_A) + (h_A - h_E)]$$

– chaleur sensible

$$\dot{H}_S = \dot{m}_{as} h_S = \dot{m}_{as} [c_{as} (\theta_I - \theta_E) + c_v (r_I \theta_I - r_E \theta_E)]$$

– chaleur latente

$$\begin{aligned} \dot{H}_L &= \dot{m}_{as} h_L \\ &= \dot{m}_{as} l_v (r_I - r_E) \end{aligned}$$



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

- **Changement d'enthalpie**

$$\dot{H}_I - \dot{H}_E = \dot{m}_{as} (h_I - h_E) = \dot{m}_{as} [(h_I - h_A) + (h_A - h_E)]$$

– chaleur sensible

$$\begin{aligned}\Delta \dot{H}_S &= \dot{m}_{as} \Delta h_S \\ &= \dot{m}_{as} [c_{as} (\theta_I - \theta_E) + c_v (r_I \theta_I - r_E \theta_E)] \\ &\cong \dot{m}_{as} c_{as} (\theta_I - \theta_E) = \dot{m}_{as} c_{as} \Delta \theta\end{aligned}$$

– chaleur latente

$$\Delta \dot{H}_L = \dot{m}_{as} h_L = \dot{m}_{as} l_v (r_I - r_E) = \dot{m}_{as} l_v \Delta r$$

$$\Delta \dot{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} \Delta \dot{H}_s \\ \Delta \dot{H}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{as} & 0 \\ 0 & l_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta r \end{bmatrix}$$

Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

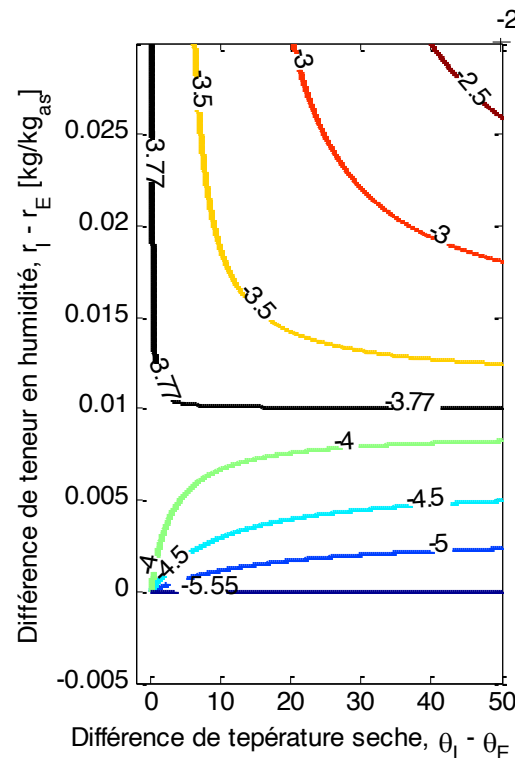
Analyse

Confort

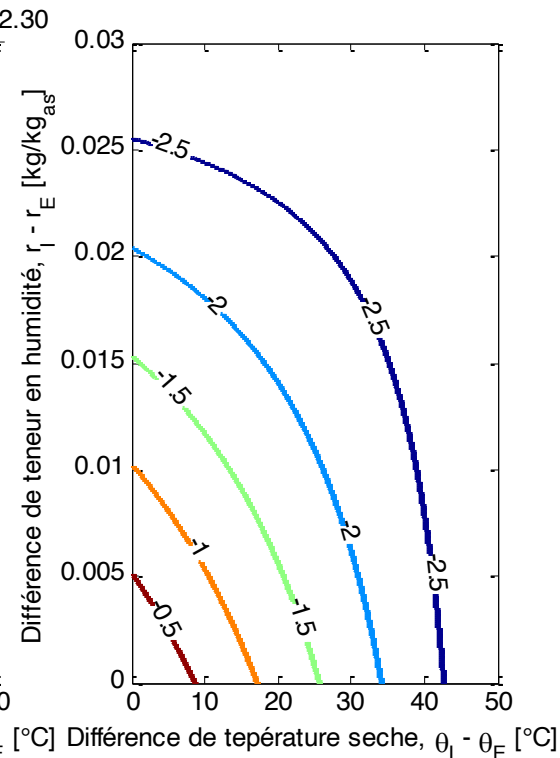
• Erreur introduite

- dans le domaine de variation des paramètres de l'air, l'erreur introduite en négligeant la chaleur sensible des vapeurs d'eau est inférieure à 5.5% en valeur relative

a) pourcentage



b) valeur absolue en kJ/kg.



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

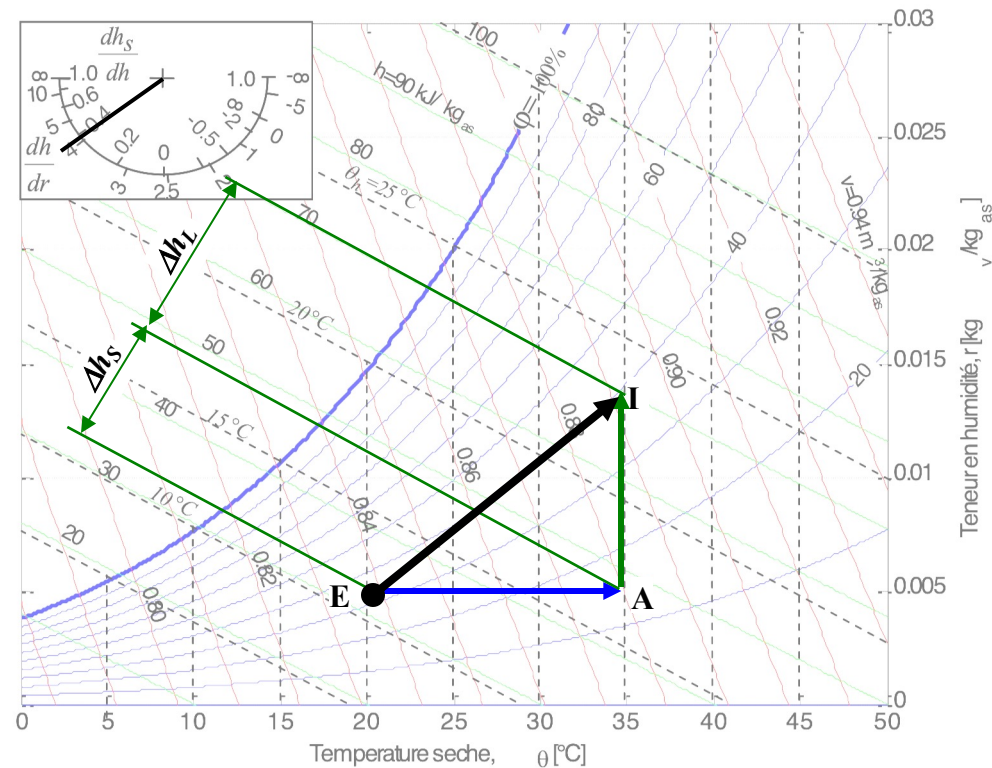
Récupération

Analyse

Confort

- Caractéristique de la transformation

$$\gamma = \frac{\Delta h}{\Delta r} = \frac{h_I - h_E}{r_I - r_E}$$



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissemnt

Humidification

Déshumdif.

Récupération

Analyse

Confort

- Charges dues à l'environnement

Chaleur :	Hiver		Été	
	sensible	latente	sensible	latente
Charges externes				
Parois opaques	< 0	$\cong 0$	> 0	$\cong 0$
Parois vitrées	< 0 ou > 0	0	> 0	0
Perméabilité	< 0	< 0	> 0	> 0
Charges internes				
Occupants	> 0	> 0	> 0	> 0
Eclairage	> 0	0	> 0	0
Appareils	> 0	< 0 ou > 0	> 0	< 0 ou > 0

Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

- **Charges dues à l'environnement**

- **dimensionnement :**

- puissance installée doit être suffisante pour compenser les charges maximales;
- calcul des charges en **régime statique** pour les **conditions de base** qui conduit aux charges maximales.

- **contrôle / régulation :**

- le système de climatisation doit compenser à tout instant les charges. Il faut donc que par le passage de l'état de soufflage S à l'état intérieur I , l'air soufflé apporte à l'ambiance la chaleur sensible et latente égale, au signe près, aux charges;
- calcul en **régime dynamique** qui demande une optimisation.

Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

- **Droite de soufflage**
- **Conditions de soufflage** de l'air humide sont généralement dictées par :
 - **débit** - taux de brassage à respecter
 - **paramètres (température et humidité)** - considérations de confort (8 – 12 K au-dessous de l'ambiance et de 10 – 20 K en-dessus)

nécessaires pour équilibrer les apports en énergie et humidité et évacuer l'air aux paramètres requis.

Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

- bilan de masse d'air sec

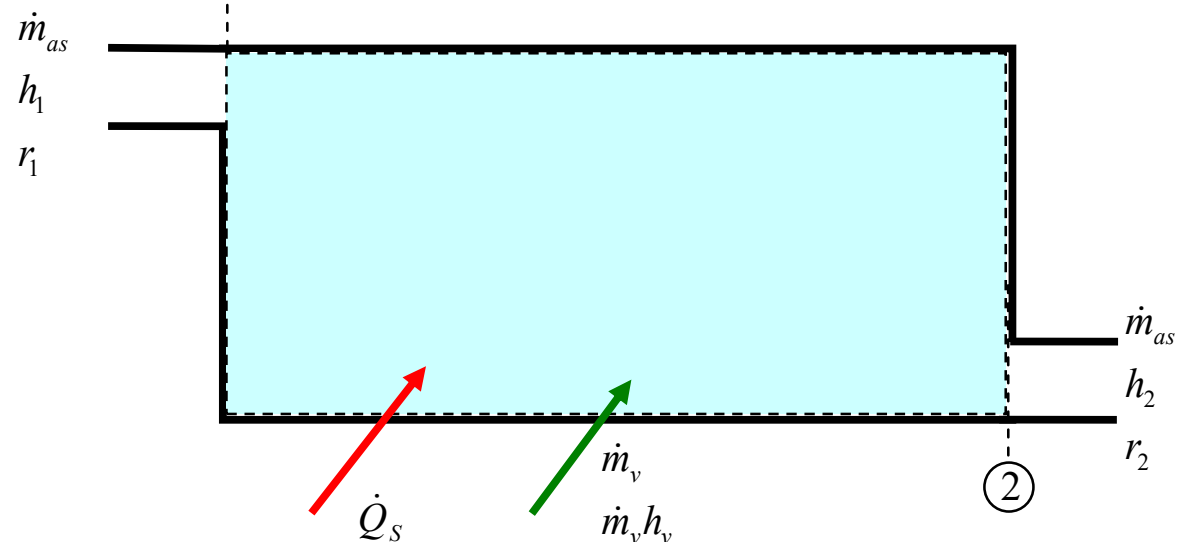
$$\dot{m}_{as,1} = \dot{m}_{as,2}$$

- bilan de masse de vapeur

$$r_1 \dot{m}_{as,1} + \dot{m}_v = r_2 \dot{m}_{as,2}$$

- bilan d'enthalpie

$$\dot{m}_{as1} h_1 + \underset{\textcircled{1}}{\dot{Q}_S} + \dot{m}_v h_v = \dot{m}_{as2} h_2$$



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

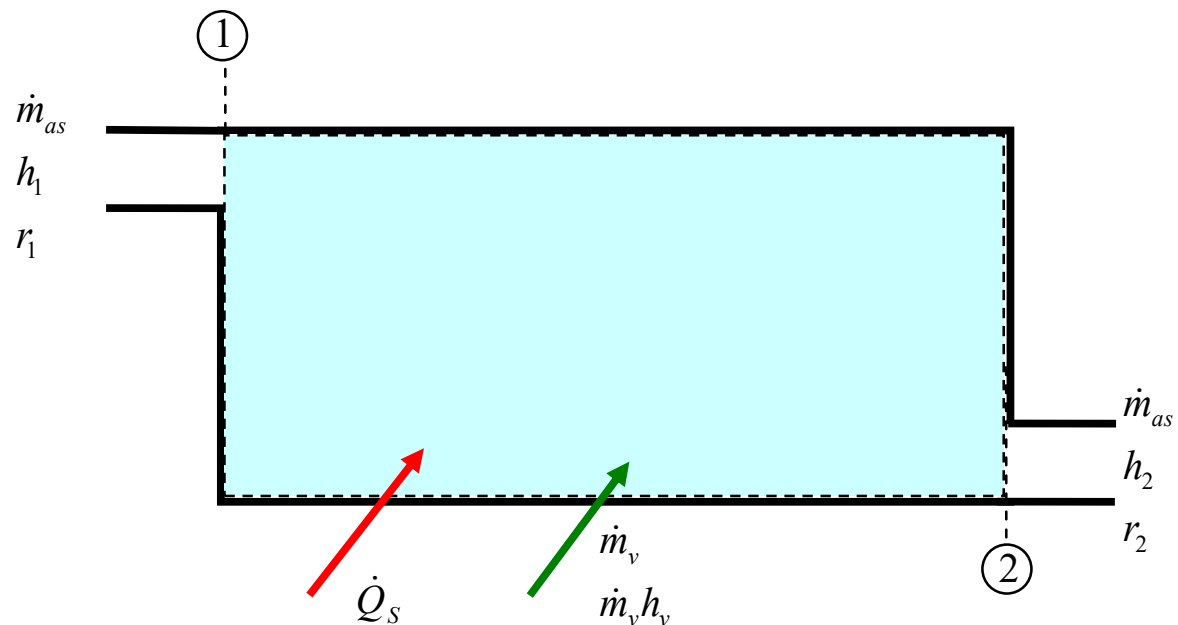
Analyse

Confort

$$\dot{m}_{as1} = \dot{m}_{as2} = \dot{m}_{as}$$

$$\dot{Q}_s + \dot{m}_v h_v = \dot{m}_{as} (h_2 - h_1)$$

$$\underbrace{\dot{Q}_s + \dot{Q}_l}_{\text{Charges}} = \underbrace{\dot{m}_{as} (h_I - h_S)}_{\text{Air humide}}$$



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

• Caractéristique de la transformation

$$\frac{h_2 - h_1}{r_2 - r_1} \equiv \frac{\Delta h}{\Delta r} = \frac{\dot{Q}_s + \dot{m}_v h_v}{\dot{m}_v}$$

– chaleur sensible

$$\dot{Q}_s = \dot{m}_{as} c_{as} (\theta_{eq} - \theta_2) \equiv \dot{m}_{as} c_{as} \Delta \theta$$

– chaleur latente

$$\dot{m}_v = (r_{eq} - r_2) \dot{m}_{as} = \dot{m}_{as} \Delta r$$

• Droite de soufflage

$$\frac{\Delta h}{\Delta r} = c_{as} \frac{\Delta \theta}{\Delta r} + h_v$$

Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

• Droite de soufflage

– Charges constantes :

$$\frac{\dot{Q}_s + \dot{m}_v h_v}{\dot{m}_v} = \frac{h_2 - h_1}{r_2 - r_1} \equiv \frac{\Delta h}{\Delta r} = \text{ct}$$

$$\frac{\Delta h}{\Delta r} = c_{as} \frac{\Delta \theta}{\Delta r} + h_v \qquad \Delta r = c_{as} \frac{\Delta r}{\Delta h} \Delta \theta + h_v$$

– Charges et conditions intérieures constantes :

$$\dot{Q}_s + \dot{Q}_l = \dot{m}_{as} (h_I - h_S)$$

↓ $\dot{Q}_s, \dot{Q}_l, \theta_I, r_I \text{ const.}$

$$\dot{Q}_s + \dot{Q}_l = \dot{m}_{as} [c_{as} \theta_I + r_I (1_v + c_v \theta_I) - c_{as} \theta_S - r_S (1_v + c_v \theta_S)]$$

Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

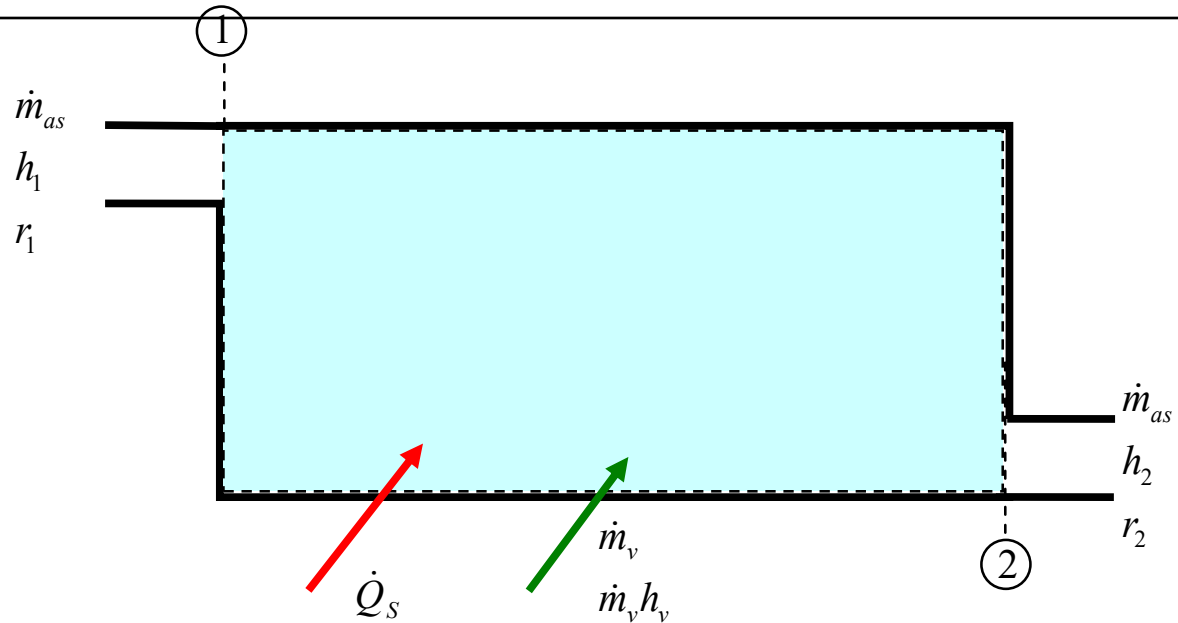
Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort



bilan d'enthalpie

$$0 = \dot{m}_{as} \mathbf{h}_I - \dot{m}_{as} \mathbf{h}_S + \dot{Q}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \dot{m}_{as} \begin{bmatrix} c_{as} & 0 \\ 0 & l_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_I \\ r_I \end{bmatrix} - \dot{m}_{as} \begin{bmatrix} c_{as} & 0 \\ 0 & l_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_S \\ r_S \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{Q}_s \\ \dot{Q}_l \end{bmatrix}$$

Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

$$0 = \dot{m}_{as} \mathbf{h}_I - \dot{m}_{as} \mathbf{h}_S + \dot{\mathbf{Q}}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \dot{m}_{as} \begin{bmatrix} c_{as} & 0 \\ 0 & l_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_I \\ r_I \end{bmatrix} - \dot{m}_{as} \begin{bmatrix} c_{as} & 0 \\ 0 & l_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_S \\ r_S \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{Q}_s \\ \dot{Q}_l \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \theta_S \\ r_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_I \\ r_I \end{bmatrix} + \frac{1}{\dot{m}_{as}} \begin{bmatrix} c_{as} & 0 \\ 0 & l_v \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{Q}_s \\ \dot{Q}_l \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \theta_S \\ r_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_I \\ r_I \end{bmatrix} + \frac{1}{\dot{m}_{as}} \begin{bmatrix} 1/c_{as} & 0 \\ 0 & 1/l_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Q}_s \\ \dot{Q}_l \end{bmatrix}$$

Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

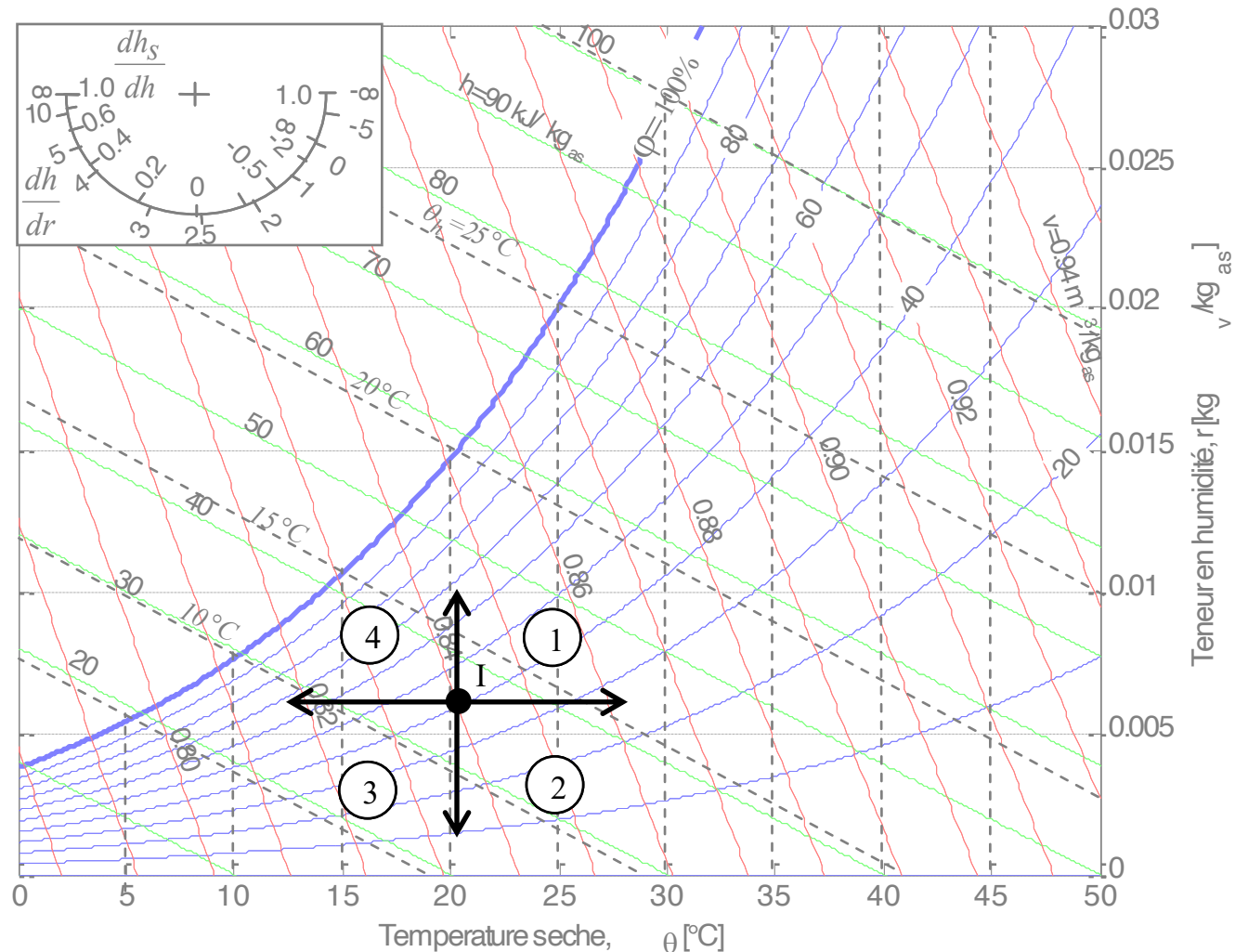
Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

- Domaines possibles de la droite de soufflage



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissemnt

Humidification

Déshumdif.

Récupération

Analyse

Confort

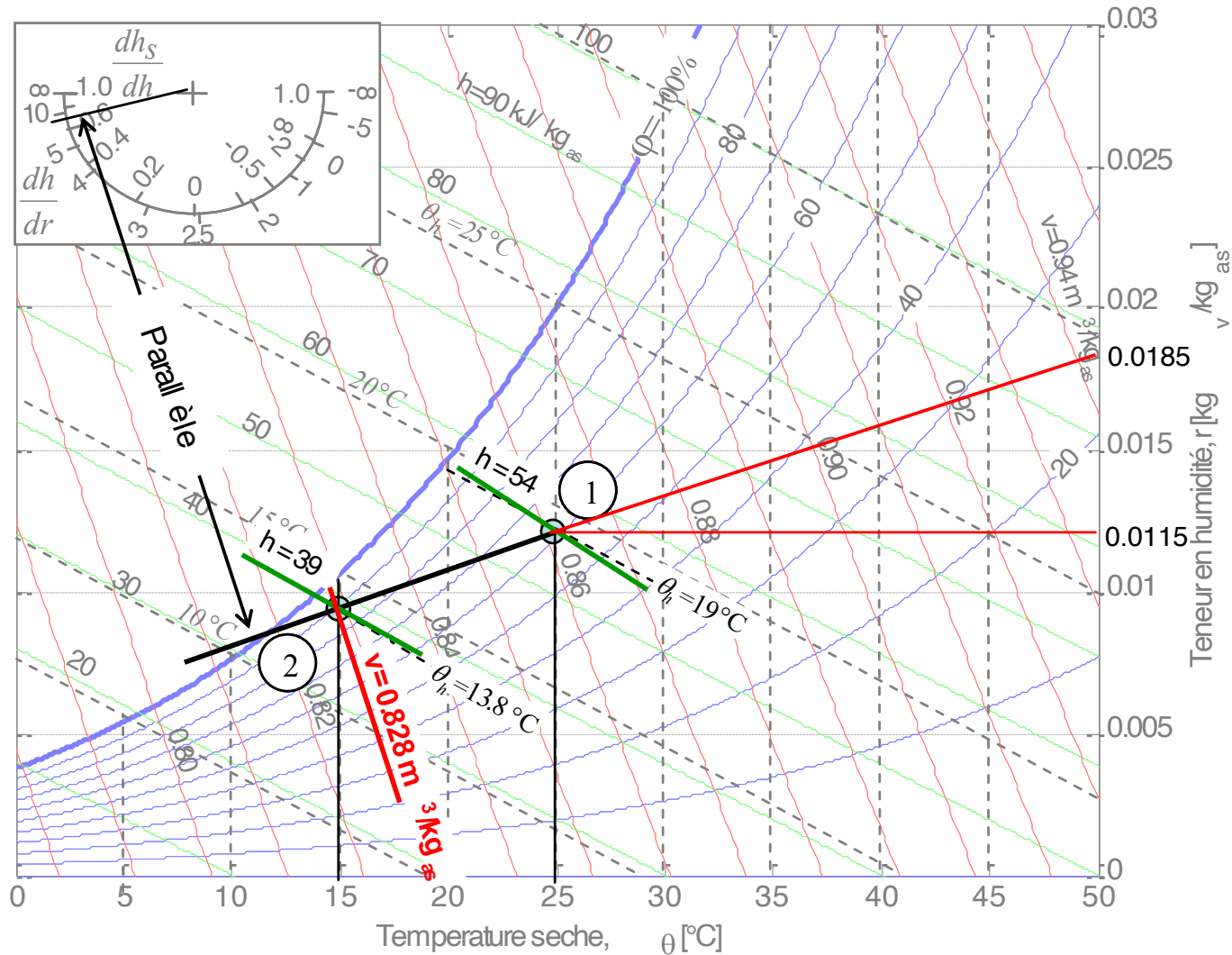
- Domaines possibles de la droite de soufflage

Cadran	Charges		Type de conditionnement		Remarques
	Sensible	Latente			
1	<0	<0	Chauffage humidification	et	Climatisation typique d'hiver lorsque les charges internes latentes sont petites
2	<0	>0	Chauffage déshumidification	et	Climatisation d'hiver lorsque les charges internes latentes sont grandes
3	>0	>0	Refroidissement déshumidification	et	Climatisation typique d'été
4	>0	<0	Refroidissement humidification	et	Cas très rare

Transformations de l'air humide

Climatisation

- Exemple



Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

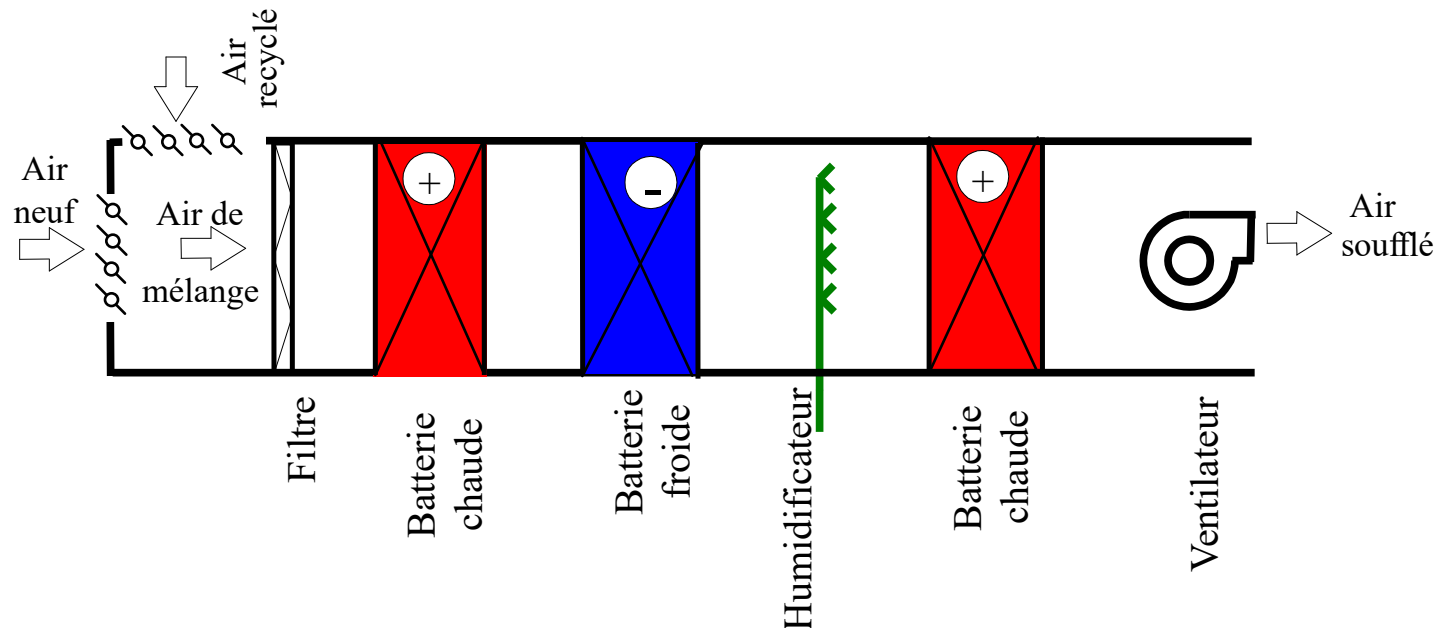
Analyse

Confort

• Centrale de traitement de l'air

- conservation de l'énergie
- conservation de la masse

(valeurs moyennes sur les surfaces de contrôle)



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

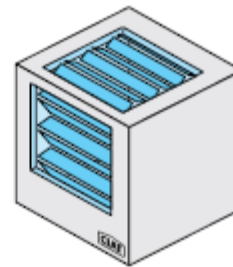
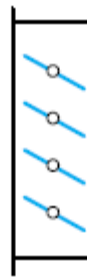
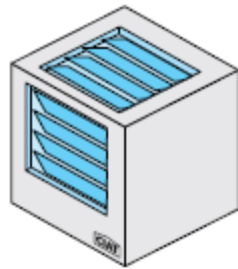
Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

- **Mélange**



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

- **Mélange adiabatique**

- bilan d'énergie (enthalpie)

$$\dot{m}_{as1} h_1 + \dot{m}_{as2} h_2 = \dot{m}_{as3} h_3$$

- bilan de masse d'air sec

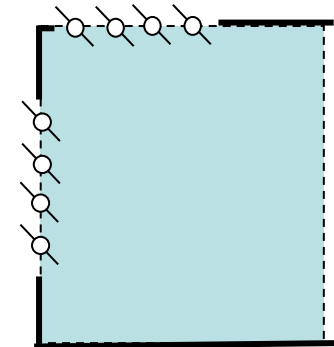
$$\dot{m}_{as1} + \dot{m}_{as2} = \dot{m}_{as3}$$

- bilan de masse de vapeurs

$$r_1 \dot{m}_{as1} + r_2 \dot{m}_{as2} = r_3 \dot{m}_{as3}$$

$$\dot{m}_{as2}, h_2, r_2$$

$$\begin{matrix} \dot{m}_{as1} \\ h_1 \\ r_1 \end{matrix}$$



$$\begin{matrix} \dot{m}_{as3} \\ h_3 \\ r_3 \end{matrix}$$

Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

• Mélange adiabatique

– en éliminant $\dot{m}_{as3}$

$$\frac{h_2 - h_3}{h_3 - h_1} = \frac{r_2 - r_3}{r_3 - r_1} = \frac{\dot{m}_{as1}}{\dot{m}_{as2}}$$

– point 3 se trouve sur l'hypoténuse du triangle rectangle formé par les point 1 et 2 et ayant l'angle droit déterminé par $\theta = \text{ct}$ et $r = \text{ct}$.

$$h_3 = \frac{\frac{\dot{m}_{as1}}{\dot{m}_{as2}} h_1 + h_2}{\frac{\dot{m}_{as1}}{\dot{m}_{as2}} + 1}$$

$$r_3 = \frac{\frac{\dot{m}_{as1}}{\dot{m}_{as2}} r_1 + r_2}{\frac{\dot{m}_{as1}}{\dot{m}_{as2}} + 1}$$

$$\theta_3 = \frac{\frac{\dot{m}_{as1}}{\dot{m}_{as2}} \theta_1 + \theta_2}{\frac{\dot{m}_{as1}}{\dot{m}_{as2}} + 1}$$

Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

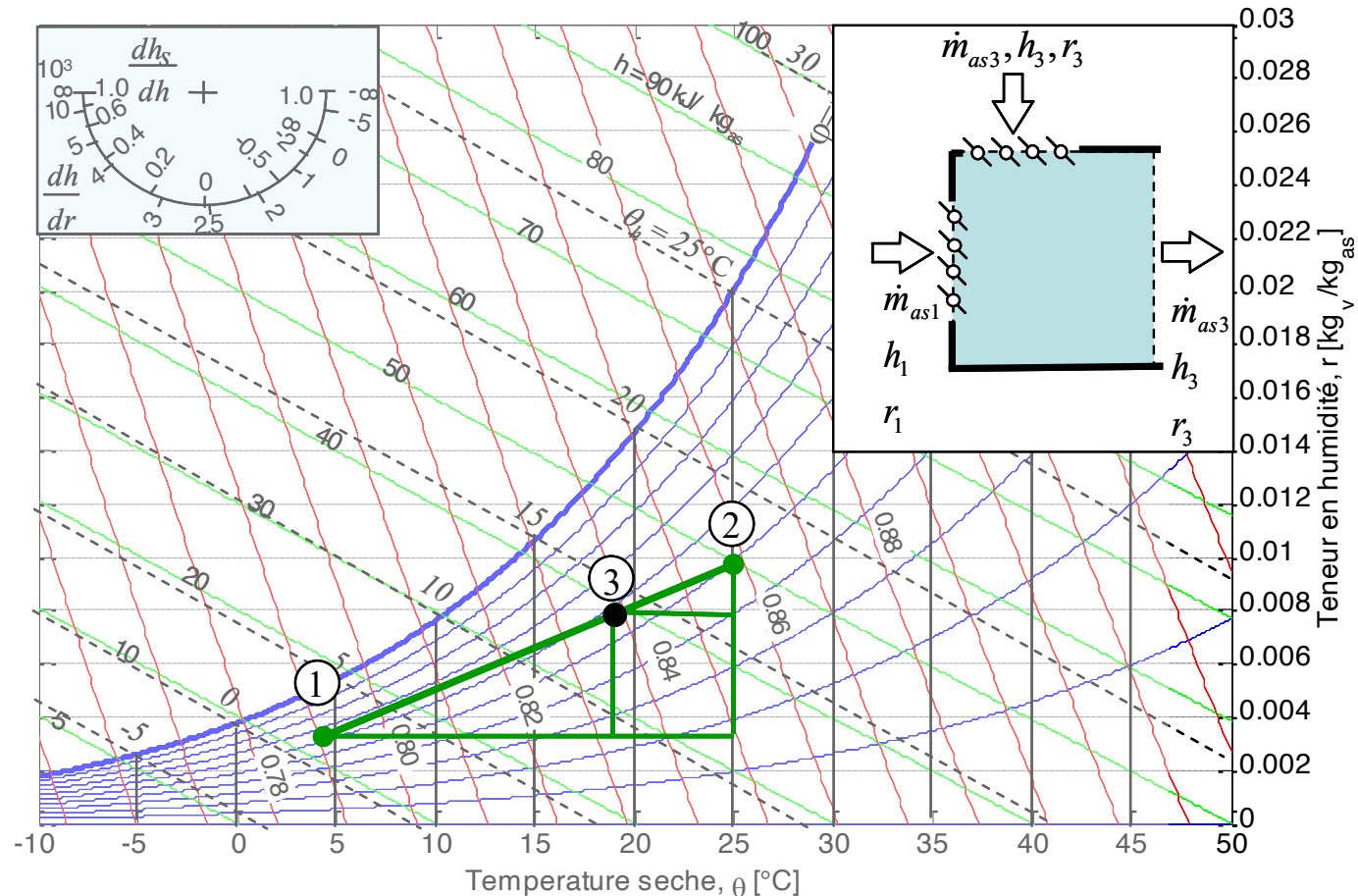
Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

- Mélange adiabatique



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

• Mélange adiabatique

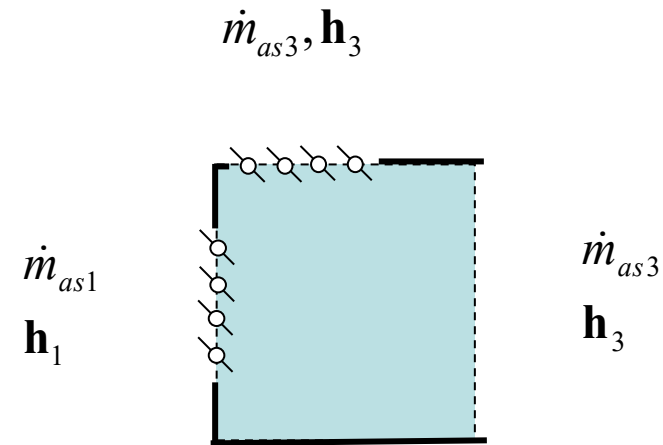
$$0 = \dot{m}_{as1} \mathbf{h}_1 + \dot{m}_{as2} \mathbf{h}_2 - \dot{m}_{as3} \mathbf{h}_3$$

$$0 = \dot{m}_{as1} + \dot{m}_{as2} - \dot{m}_{as3}$$

$$(\dot{m}_{as1} + \dot{m}_{as2}) \mathbf{h}_3 = \dot{m}_{as1} \mathbf{h}_1 + \dot{m}_{as2} \mathbf{h}_2$$

$$(\dot{m}_{as1} + \dot{m}_{as2}) \begin{bmatrix} c_{as} & 0 \\ 0 & l_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_3 \\ r_3 \end{bmatrix} = \dot{m}_{as1} \begin{bmatrix} c_{as} & 0 \\ 0 & l_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ r_1 \end{bmatrix} + \dot{m}_{as2} \begin{bmatrix} c_{as} & 0 \\ 0 & l_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_2 \\ r_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \theta_3 \\ r_3 \end{bmatrix} = \frac{\dot{m}_{as1}}{\dot{m}_{as1} + \dot{m}_{as2}} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ r_1 \end{bmatrix} + \frac{\dot{m}_{as2}}{\dot{m}_{as1} + \dot{m}_{as2}} \begin{bmatrix} \theta_2 \\ r_2 \end{bmatrix}$$



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

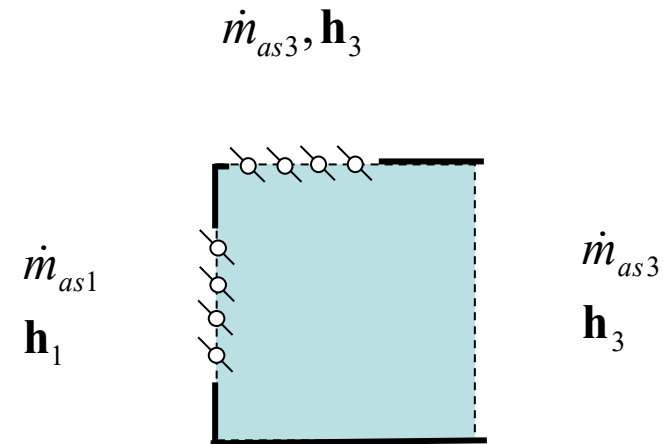
Analyse

Confort

• Mélange adiabatique

$$0 = \dot{m}_{as1} \mathbf{h}_1 + \dot{m}_{as2} \mathbf{h}_2 - \dot{m}_{as3} \mathbf{h}_3$$

$$0 = \dot{m}_{as1} + \dot{m}_{as2} - \dot{m}_{as3}$$



$$\begin{bmatrix} \theta_3 \\ r_3 \end{bmatrix} = \frac{\dot{m}_{as1}}{\dot{m}_{as3}} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ r_1 \end{bmatrix} + \left(1 - \frac{\dot{m}_{as1}}{\dot{m}_{as3}} \right) \begin{bmatrix} \theta_2 \\ r_2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{z} = a\mathbf{x} + (1 - a)\mathbf{y}$$

Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Confort

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

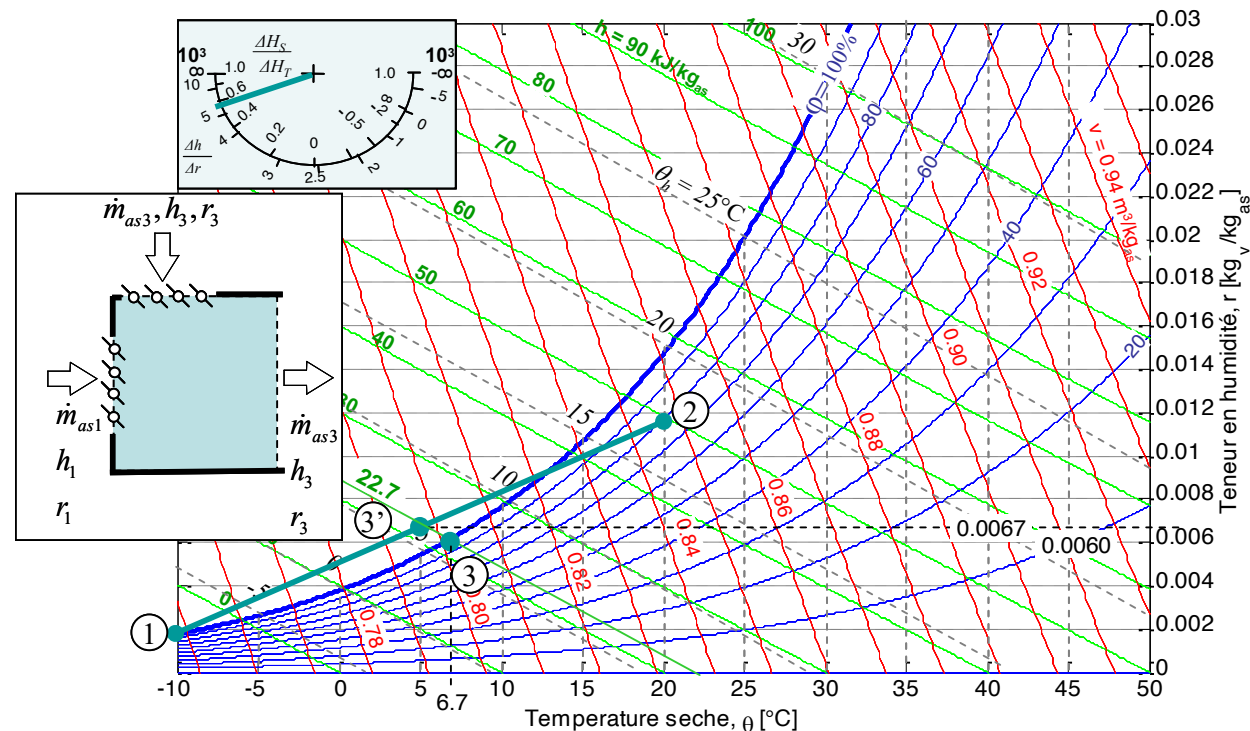
Humidification

Déshumidif.

Récupération

• Mélange en zone de brouillard

- Le point de mélange à une température **positive** dans la zone de saturation
- L'eau condensée peut se déposer sur les parois du caisson
- L'air extérieur doit être chauffé avant d'être mélangé.



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Confort

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

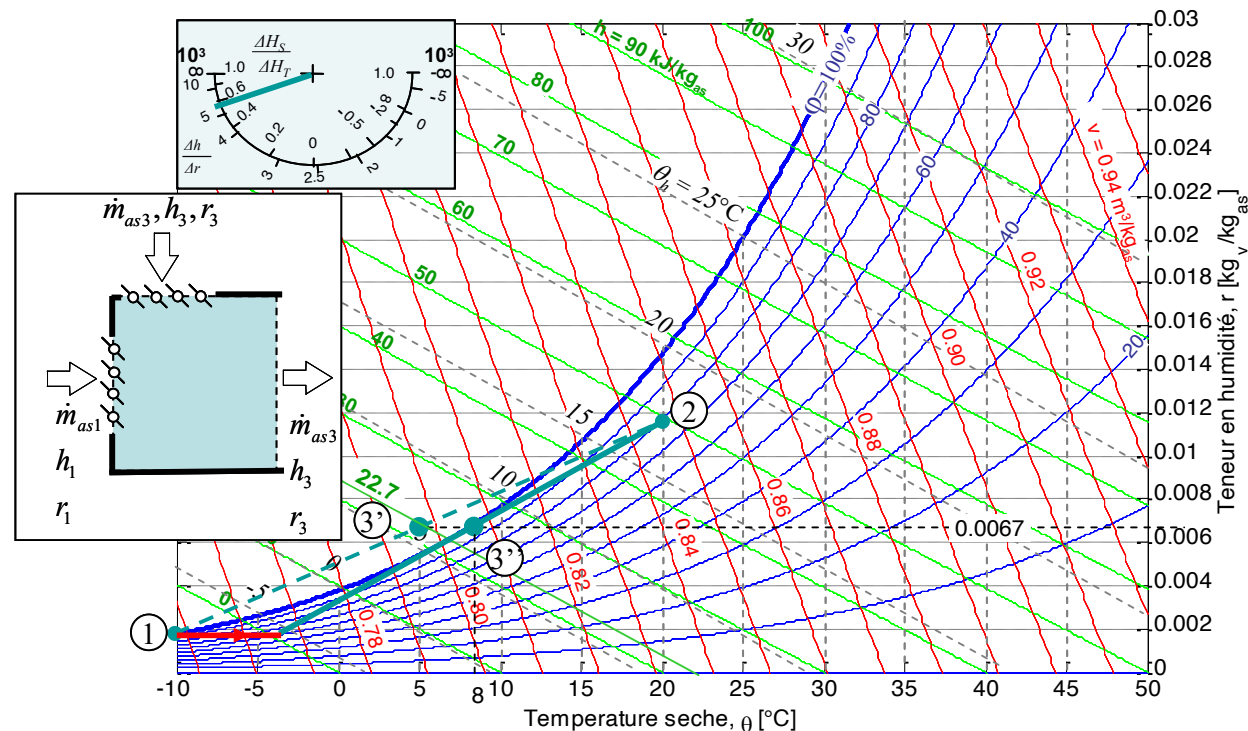
Humidification

Déshumidif.

Récupération

• Mélange en zone de givre

- Le point de mélange à une température **négative** dans la zone de saturation
- L'eau contenue dans l'air sous forme des cristaux peut se déposer sur les parois du caisson
- L'air extérieur doit être chauffé avant d'être mélangé.



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

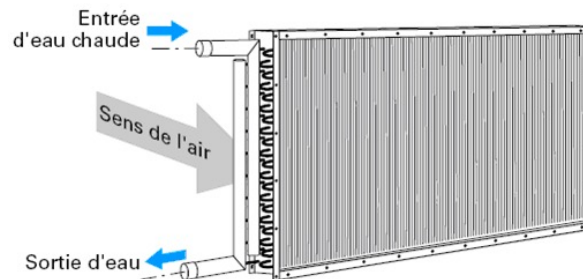
Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

- **Chauffage**



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

• Chauffage

- bilan d'énergie

$$\dot{m}_{as} h_1 + q = \dot{m}_{as} h_2$$

La partie de l'image avec l'ID de relation rld22 n'a pas été trouvée dans le fichier.

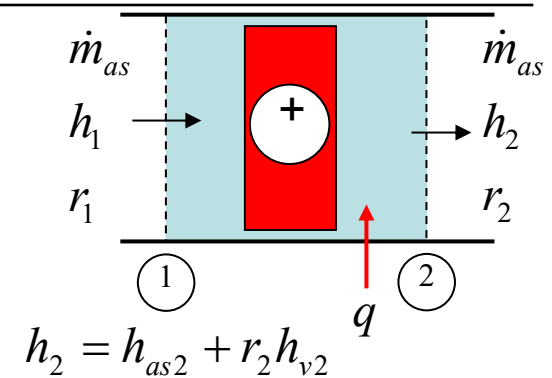
- bilan de masse de vapeur

$$\dot{m}_{as} r_1 = \dot{m}_{as} r_2$$

$$r_1 = r_2 = r$$

$$\rightarrow \dot{Q} = \dot{m}_{as} c_{ah} (\theta_2 - \theta_1)$$

$$c_{ah} = c_{as} + r c_v \cong 1.02 \text{ kJ/kg}$$



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

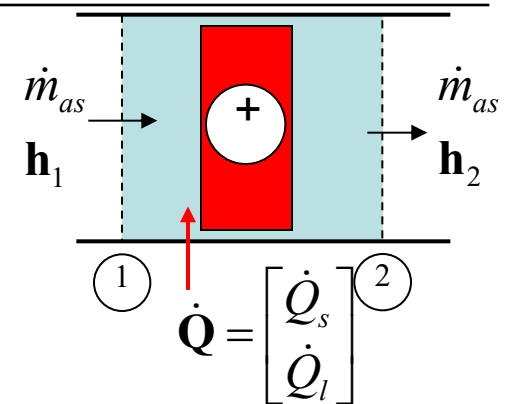
Récupération

Analyse

Confort

- **Chauffage**

$$0 = \dot{H}_1 - \dot{H}_2 + \dot{Q}$$



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

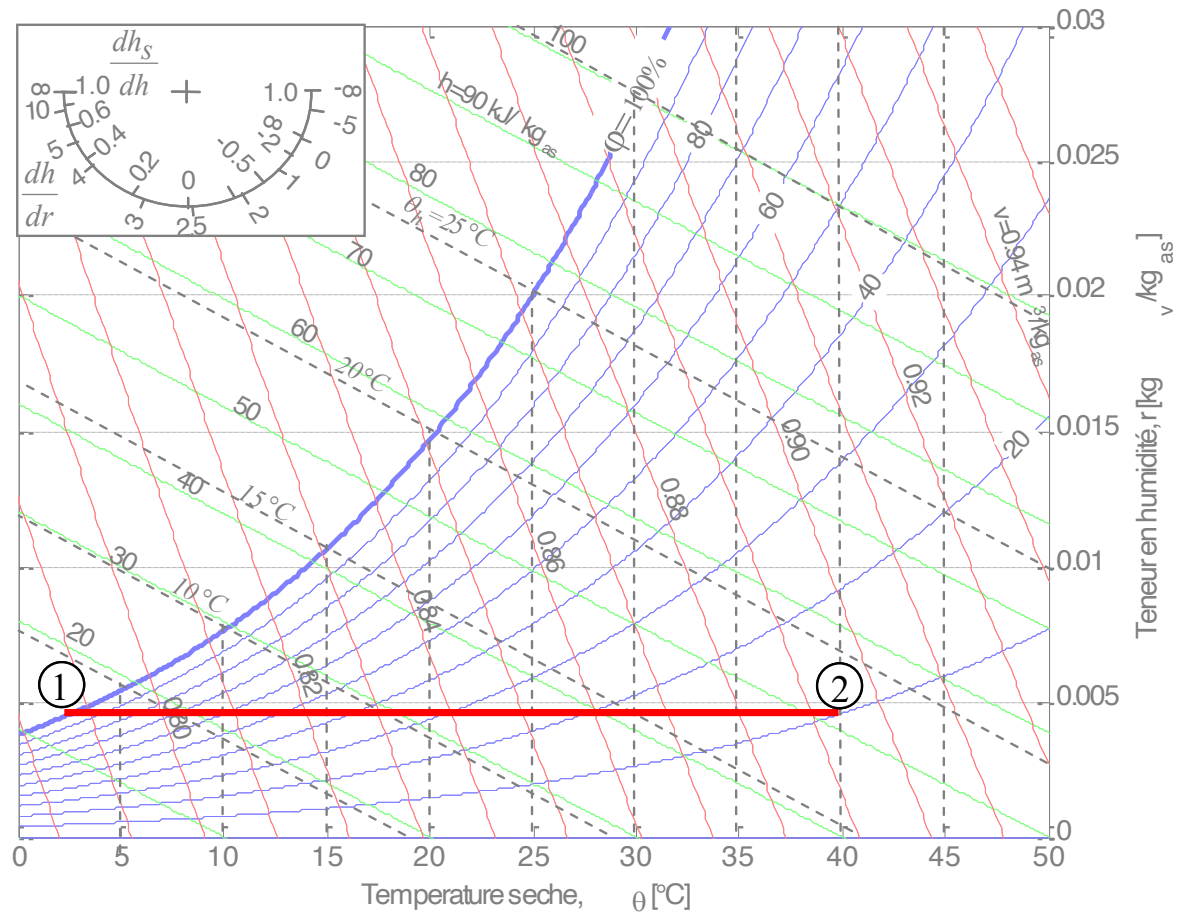
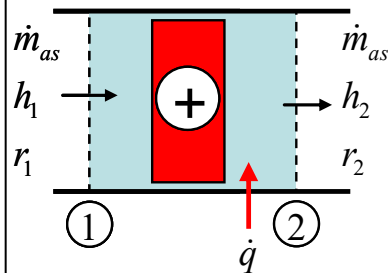
Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

• Chauffage



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

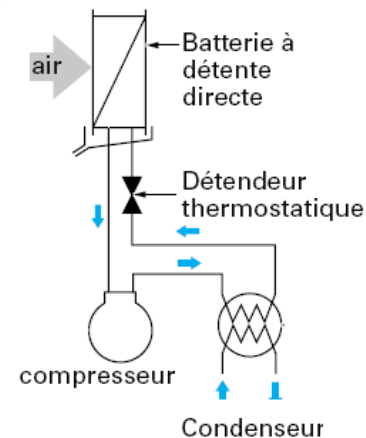
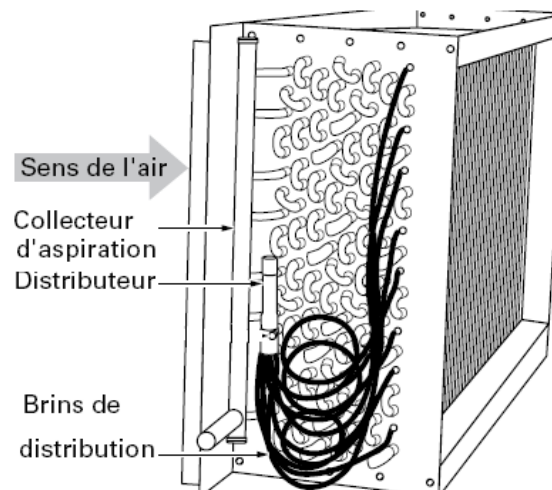
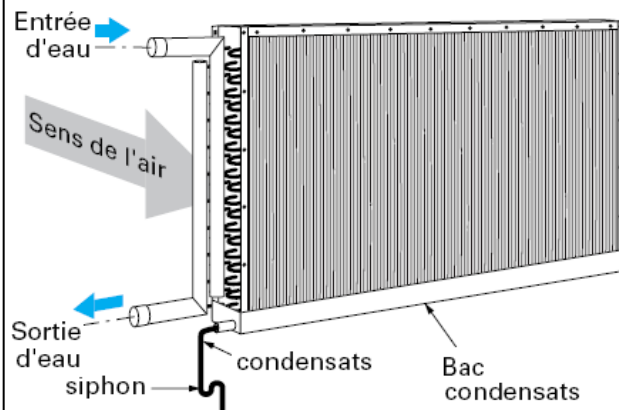
Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

• Refroidissement



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumdif.

Récupération

Analyse

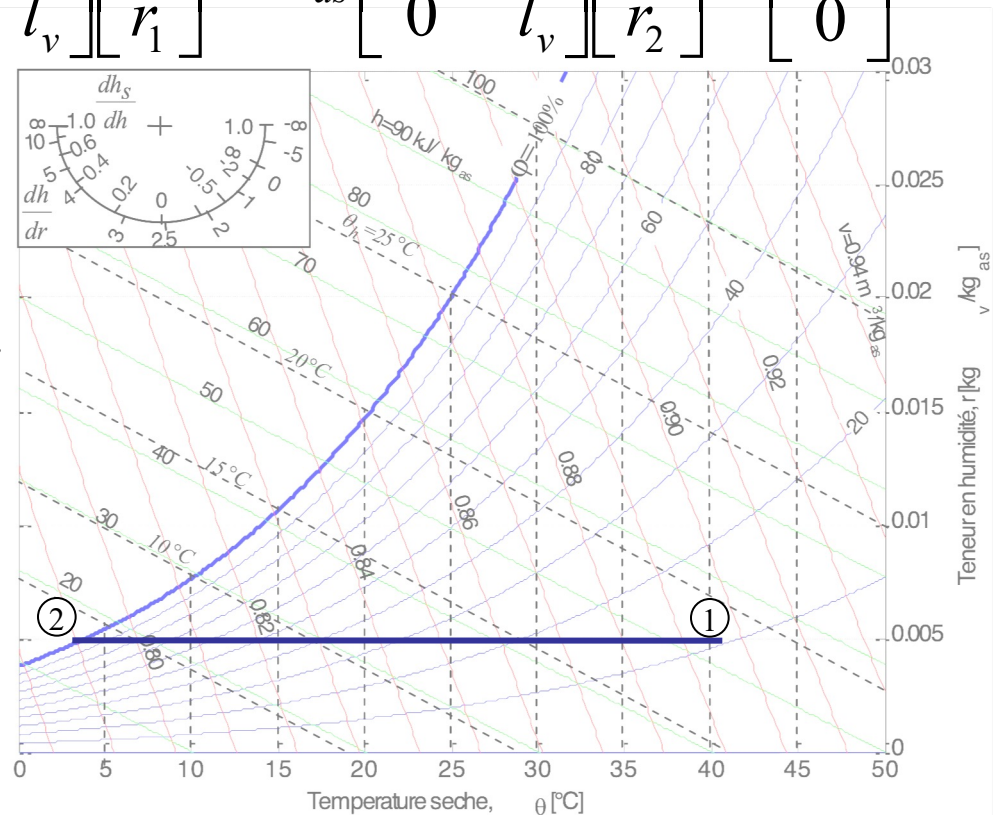
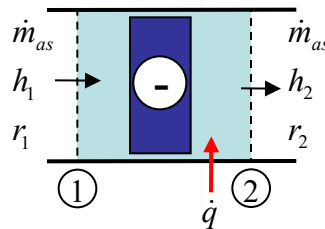
Confort

- **Refroidissement simple**

- à l'humidité spécifique constante

$$\mathbf{0} = \dot{\mathbf{H}}_1 - \dot{\mathbf{H}}_2 + \dot{\mathbf{Q}}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \dot{m}_{as} \begin{bmatrix} c_{as} & 0 \\ 0 & l_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ r_1 \end{bmatrix} - \dot{m}_{as} \begin{bmatrix} c_{as} & 0 \\ 0 & l_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_2 \\ r_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{Q}_s \\ 0 \end{bmatrix}$$



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

• Refroidissement avec déshumidification

- une partie de l'air est refroidi à une température inférieure à la température de rosée
- la batterie ne peut pas refroidir à sa température tout l'air qui la traverse
 - une partie du débit d'air est amenée à la saturation à la température de la batterie
 - une partie du débit contourne la batterie sans changer de température $b\dot{m}_{as}$

- Le facteur de by-pass $b = \frac{\theta_2 - \theta_h}{\theta_1 - \theta_h}$

- La valeur du facteur de by-pass est liée à l'efficacité de la batterie

$$\varepsilon = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\theta_1 - \theta_h} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_h} = \frac{r_1 - r_2}{r_1 - r_h} \quad \varepsilon = 1 - b$$

Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

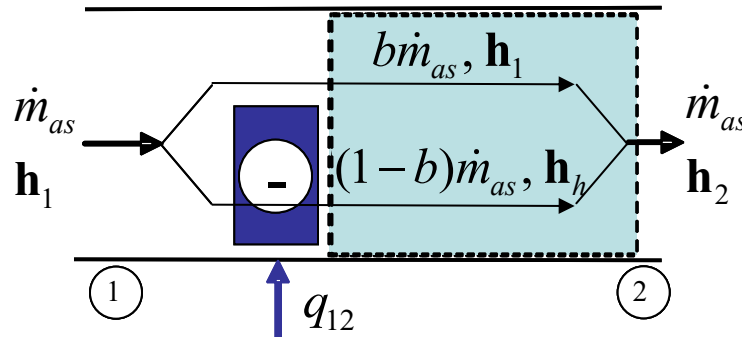
Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

• Refroidissement avec déshumidification



$$0 = b\dot{m}_{as} \mathbf{h}_1 + (1-b)\dot{m}_{as} \mathbf{h}_h - \dot{m}_{as} \mathbf{h}_2$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = b\dot{m}_{as} \begin{bmatrix} c_{as} & 0 \\ 0 & l_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ r_1 \end{bmatrix} + (1-b)\dot{m}_{as} \begin{bmatrix} c_{as} & 0 \\ 0 & l_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_h \\ r_h \end{bmatrix} - \dot{m}_{as} \begin{bmatrix} c_{as} & 0 \\ 0 & l_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_2 \\ r_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = b \begin{bmatrix} \theta_1 \\ r_1 \end{bmatrix} + (1-b) \begin{bmatrix} \theta_h \\ r_h \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \theta_2 \\ r_2 \end{bmatrix}$$

$$b \begin{bmatrix} \theta_1 - \theta_h \\ r_1 - r_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_2 - \theta_h \\ r_2 - r_h \end{bmatrix}$$

$$b = \frac{\theta_2 - \theta_h}{\theta_1 - \theta_h} = \frac{r_2 - r_h}{r_1 - r_h}$$

Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

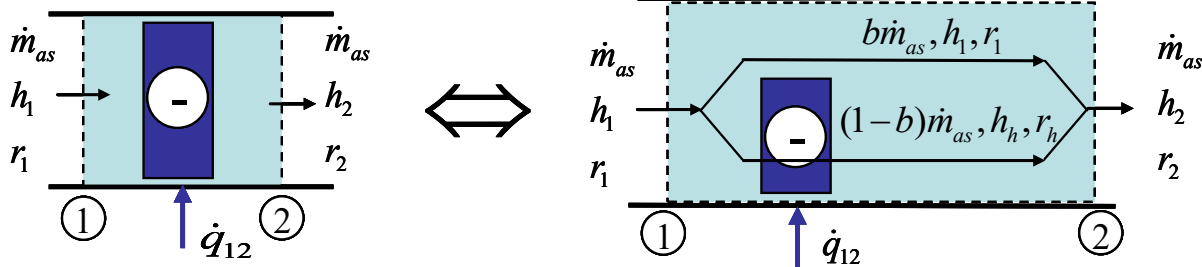
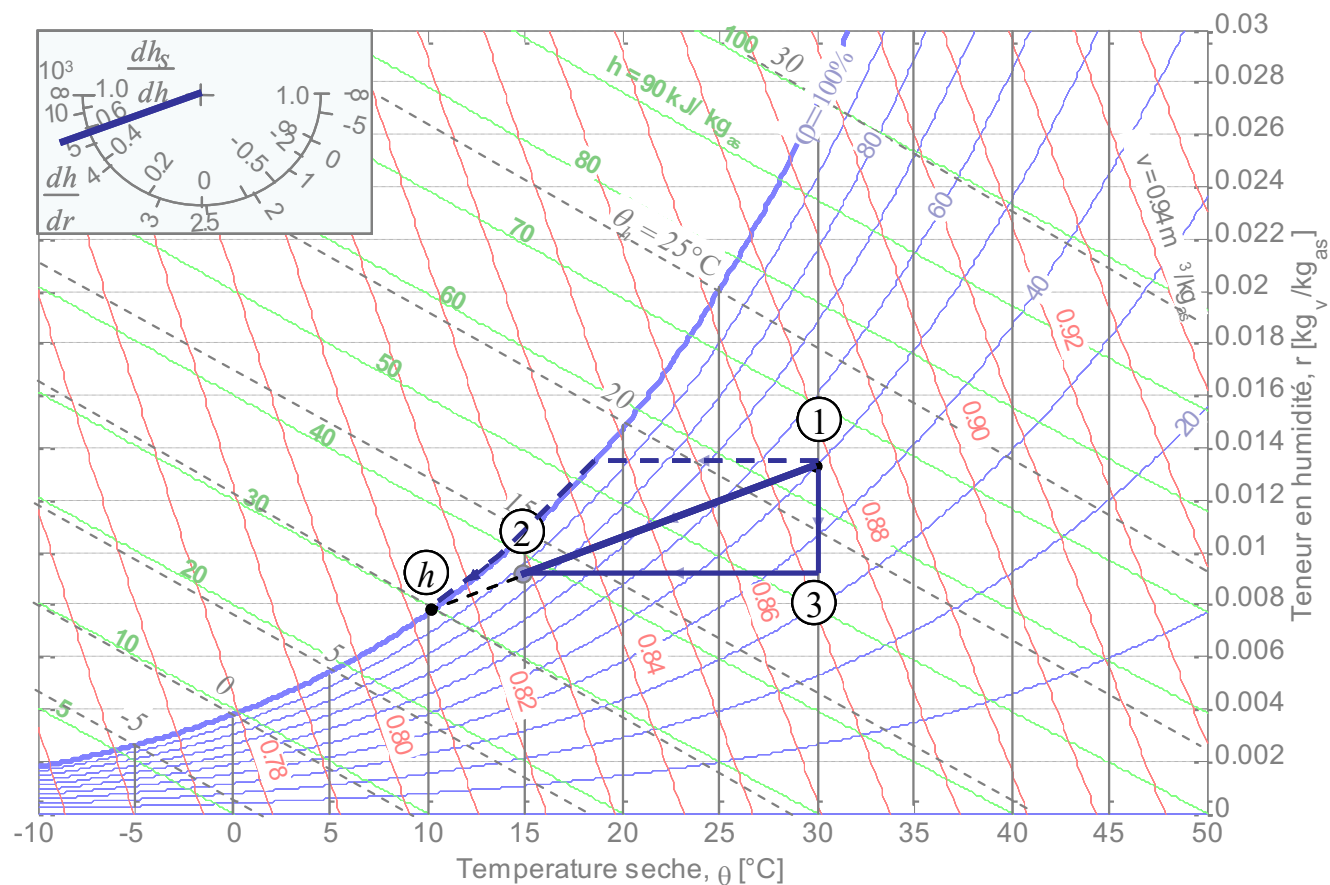
Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

- bilan d'énergie

$$\dot{m}_{as} h_1 + \dot{Q}_{BF} = \dot{m}_{as} h_2 + \dot{m}_v h_v$$

- bilan de masse

$$\dot{m}_{as} r_1 = \dot{m}_{as} r_2 + \dot{m}_v$$

- flux de chaleur de la batterie froide

$$\dot{Q}_{BF} = \dot{m}_{as} [(h_2 - h_1) - (r_2 - r_1) h_e] \cong \dot{m}_{as} (h_2 - h_1)$$

$$= \dot{m}_{as} (1 - b) [(h_h - h_1) - (r_h - r_1) h_e]$$

$$\cong \dot{m}_{as} (1 - b) (h_h - h_1)$$

Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

- **Pente de la transformation**

- chaleur sensible

$$\dot{Q}_{32} = \dot{m}_{as} (h_2 - h_1) = \dot{m}_{as} (1 - b)(h_h - h_1)$$

- chaleur latente

$$\dot{Q}_{12} = \dot{m}_{as} (r_2 - r_1) h_v = \dot{m}_{as} (1 - b)(r_h - r_1) h_v$$

- température finale de saturation

- détente directe $\theta_h = \theta_0$

- eau froide $\theta_h = \frac{\theta_e + \theta_s}{2}$

- le rapport caractéristique

$$\gamma \equiv \frac{\Delta h}{\Delta r} = \frac{h_2 - h_1}{r_2 - r_1}$$

Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

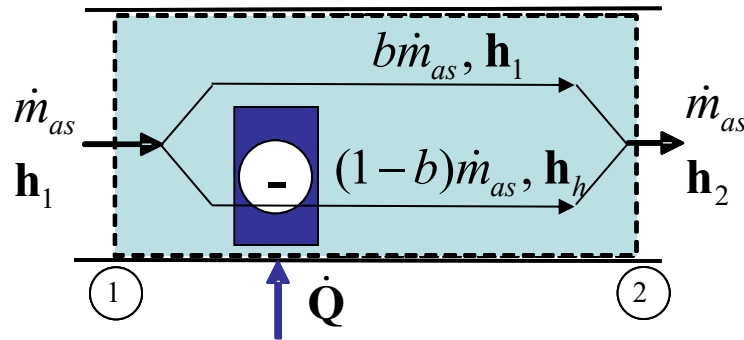
Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort



$$0 = \dot{H}_1 - \dot{H}_2 + \dot{Q}$$

$$0 = \dot{m}_{as} h_1 - \dot{m}_{as} h_2 + \dot{Q}$$

↓

$$\dot{m}_{as} h_2 = b \dot{m}_{as} h_1 + (1-b) \dot{m}_{as} h_h$$

$$\dot{m}_{as} (1-b)(h_1 - h_h) + \dot{Q} = 0$$

$$\dot{m}_{as} (1-b) \begin{bmatrix} c_{as} & 0 \\ 0 & l_v \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} \theta_1 \\ r_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \theta_h \\ r_h \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} \dot{Q}_s \\ \dot{Q}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\dot{Q}_s = \dot{m}_{as} (1-b) c_{as} (\theta_h - \theta_1) < 0$$

$$\dot{Q}_l = \dot{m}_{as} (1-b) (r_h - r_1) l_v = \dot{m}_v l_v < 0$$

Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

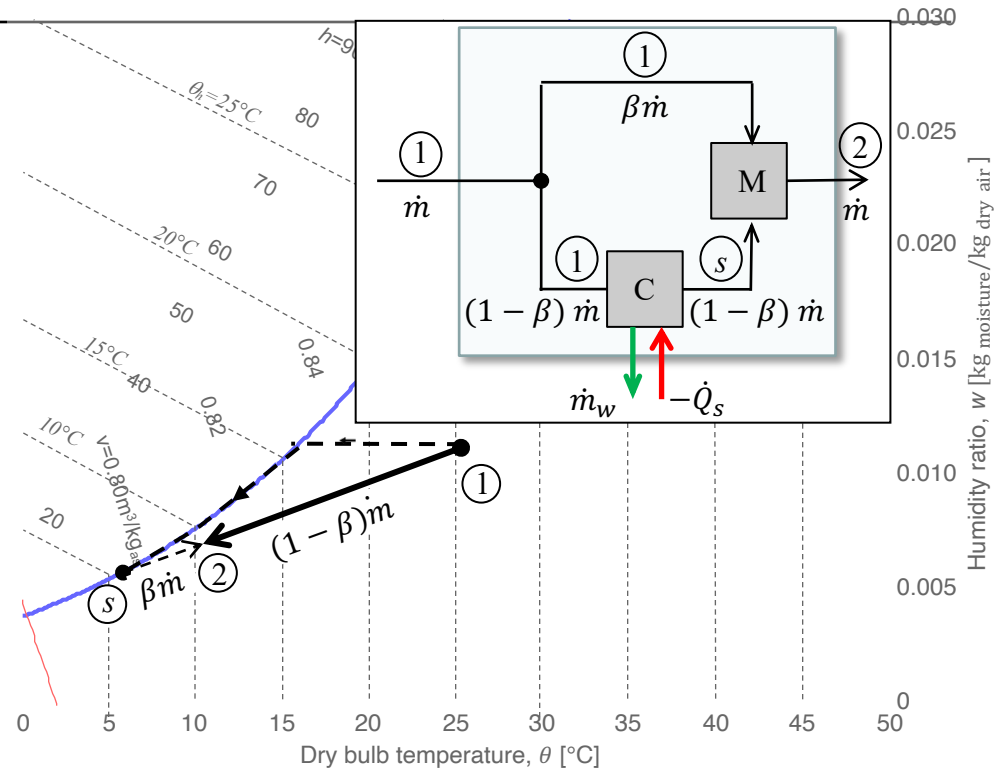
Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort



$$\begin{cases} \beta \dot{m} c \theta_1 + (1 - \beta) \dot{m} c \theta_s - \dot{m} c \theta_2 = 0 \\ \beta \dot{m} l r_1 + (1 - \beta) \dot{m} l r_s - \dot{m} l r_2 = 0 \end{cases} \quad (M)$$

$$\begin{cases} (1 - \beta) \dot{m} c \theta_1 - (1 - \beta) \dot{m} c \theta_s - \dot{Q}_s = 0 \\ (1 - \beta) \dot{m} l r_1 + (1 - \beta) \dot{m} l r_s - l \dot{m}_w = 0 \end{cases} \quad (C)$$

$$r_s = f(\theta_s)$$

Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

$$r_s = f(\theta) = \frac{M_w}{M_{da}} \frac{p_{ws}}{p - p_{ws}} = 0.621\,547 \frac{p_{ws}}{p - p_{ws}}$$

$$p_{ws} = 610.78 \exp\left(\frac{17.2694 \theta}{\theta + 283.3}\right)$$

$$\begin{aligned} f'_{\theta_s^0} &\equiv \left. \frac{df(\theta)}{d\theta} \right|_{\theta=\theta_s^0} = \frac{d}{d\theta} \left(\frac{M_w}{M_{da}} \frac{p_{ws}}{p - p_{ws}} \right) \\ &= \frac{M_w}{M_{da}} p \frac{2.51354 \cdot 10^6 e^{\frac{17.2694 \theta_s^0}{\theta_s^0 + 283.3}}}{(\theta_s^0 + 283.3)^2 \left(p - 610.78 e^{\frac{17.2694 \theta_s^0}{\theta_s^0 + 283.3}} \right)} \end{aligned}$$

$$r_s = r_s^0 + f'_{\theta_s^0}(\theta_s - \theta_s^0)$$

Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

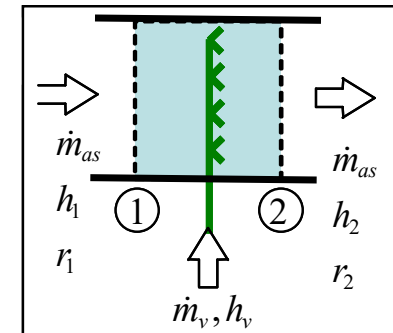
• Humidification par injection des vapeurs

- bilan d'énergie

$$\dot{m}_{as} h_1 + \dot{m}_v h_v = \dot{m}_{as} h_2$$

- bilan de masse

$$\dot{m}_{as} r_1 + \dot{m}_v = \dot{m}_{as} r_2$$



• le rapport caractéristique

$$\gamma = \frac{h_2 - h_1}{r_2 - r_1} = \frac{\Delta h}{\Delta r} = h_v$$



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

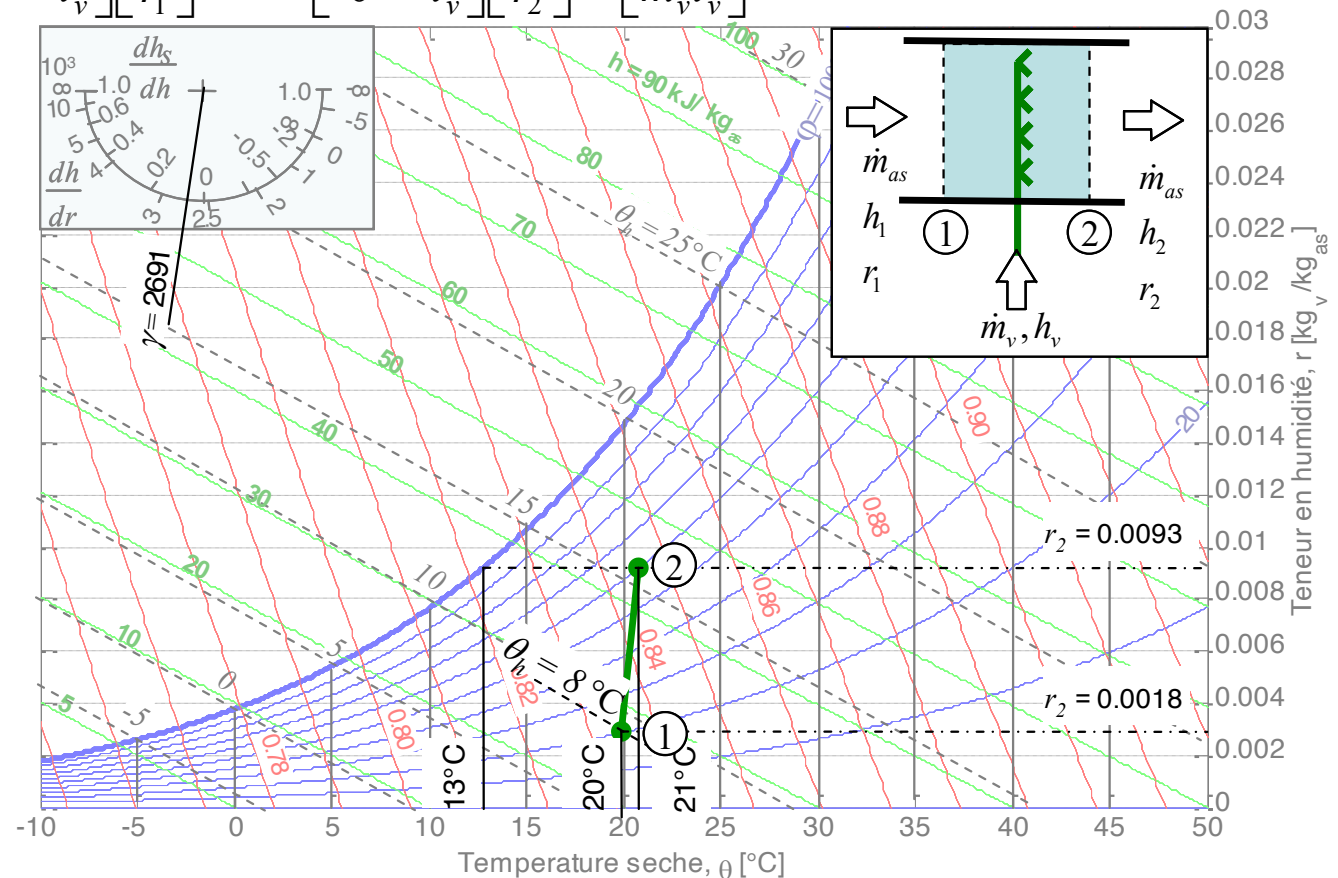
Analyse

Confort

• Humidification par injection des vapeurs

$$\dot{m}_{as} h_1 - \dot{m}_{as} h_2 + \dot{Q} = 0$$

$$\dot{m}_{as} \begin{bmatrix} c_{as} & 0 \\ 0 & l_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ r_1 \end{bmatrix} - \dot{m}_{as} \begin{bmatrix} c_{as} & 0 \\ 0 & l_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_2 \\ r_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ m_v l_v \end{bmatrix} = 0$$



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

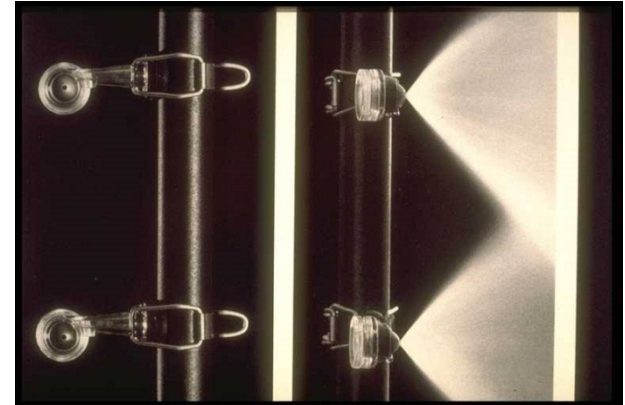
• Humidification par pulvérisation d'eau

- bilan d'énergie

$$\dot{m}_{as} h_1 + \dot{m}_v h_v = \dot{m}_{as} h_2$$

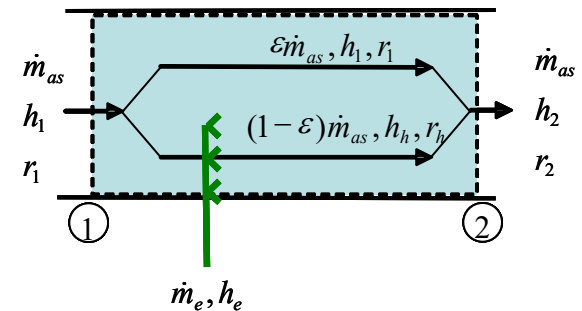
- bilan de masse

$$\dot{m}_{as} r_1 + \dot{m}_v = \dot{m}_{as} r_2$$



• le rapport caractéristique

$$\gamma = \frac{h_2 - h_1}{r_2 - r_1} = \frac{\Delta h}{\Delta r} = h_e$$



$$h_e = c_e \theta_e \quad c_e = 4.18 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

- **l'air à la sortie est le résultat du mélange**
 - d'un débit d'air non humidifié qui contourne l'humidificateur
 - d'un débit d'air saturé qui travers un humidificateur parfait
- **efficacité de l'humidificateur**

$$\mathcal{E} \equiv \frac{\dot{m}_{ash}}{\dot{m}_{as}}$$

$$\mathcal{E} = \frac{r_2 - r_1}{r_h - r_1} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_h - \theta_1}$$

Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

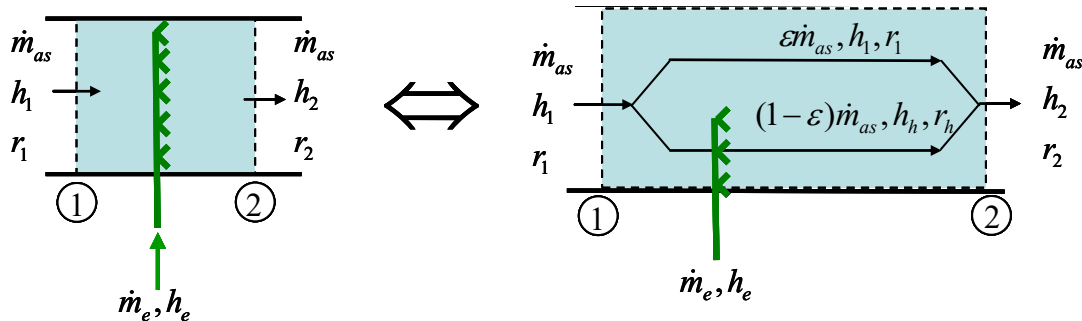
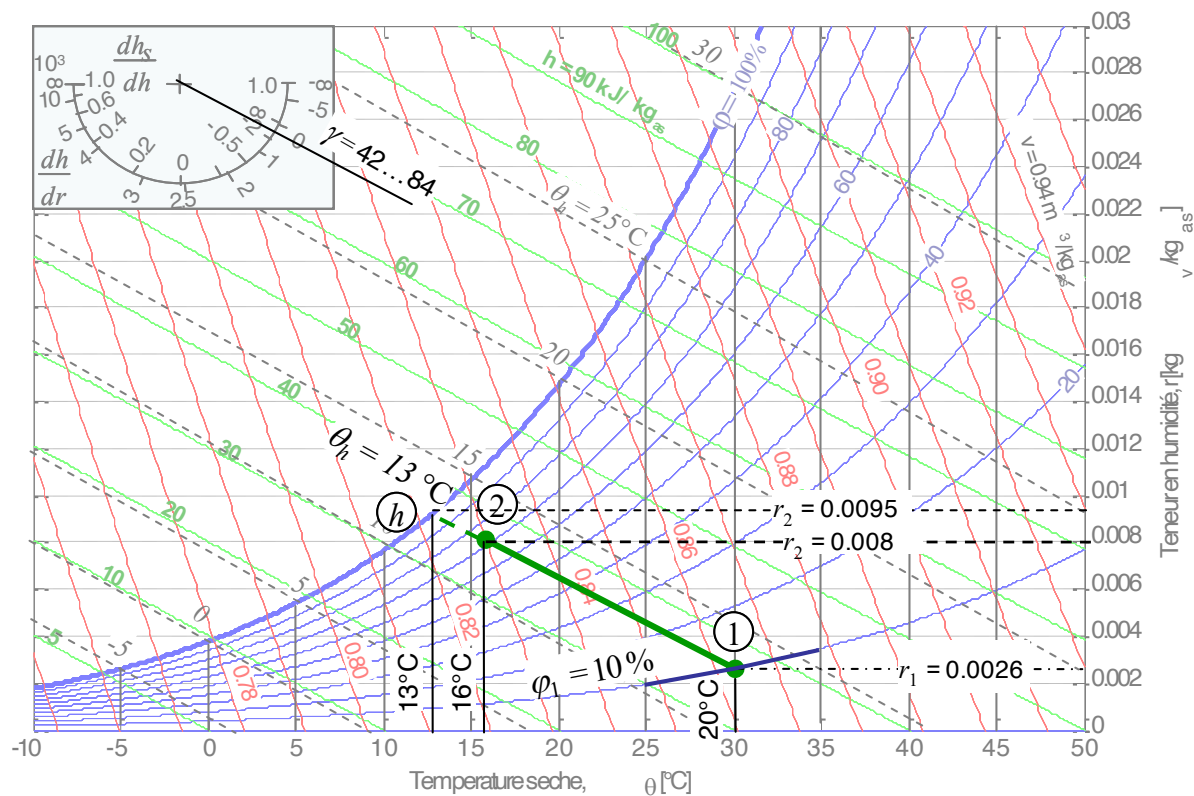
Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

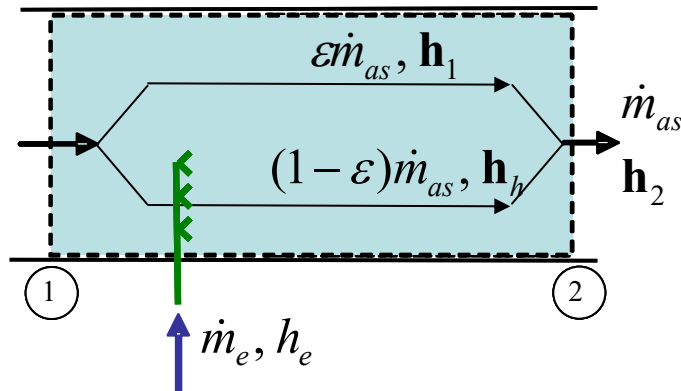
Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort



$$\dot{m}_{as} \mathbf{h}_2 = \varepsilon \dot{m}_{as} \mathbf{h}_1 + (1 - \varepsilon) \dot{m}_{as} \mathbf{h}_h$$

$$\dot{m}_{as} \mathbf{h}_1 - \dot{m}_{as} \mathbf{h}_2 + \dot{m}_e \mathbf{h}_e = 0$$

$$\dot{m}_{as} (\mathbf{h}_1 - \mathbf{h}_2) = \dot{m}_{as} (1 - \varepsilon) (\mathbf{h}_1 - \mathbf{h}_h)$$

$$\dot{m}_{as} (1 - \varepsilon) \begin{bmatrix} c_{as} & 0 \\ 0 & l_v \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} \theta_1 \\ r_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \theta_h \\ r_h \end{bmatrix} \right) + \dot{m}_e \mathbf{h}_e = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\dot{m}_{as} (1 - \varepsilon) \begin{bmatrix} c_{as} & 0 \\ 0 & l_v \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} \theta_1 \\ r_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \theta_h \\ r_h \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$h_e = c_e \theta_e \cong 0$$

Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

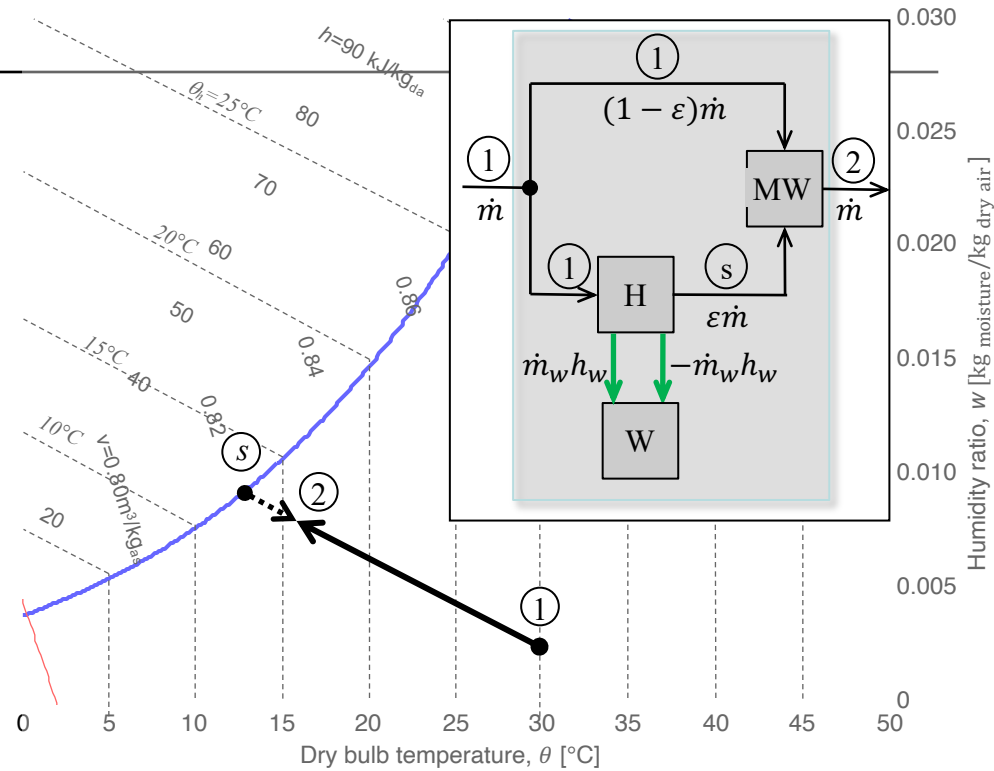
Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort



$$\begin{cases} (1 - \varepsilon)\dot{m}c\theta_1 + \varepsilon\dot{m}c\theta_s - \dot{m}c\theta_2 = 0 \\ (1 - \varepsilon)\dot{m}lr_1 + \varepsilon\dot{m}lr_s - \dot{m}lr_2 = 0 \end{cases} \quad (\text{MW})$$

$$c\theta_1 + lr_1 = c\theta_2 + lr_2 = c\theta_s + lr_s$$

$$r_s = r_s^0 + f'_{\theta_s^0}(\theta_s - \theta_s^0)$$

Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

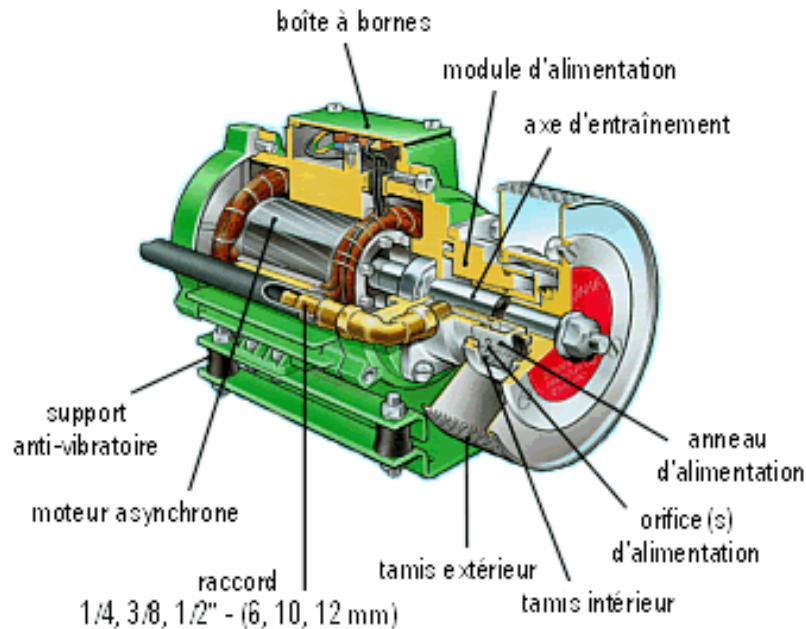
Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

- Appareils à pulvérisation par buses fixes à débit variable (humidificateur rotatif)



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

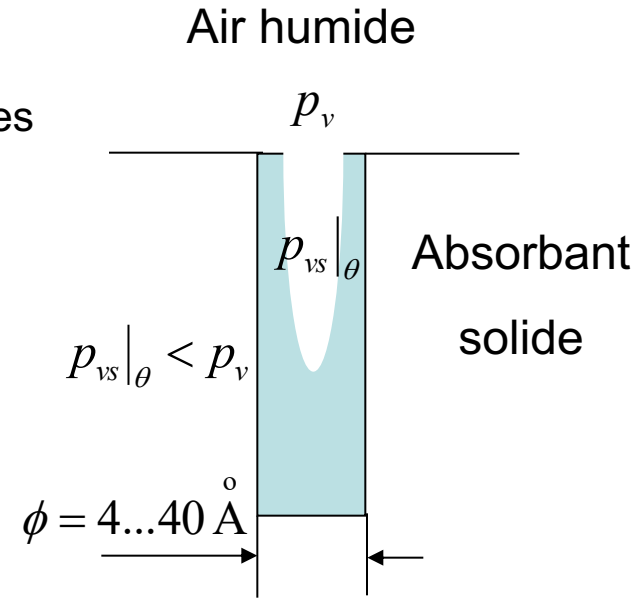
Récupération

Analyse

Confort

• Déshumidification par adsorption (adsorbant solide)

- matériaux hygroscopiques :
 - grande porosité → tubes capillaires
 - pression faible
- phase de déshumidification
 - pression dans les pores < pression des vapeurs dans l'air
- régénération par réchauffement
 - eau re-vaporisée et entraînée par l'air chaud



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

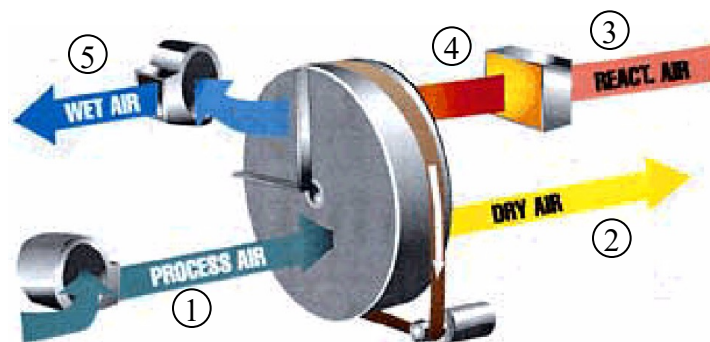
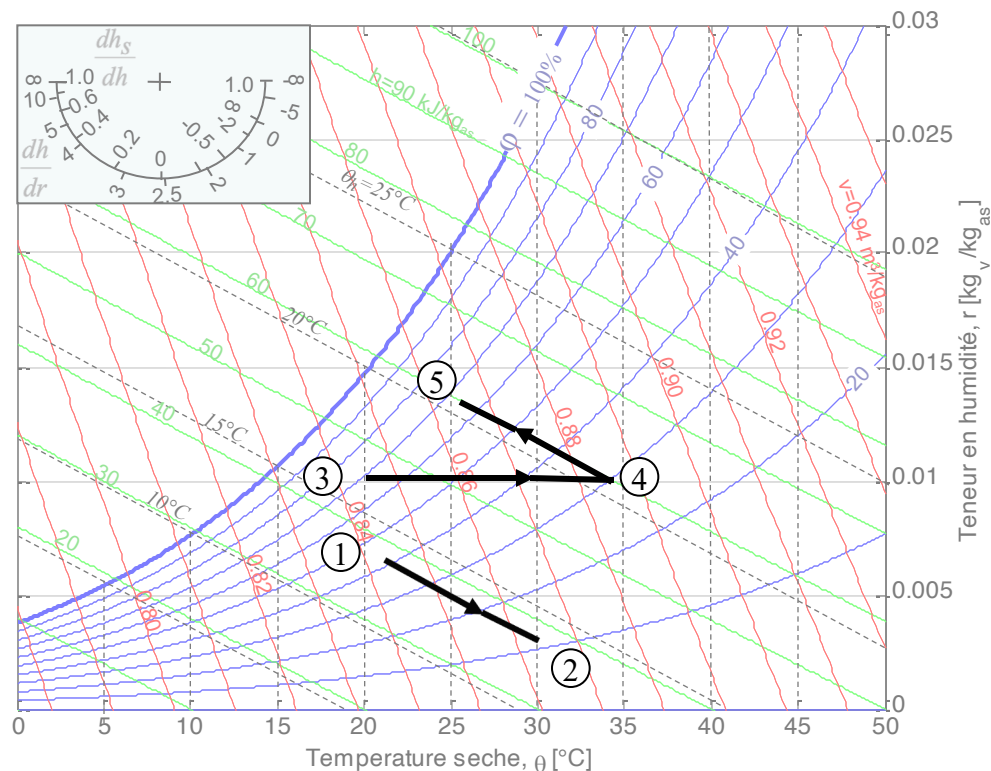
Analyse

Confort

$$\dot{m}_{as} r_1 = \dot{m}_{as} r_2 + \dot{m}_e$$

$$\dot{m}_{as} h_1 = \dot{m}_{as} h_2 + \dot{m}_e h_e$$

$$h_1 \cong h_2$$



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

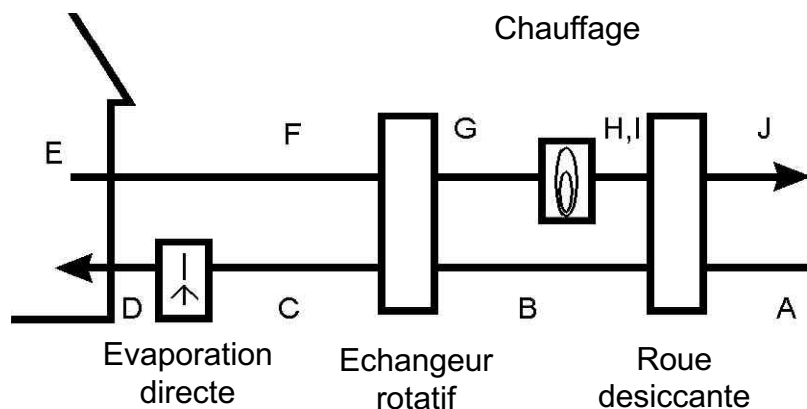
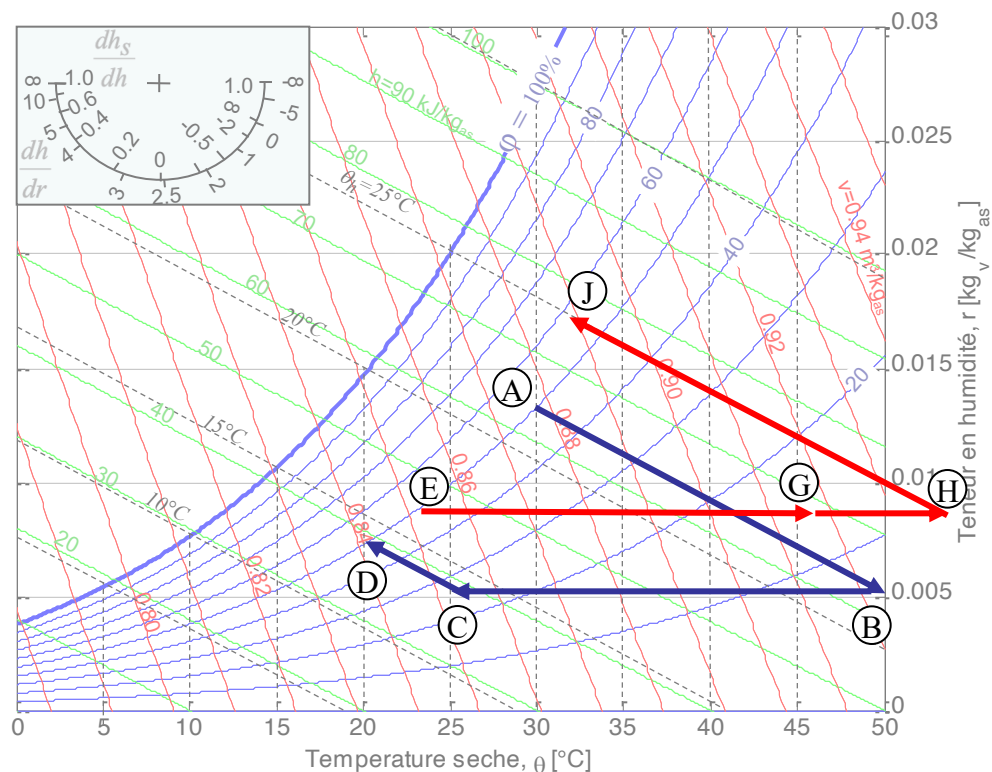
Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

• Dessicant cooling



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

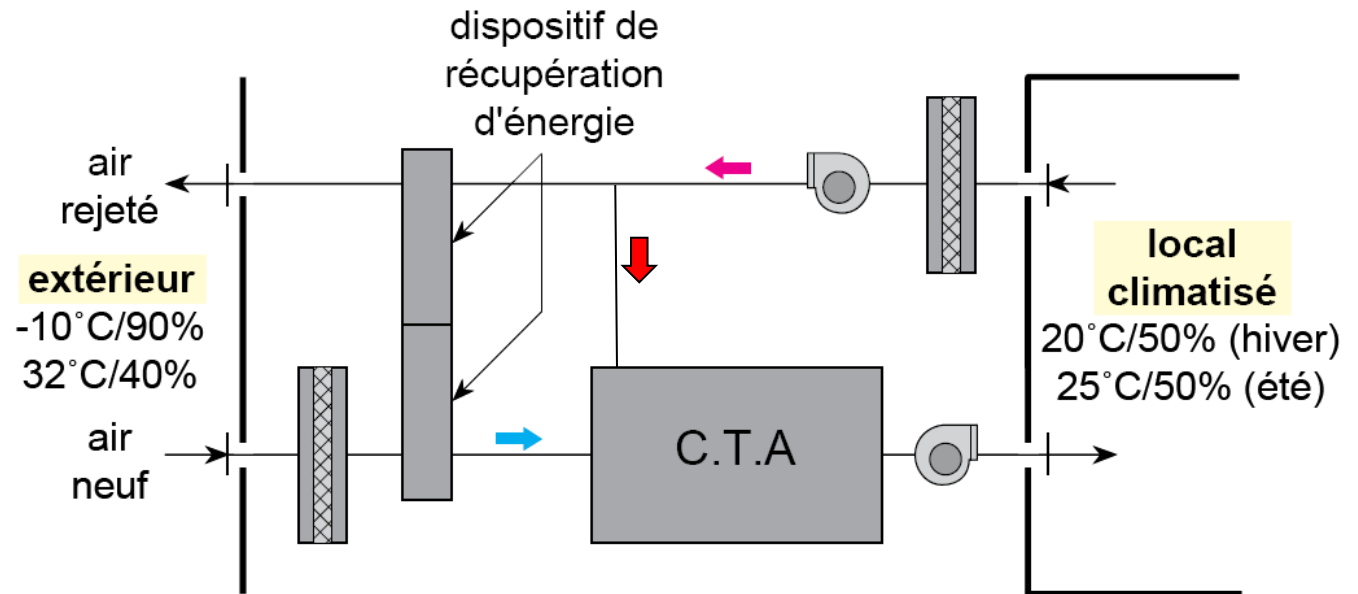
Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

- Récupération de chaleur par échange thermique



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

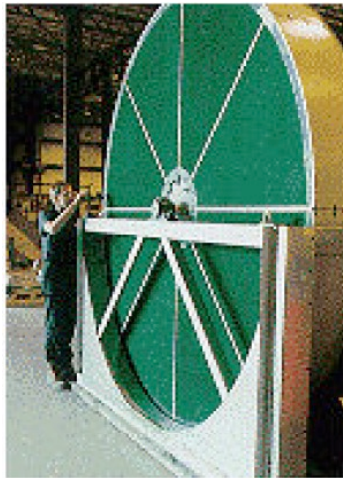
Récupération

Analyse

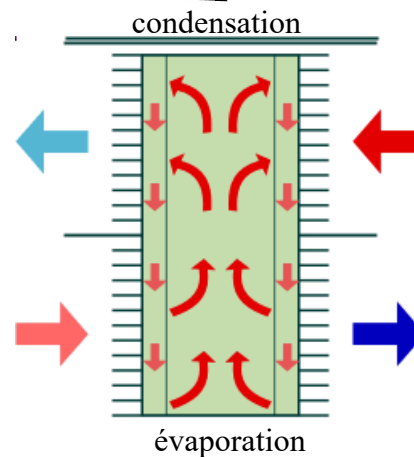
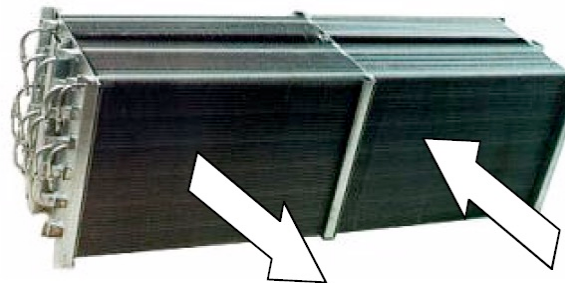
Confort

• Récupération de chaleur par échange thermique

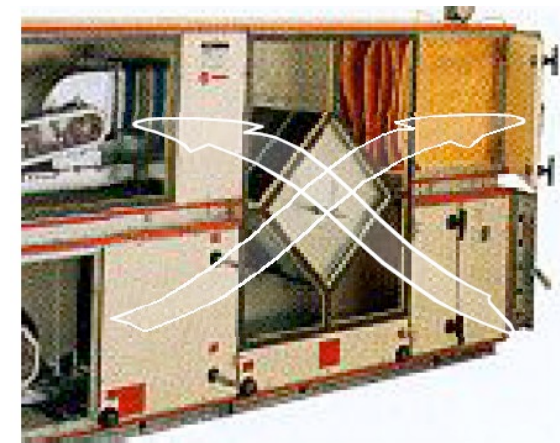
Récupérateur de chaleur :



à roue sensible



à caloduc



à plaque

Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

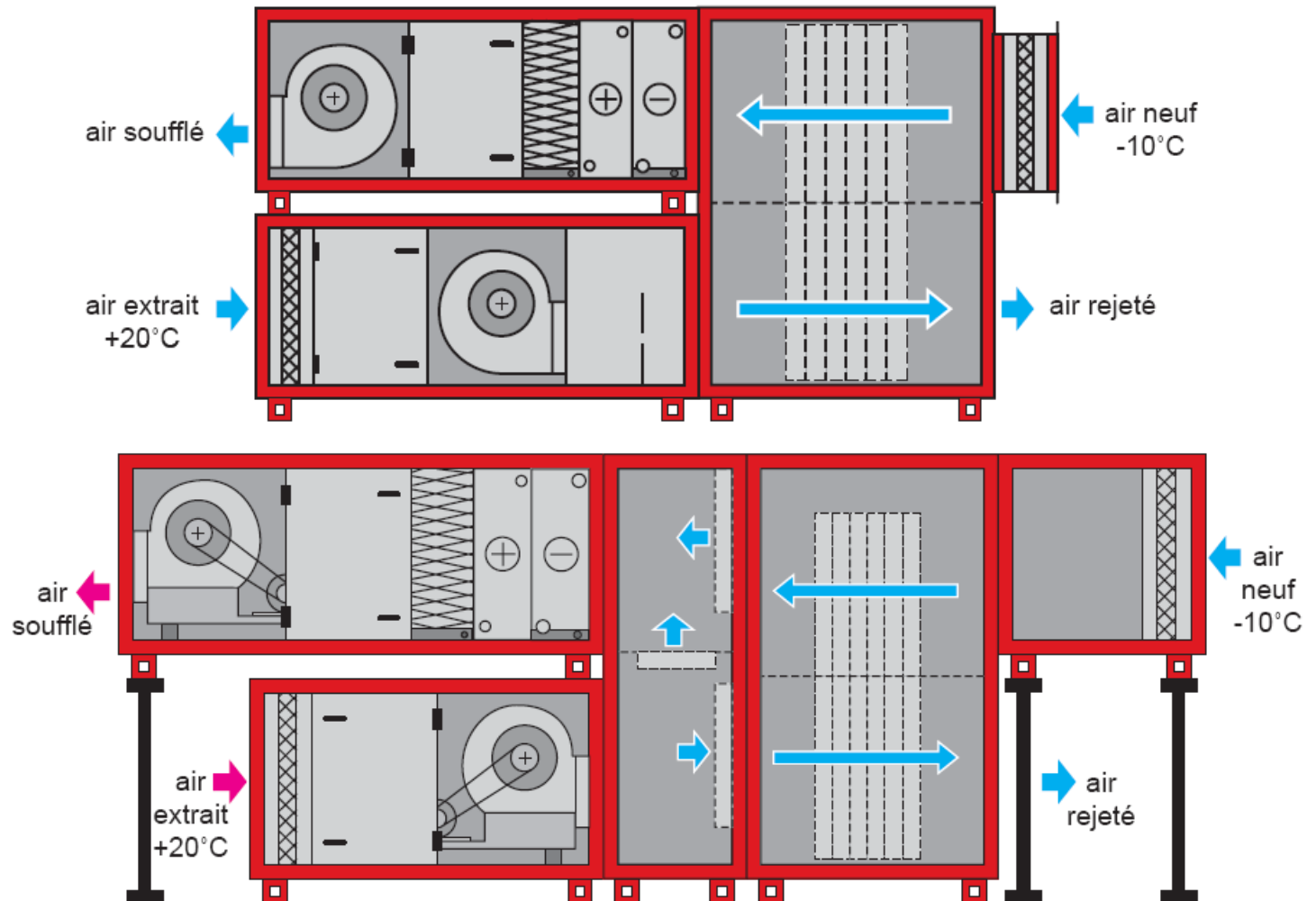
Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

- Récupération de chaleur par échange thermique



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

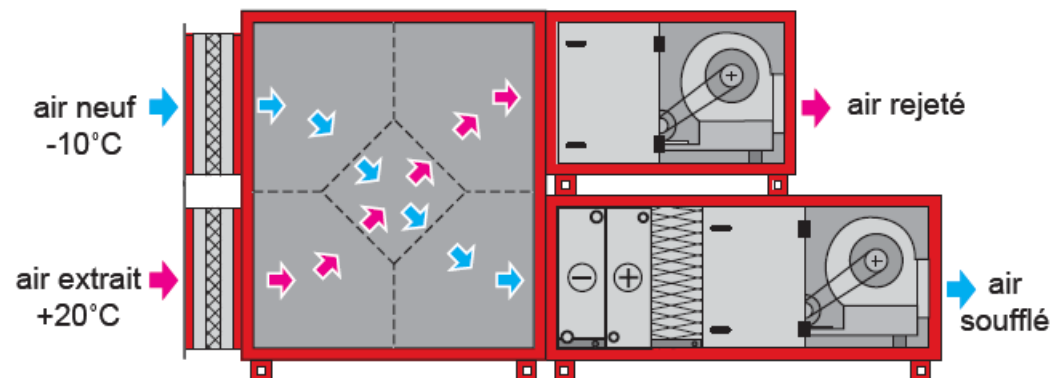
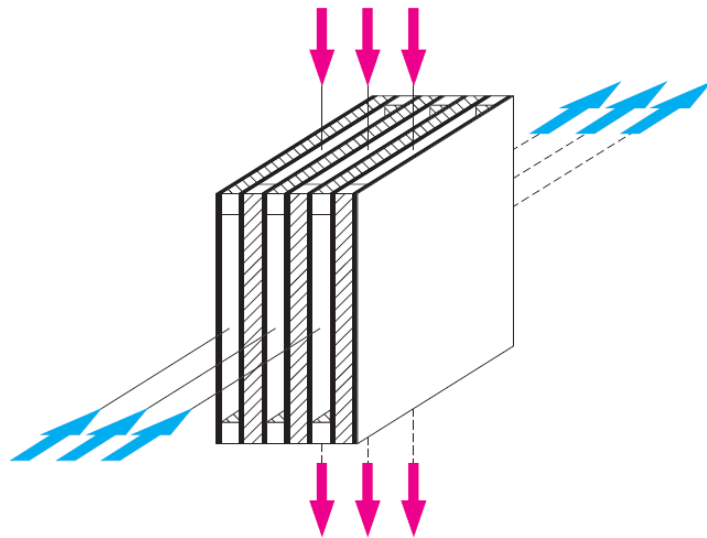
Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

- Récupération de chaleur par échange thermique



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumdif.

Récupération

Analyse

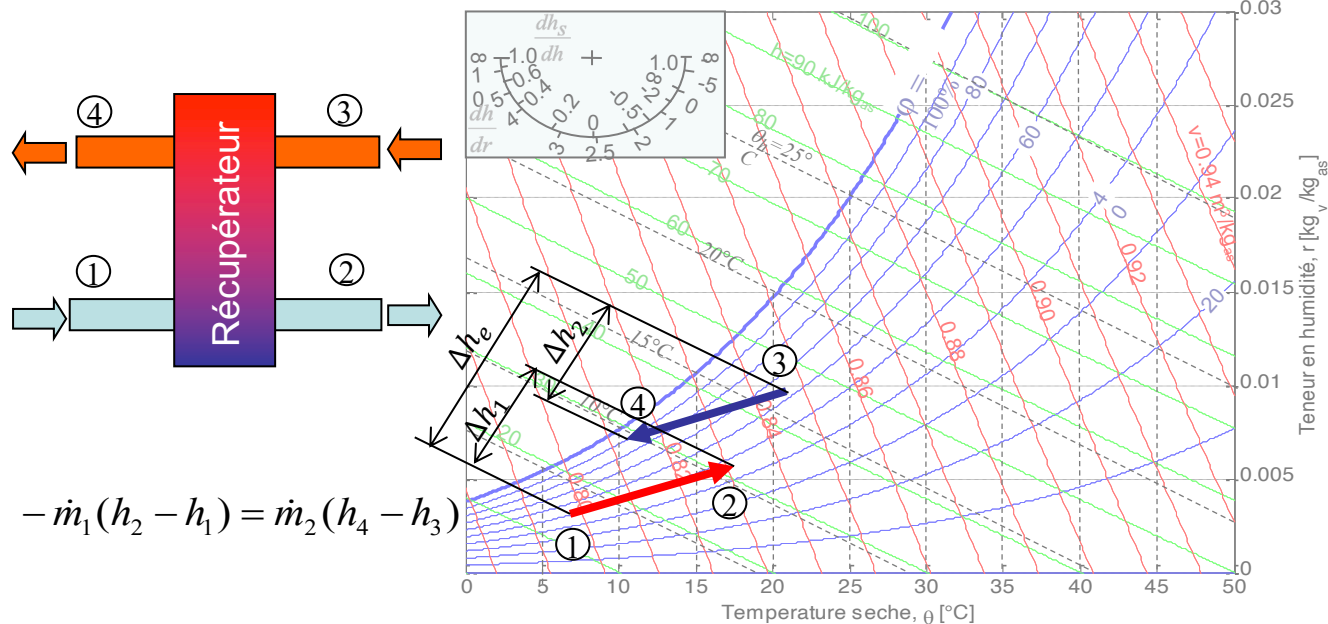
Confort

Efficacité totale (sensible + latente)

$$E_T = \frac{\text{Puissance réelle}}{\text{Puissance maximale}}$$

$$= \frac{\max(\dot{m}_{as1}\Delta h_1; \dot{m}_{as2}\Delta h_2)}{\min(\dot{m}_{as1}; \dot{m}_{as2})\Delta h_e} = \frac{\max(\Delta h_1; \Delta h_2)}{\Delta h_e}$$

si $\dot{m}_{as1} = \dot{m}_{as2}$



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

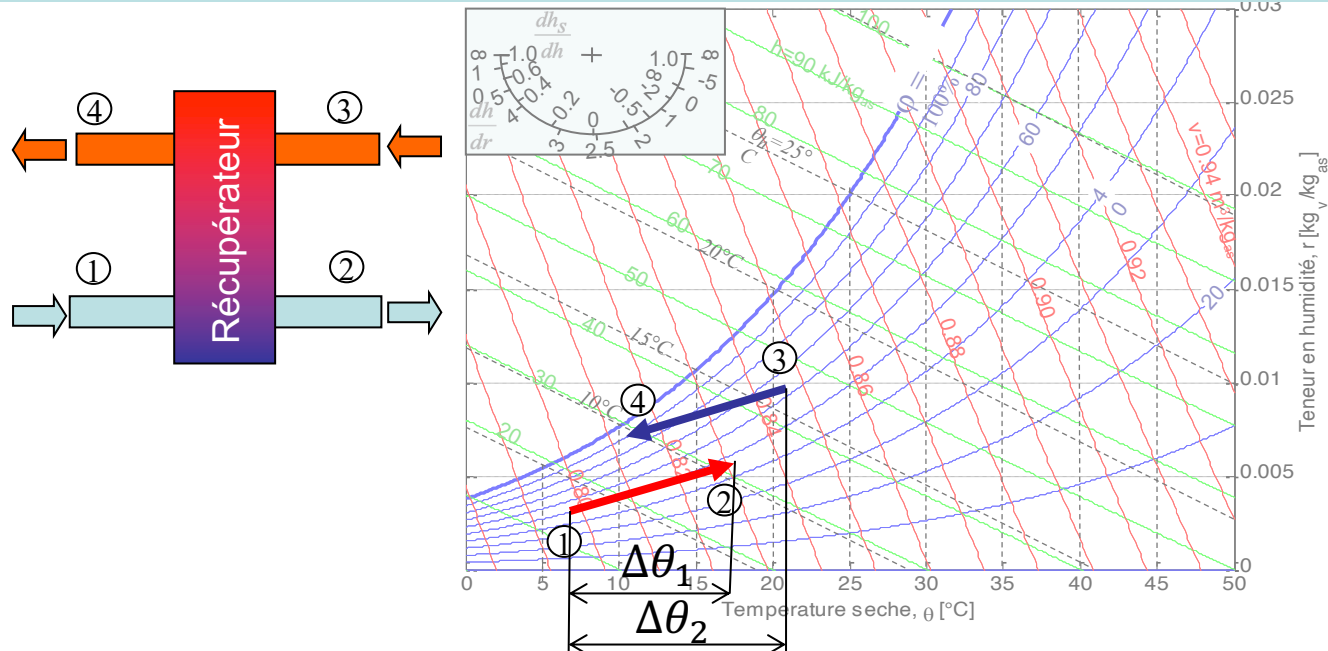
Confort

Efficacité sur la chaleur sensible

$$E_S = \frac{\max(\dot{m}_{as1} c_{as} \Delta\theta_1; \dot{m}_{as2} \Delta\theta_2)}{\min(\dot{m}_{as1}; \dot{m}_{as2}) \Delta\theta_e} \quad \text{si } \dot{m}_{as1} = \dot{m}_{as2}$$

$$E_S = \frac{\max(\Delta\theta_1; \Delta\theta_2)}{\Delta\theta_e}$$

(indiquée par les constructeurs pour différents débits)



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

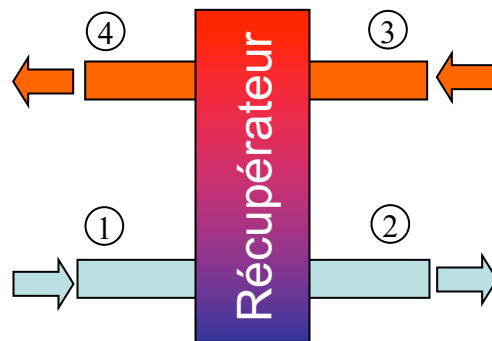
Déshumidif.

Récupération

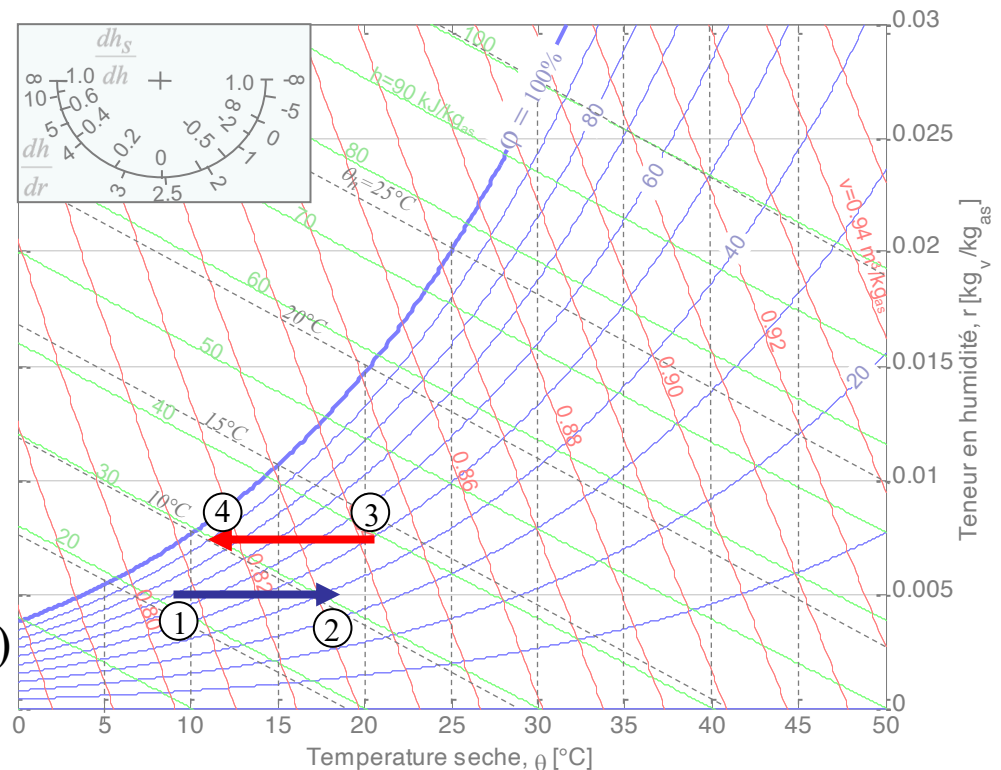
Analyse

Confort

• Evolutions en cas d'hiver



$$-\dot{m}_1(h_2 - h_1) = \dot{m}_2(h_4 - h_3)$$



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

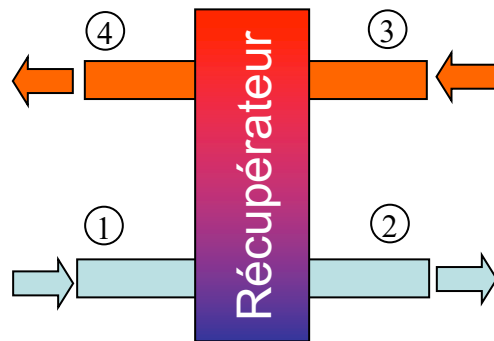
Déshumidif.

Récupération

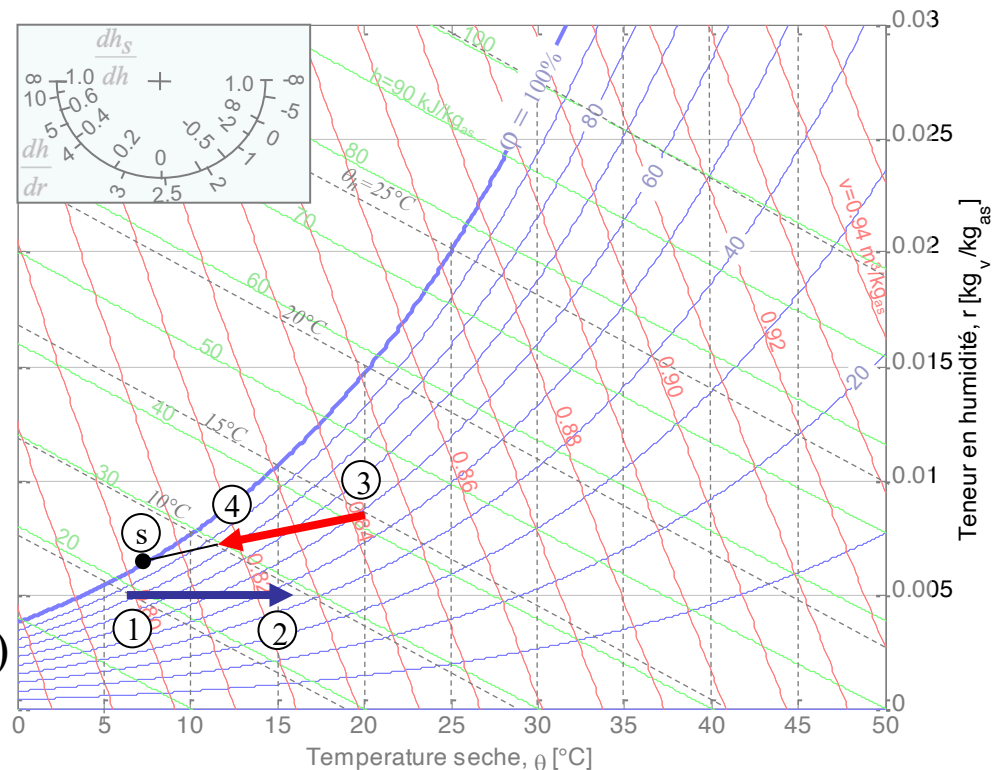
Analyse

Confort

• Evolutions en cas d'hiver



$$-\dot{m}_1(h_2 - h_1) = \dot{m}_2(h_4 - h_3)$$



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

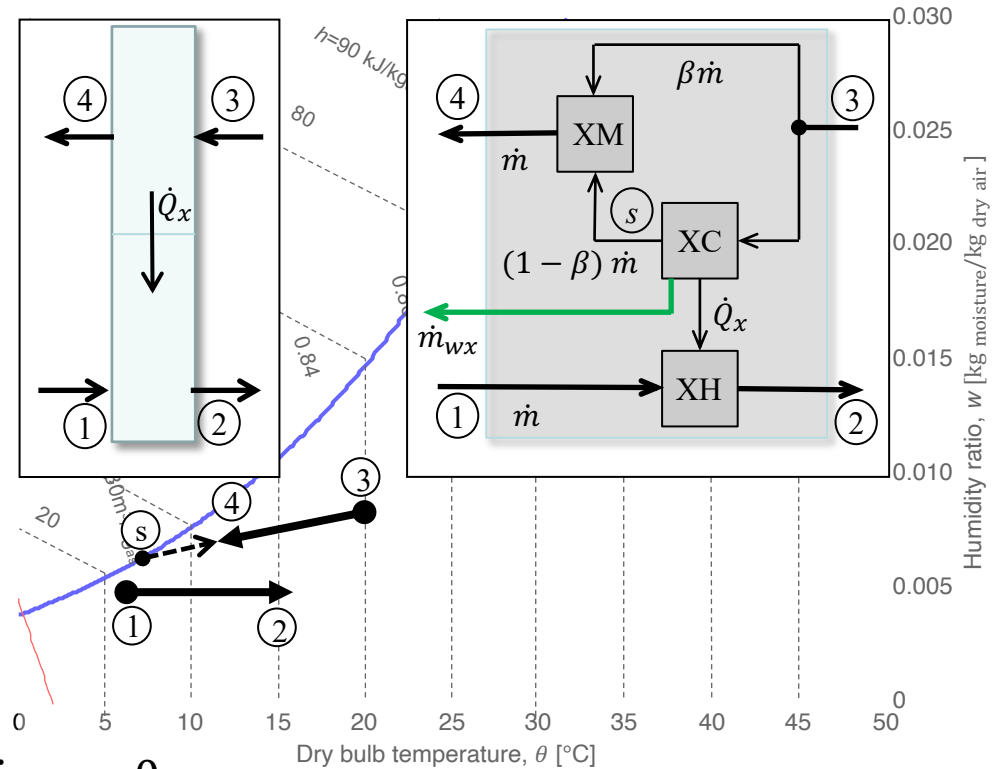
Confort

$$\dot{Q}_x = UA(\bar{\theta}_{34} - \bar{\theta}_{12})$$

$$\dot{Q}_x = UA \left(\frac{\theta_3 + \theta_4}{2} - \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right)$$

$$\begin{cases} \dot{m}c\theta_1 - \dot{m}c\theta_2 + \dot{Q}_x + l\dot{m}_{wx} = 0 \\ \dot{m}lw_1 - \dot{m}lw_2 = 0 \end{cases} \quad \text{(XH)}$$

$$\begin{cases} (1-\beta)\dot{m}c\theta_3 - (1-\beta)\dot{m}c\theta_s - \dot{Q}_x = 0 \\ (1-\beta)\dot{m}lw_3 - (1-\beta)\varepsilon_1\dot{m}lw_s - h_w\dot{m}_{wx} = 0 \text{ (XC+XM)} \\ w_s - f'_{\theta_s^0}\theta_s = w_s^0 - f'_{\theta_s^0}\theta_s^0 \end{cases}$$



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

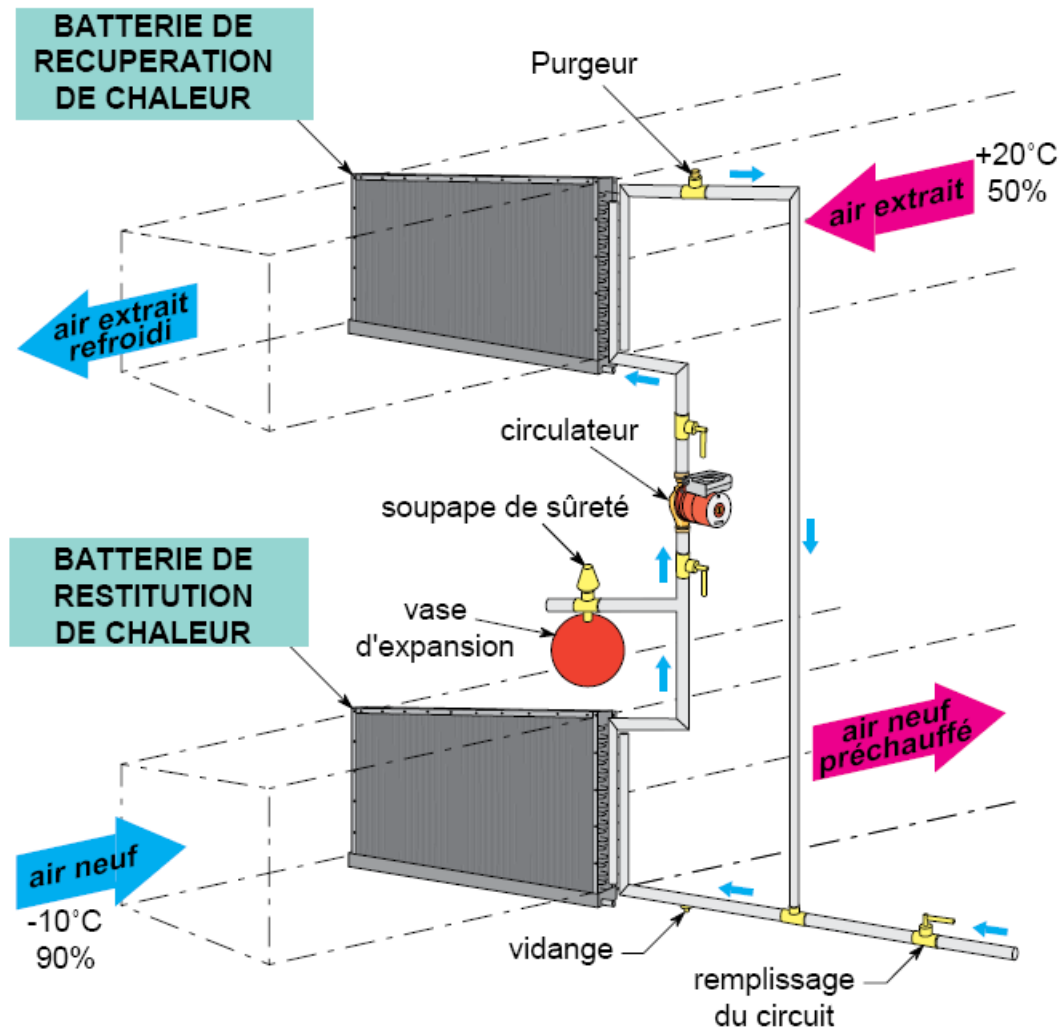
Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

- Récupération de chaleur par échange thermique



Transformations de l'air humide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

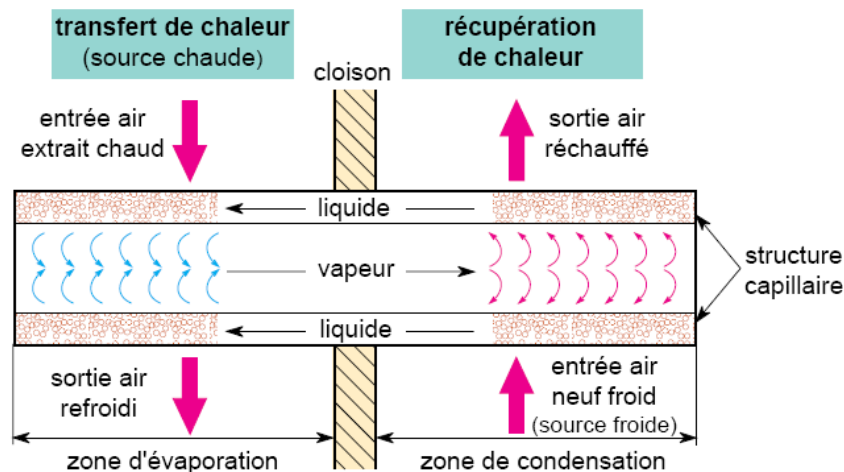
Déshumidif.

Récupération

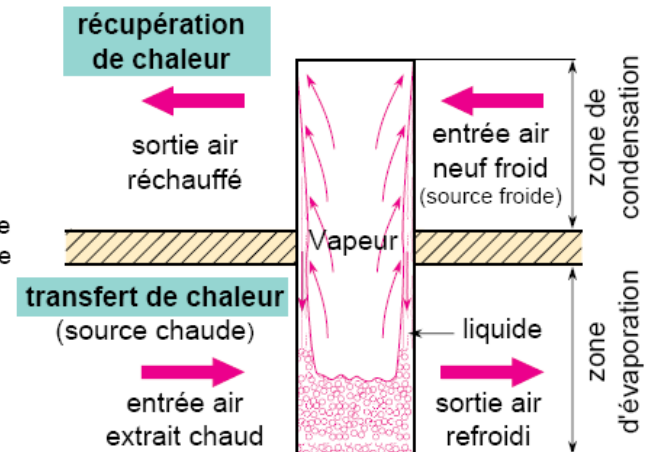
Analyse

Confort

• Récupération de chaleur par échange thermique



CALODUC VERTICAL



Analyse des systèmes de climatisation

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

Traitement de l'air humide : processus élémentaires

Processus	Schéma bloc*	Représentation	Modèle
Mélange adiabatique			$\begin{cases} \dot{m}_{as} c_{as} \theta_3 = \alpha \dot{m}_{as} c_{as} \theta_1 + (1 - \alpha) \dot{m}_{as} c_{as} \theta_2 \\ \dot{m}_{as} l r_3 = \alpha \dot{m}_{as} l r_1 + (1 - \alpha) \dot{m}_{as} l r_2 \end{cases}$ entrées : $\theta_1, \theta_2, r_1, r_2$ sorties : θ_3, r_3 paramètres : $\dot{m}_{as},$
Cas général			$\begin{cases} \dot{m}_{as} c_{as} \theta_2 = \dot{m}_{as} c_{as} \theta_1 + \dot{Q}_s \\ \dot{m}_{as} l r_2 = \dot{m}_{as} l r_1 + \dot{Q}_l \end{cases}$ entrées : $\theta_1, r_1, \dot{Q}_s, \dot{Q}_l$ sorties : θ_2, r_2 paramètre : $\dot{m}_{as}$
Humidification par injection de vapeur			$\dot{m}_{as} l r_2 = \dot{m}_{as} l r_1 + \dot{Q}_l$ entrées : $r_1, \dot{Q}_l$ sorties : r_2 paramètre : $\dot{m}_{as}$ Note : $\dot{Q}_l = \dot{m}_{eau} h_v$
Chauffage / refroidissement			$\dot{m}_{as} c_{as} \theta_2 = \dot{m}_{as} c_{as} \theta_1 + \dot{Q}_s$ entrées : $\theta_1, \dot{Q}_s,$ sorties : θ_2 paramètre : $\dot{m}_{as}$

Analyse des systèmes de climatisation

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissemnt

Humidification

Déshumdif.

Récupération

Analyse

Confort

Traitement de l'air humide : processus élémentaires

Processus	Schéma bloc*	Représentation	Modèle
Transformations sans apport de chaleur			
Transformations par apport de chaleur (sensible et/ou latente)			
Condensation (refroidissement avec déshumidification)			$\begin{cases} \dot{m}_{as} c_{as} \theta_s + \dot{Q}_s = \dot{m}_{as} c_{as} \theta_1 \\ \dot{m}_{as} l r_s + \dot{Q}_l = \dot{m}_{as} l r_1 \\ r_s - f(\theta_s) = 0 \\ \dot{Q}_s + \dot{Q}_l = \dot{Q}_{gf} \end{cases}$ entrées : $\theta_1, r_1, \dot{Q}_{gf}$ sorties : $\theta_s, r_s, \dot{Q}_s, \dot{Q}_l$ paramètre : $\dot{m}_{as}$ Notes 1) débit condensé : $\dot{m}_{eau} = \dot{Q}_l / l$ 2) puissance groupe froid : $\dot{Q}_{gf}$
Evaporation ou condensation adiabatique			$\begin{cases} c_{as} \theta_s + l r_s = c_{as} \theta_1 + l r_1 \\ r_s - f(\theta_s) = 0 \end{cases}$ entrées : θ_1, r_1 sorties : θ_s, r_s Notes 1) $\dot{Q}_s = -\dot{Q}_l$ sont des sorties 2) $\dot{Q}_l = \dot{m}_{eau} l$ 3) $\dot{m}_{eau} = \dot{m}_{as} (r_1 - r_s)$

Analyse des systèmes de climatisation

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

Linéarisation de la courbe de saturation

$$r_s = f(\theta) = \frac{M_w}{M_{da}} \frac{p_{ws}}{p - p_{ws}} = 0.621\,547 \frac{p_{ws}}{p - p_{ws}}$$

$$p_{ws} = 610.78 \exp\left(\frac{17.2694 \theta}{\theta + 283.3}\right)$$

$$\begin{aligned} f'_{\theta_s^0} &\equiv \left. \frac{df(\theta)}{d\theta} \right|_{\theta=\theta_s^0} = \frac{d}{d\theta} \left(\frac{M_w}{M_{da}} \frac{p_{ws}}{p - p_{ws}} \right) \\ &= \frac{M_w}{M_{da}} p \frac{2.51354 \cdot 10^6 e^{\frac{17.2694 \theta_s^0}{\theta_s^0 + 283.3}}}{(\theta_s^0 + 283.3)^2 \left(p - 610.78 e^{\frac{17.2694 \theta_s^0}{\theta_s^0 + 283.3}} \right)} \end{aligned}$$

$$r_s = r_s^0 + f'_{\theta_s^0} (\theta_s - \theta_s^0)$$

Analyse des systèmes de climatisation

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

Linéarisation de la courbe de saturation

$$r_s = f(\theta) = \frac{M_w}{M_{da}} \frac{p_{ws}}{p - p_{ws}} = 0.621\,547 \frac{p_{ws}}{p - p_{ws}}$$

$$p_{ws} = 610.78 \exp\left(\frac{17.2694 \theta}{\theta + 283.3}\right)$$

$$\begin{aligned} f'_{\theta_s^0} &\equiv \left. \frac{df(\theta)}{d\theta} \right|_{\theta=\theta_s^0} = \frac{d}{d\theta} \left(\frac{M_w}{M_{da}} \frac{p_{ws}}{p - p_{ws}} \right) \\ &= \frac{M_w}{M_{da}} p \frac{2.51354 \cdot 10^6 e^{\frac{17.2694 \theta_s^0}{\theta_s^0 + 283.3}}}{(\theta_s^0 + 283.3)^2 \left(p - 610.78 e^{\frac{17.2694 \theta_s^0}{\theta_s^0 + 283.3}} \right)} \end{aligned}$$

$$r_s = r_s^0 + f'_{\theta_s^0} (\theta_s - \theta_s^0)$$

Analyse des systèmes de climatisation

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort

• Découplage des chaleurs sensibles et latente

$$\dot{H}_I - \dot{H}_E = \dot{m}_{as} (h_I - h_E) = \dot{m}_{as} [(h_I - h_A) + (h_A - h_E)]$$

– chaleur sensible

$$\begin{aligned}\Delta \dot{H}_S &= \dot{m}_{as} \Delta h_S \\ &= \dot{m}_{as} [c_{as} (\theta_I - \theta_E) + c_v (r_I \theta_I - r_E \theta_E)] \\ &\cong \dot{m}_{as} c_{as} (\theta_I - \theta_E) = \dot{m}_{as} c_{as} \Delta \theta\end{aligned}$$

– chaleur latente

$$\Delta \dot{H}_L = \dot{m}_{as} h_L = \dot{m}_{as} l_v (r_I - r_E) = \dot{m}_{as} l_v \Delta r$$

$$\Delta \dot{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} \Delta \dot{H}_s \\ \Delta \dot{H}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{as} & 0 \\ 0 & l_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta r \end{bmatrix}$$

Analyse des systèmes de climatisation

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

Humidification

Déshumidif.

Récupération

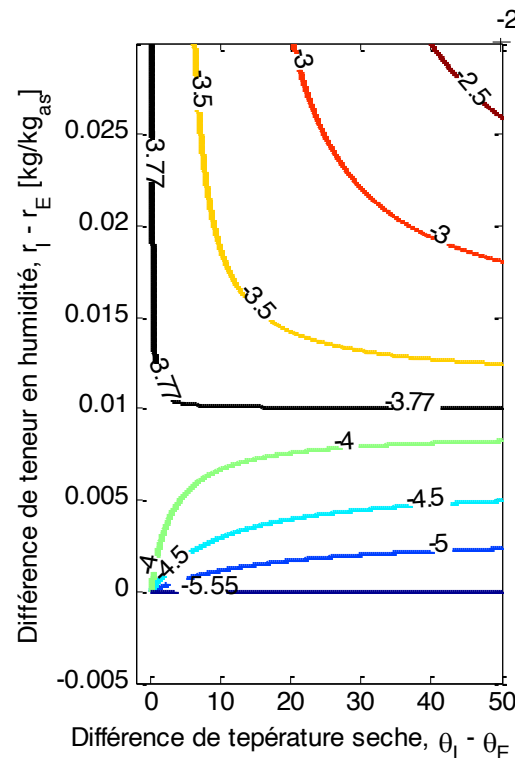
Analyse

Confort

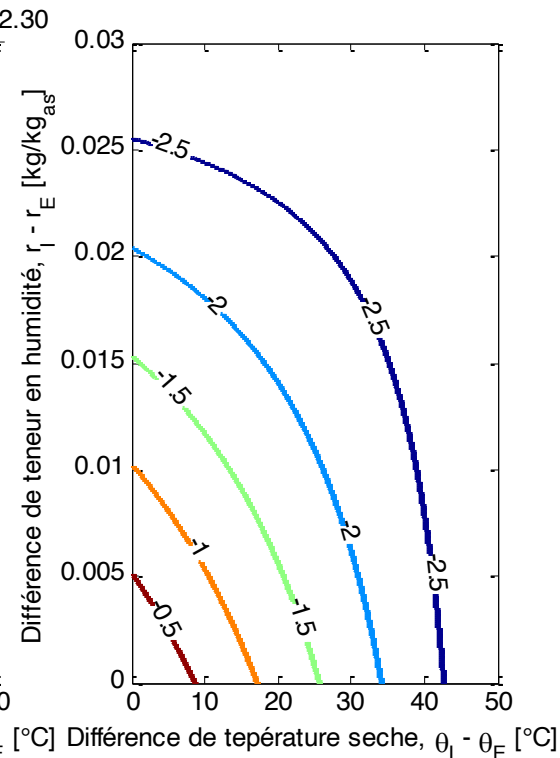
• Erreur introduite

- dans le domaine de variation des paramètres de l'air, l'erreur introduite en négligeant la chaleur sensible des vapeurs d'eau est inférieure à 5.5% en valeur relative

a) pourcentage



b) valeur absolue en kJ/kg.



Analyse des systèmes de climatisation

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

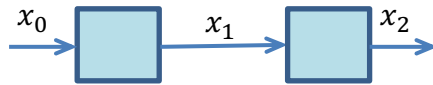
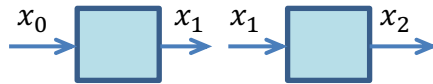
Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort



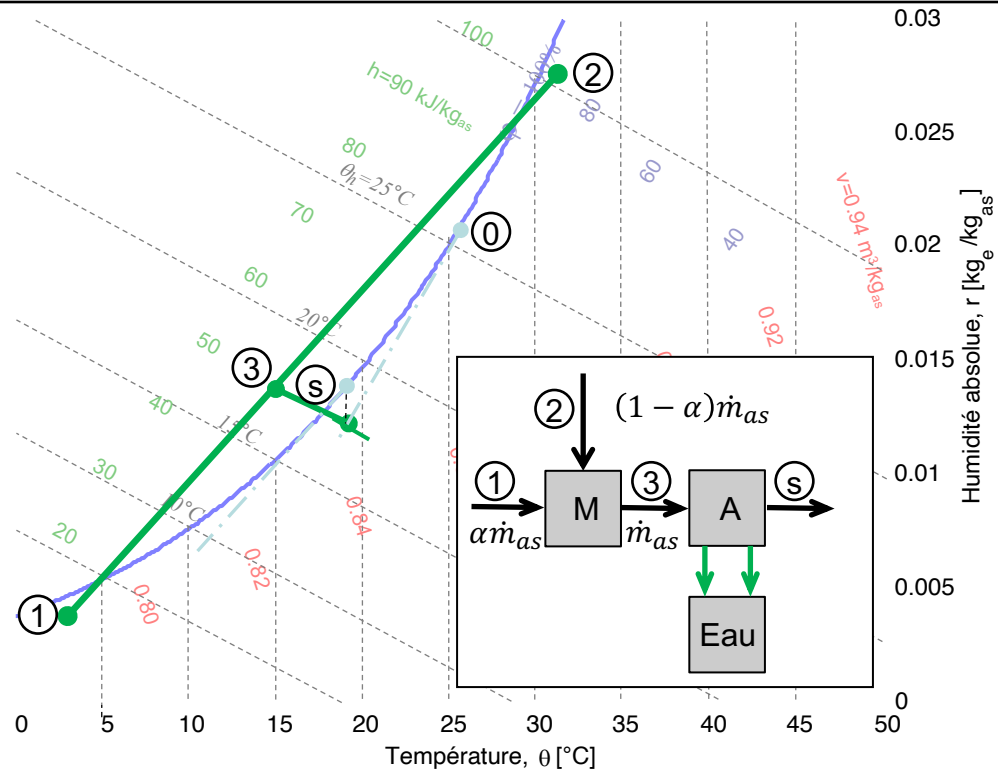
$$x_1 = a_0 x_0; \quad x_2 = a_1 x_1$$

$$\begin{cases} x_1 = a_0 x_0 \\ x_2 - a_1 x_1 = 0 \end{cases}$$

Analyse des systèmes de climatisation

Figure 2 Mélange adiabatique avec condensation

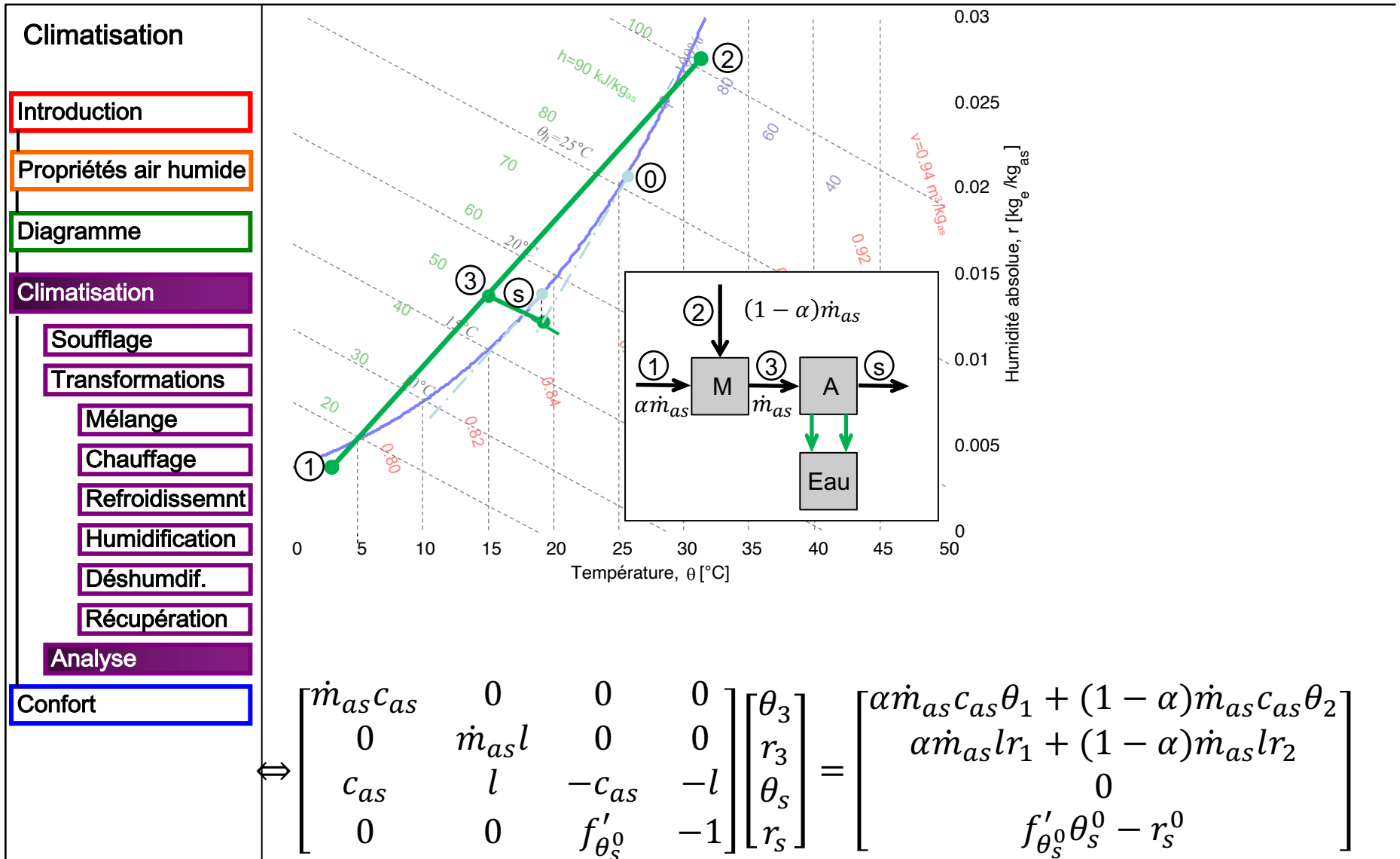
Climatisation
Introduction
Propriétés air humide
Diagramme
Climatisation
Soufflage
Transformations
Mélange
Chauffage
Refroidissement
Humidification
Déshumidif.
Récupération
Analyse
Confort



$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{m}_{as} c_{as} \theta_3 = \alpha \dot{m}_{as} c_{as} \theta_1 + (1 - \alpha) \dot{m}_{as} c_{as} \theta_2 \\ \dot{m}_{as} l r_3 = \alpha \dot{m}_{as} l r_1 + (1 - \alpha) \dot{m}_{as} l r_2 \\ c_{as} \theta_3 + l r_3 - c_{as} \theta_s - l r_s = 0 \\ f'_{\theta_s^0} \theta_s - r_s = f'_{\theta_s^0} \theta_s^0 - r_s^0 \end{array} \right.$$

Analyse des systèmes de climatisation

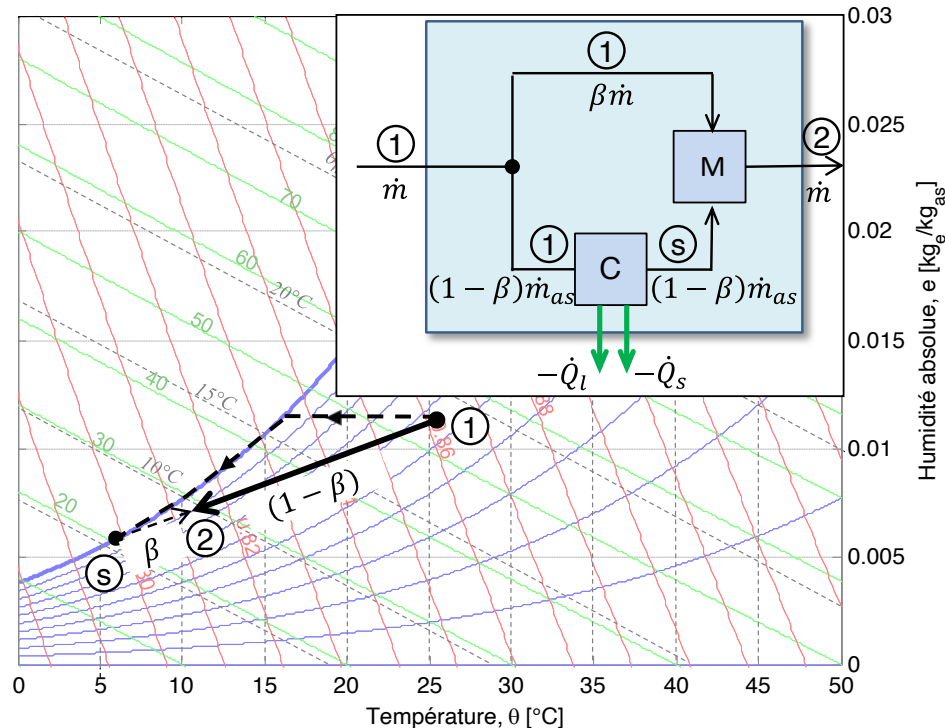
Figure 2 Mélange adiabatique avec condensation



Analyse des systèmes de climatisation

Figure 3 Refroidissement et déshumidification

Climatisation
Introduction
Propriétés air humide
Diagramme
Climatisation
Soufflage
Transformations
Mélange
Chauffage
Refroidissement
Humidification
Déshumidif.
Récupération
Analyse
Confort

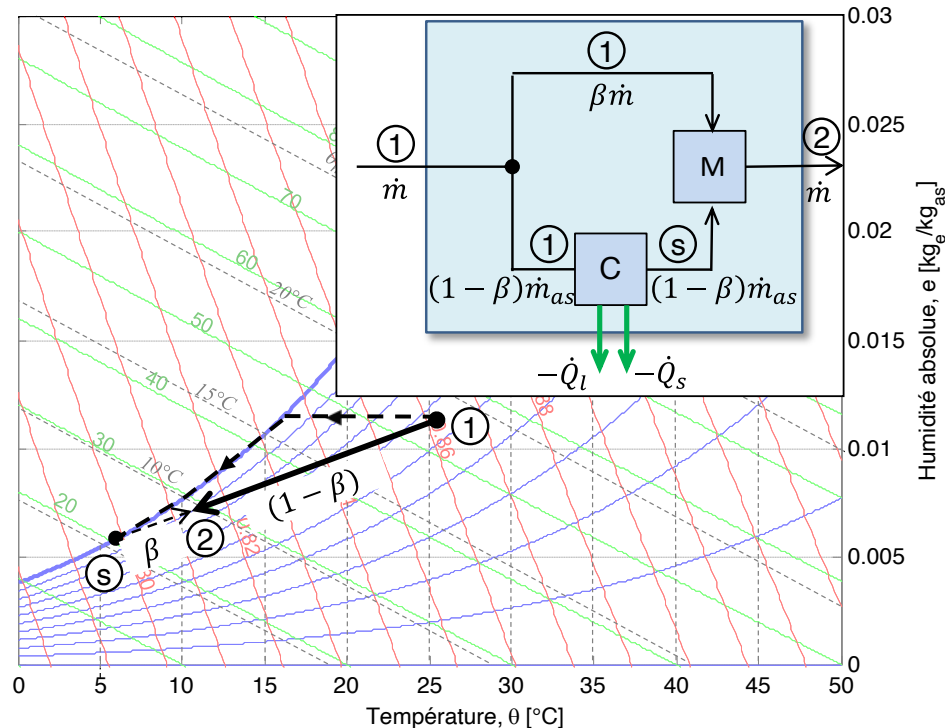


$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{m}_{as} c_{as} \theta_2 - (1 - \beta) \dot{m}_{as} c_{as} \theta_s = \beta \dot{m}_{as} c_{as} \theta_1 \\ \dot{m}_{as} l r_2 - (1 - \beta) \dot{m}_{as} l r_s = \beta \dot{m}_{as} l r_1 \\ (1 - \beta) \dot{m}_{as} c \theta_s + \dot{Q}_s = (1 - \beta) \dot{m}_{as} c \theta_1 \\ (1 - \beta) \dot{m}_{as} l r_s + \dot{Q}_l = (1 - \beta) \dot{m}_{as} l r_1 \\ f'_{\theta_s^0} \theta_s - r_s = f'_{\theta_s^0} \theta_s^0 - r_s^0 \\ \dot{Q}_s + \dot{Q}_l = \dot{Q}_{gf} \end{array} \right.$$

Analyse des systèmes de climatisation

Figure 3 Refroidissement et déshumidification

Climatisation
Introduction
Propriétés air humide
Diagramme
Climatisation
Soufflage
Transformations
Mélange
Chauffage
Refroidissement
Humidification
Déshumidif.
Récupération
Analyse
Confort



$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{m}_{as} c_{as} \theta_2 - (1 - \beta) \dot{m}_{as} c_{as} \theta_s = \beta \dot{m}_{as} c_{as} \theta_1 \\ \dot{m}_{as} l r_2 - (1 - \beta) \dot{m}_{as} l r_s = \beta \dot{m}_{as} l r_1 \\ (1 - \beta) \dot{m}_{as} c \theta_s + \dot{Q}_s = (1 - \beta) \dot{m}_{as} c \theta_1 \\ (1 - \beta) \dot{m}_{as} l r_s + \dot{Q}_l = (1 - \beta) \dot{m}_{as} l r_1 \\ f'_{\theta_s^0} \theta_s - r_s = f'_{\theta_s^0} \theta_s^0 - r_s^0 \\ \dot{Q}_s + \dot{Q}_l = \dot{Q}_{gf} \end{array} \right.$$

Analyse des systèmes de climatisation

Transformations de l'air dans un échangeur récupérateur d'énergie pendant la saison froide

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Soufflage

Transformations

Mélange

Chauffage

Refroidissement

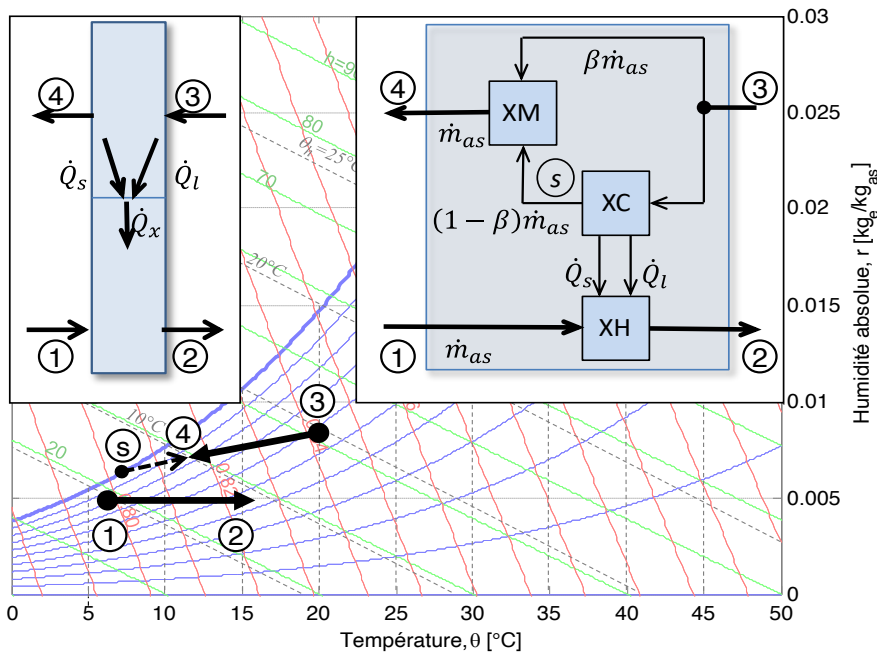
Humidification

Déshumidif.

Récupération

Analyse

Confort



$$\dot{Q}_x = UA(\bar{\theta}_{34} - \bar{\theta}_{12})$$

$$\dot{Q}_s + \dot{Q}_l = UA \left(\frac{\theta_3 + \theta_4}{2} - \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right)$$

$$\dot{m}_{as} c_{as} \theta_2 - \dot{Q}_x - h_e \dot{m}_{ex} = \dot{m}_{as} c_{as} \theta_1 \quad \text{XH}$$

$$\begin{cases} (1 - \beta) \dot{m}_{as} c_{as} \theta_s + \dot{Q}_s = (1 - \beta) \dot{m}_{as} c_{as} \theta_3 & \text{XC} \\ (1 - \beta) \dot{m}_{as} l r_s + \dot{Q}_l = (1 - \beta) \dot{m}_{as} l w_3 \\ f'_{\theta_s^0} \theta_s - w_s = f'_{\theta_s^0} \theta_s^0 - w_s^0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \theta_4 - (1 - \beta) \theta_s = \theta_3 \\ r_4 - (1 - \beta) r_s = r_3 \end{cases} \quad \text{XM}$$

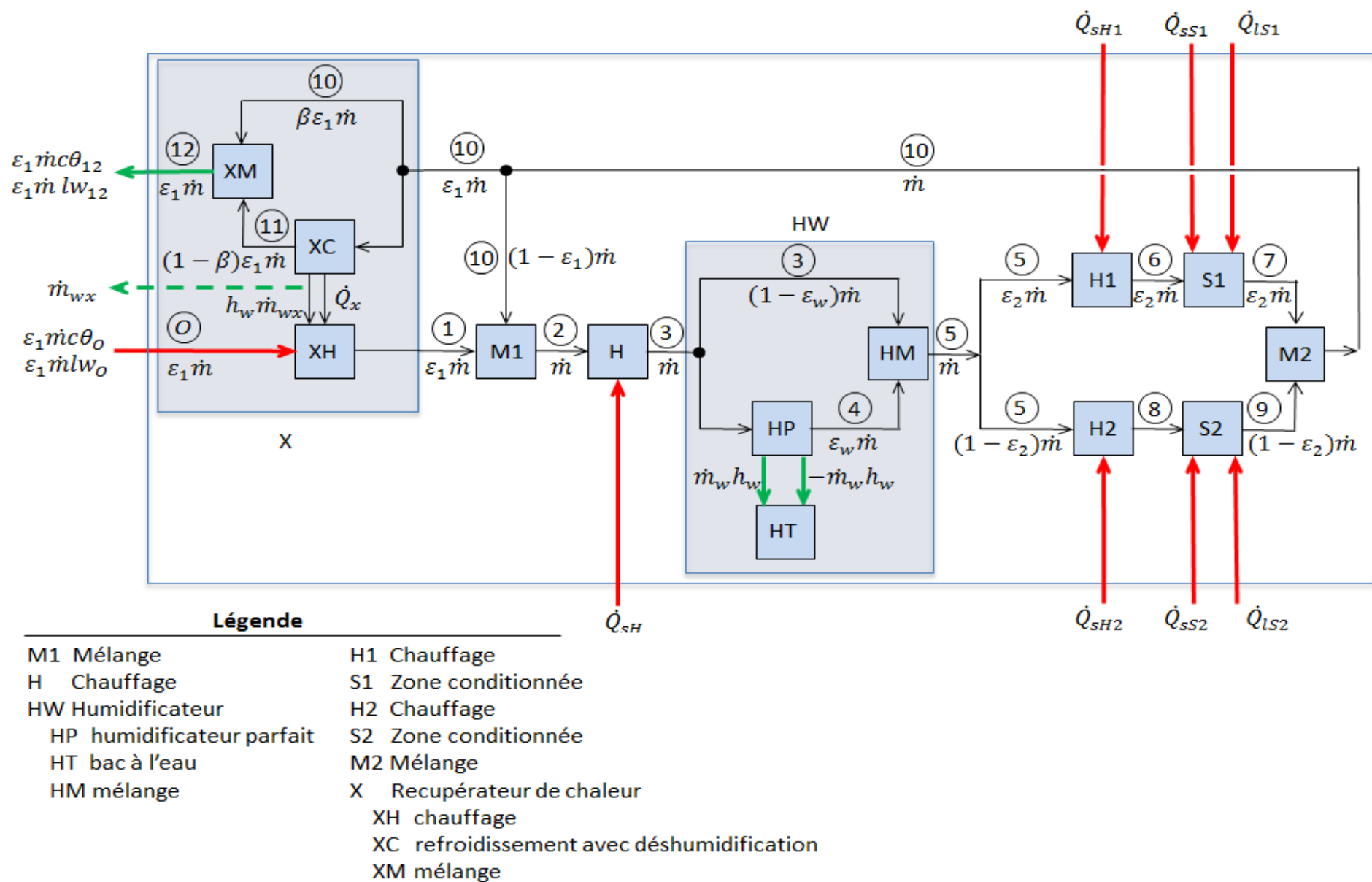
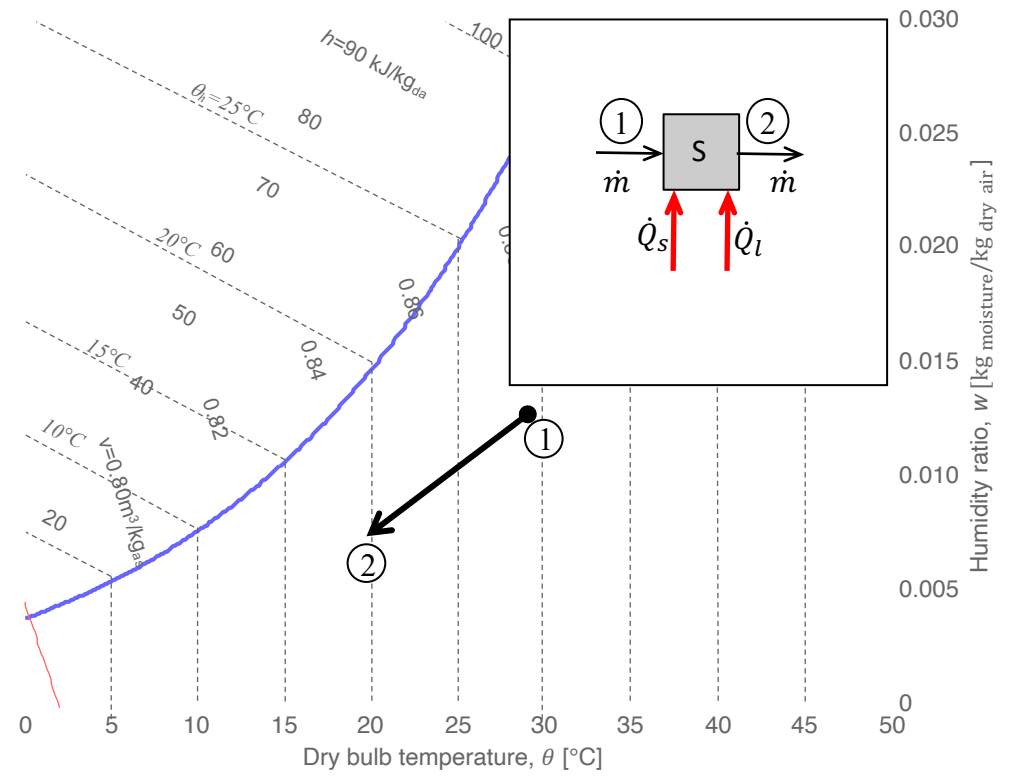
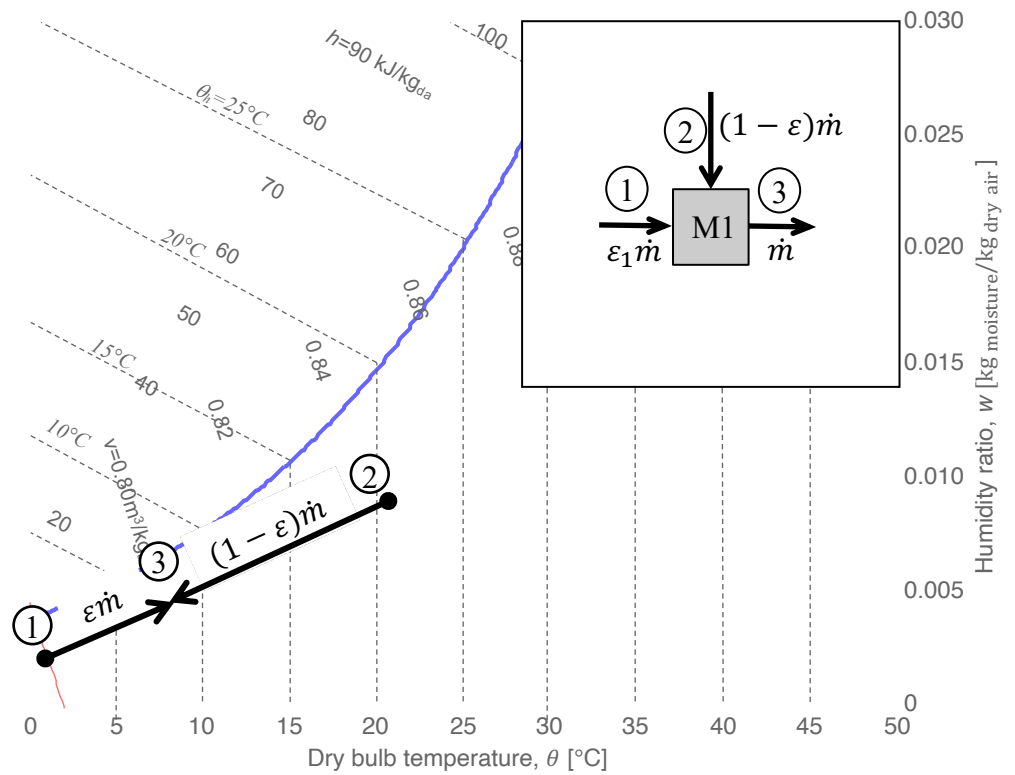


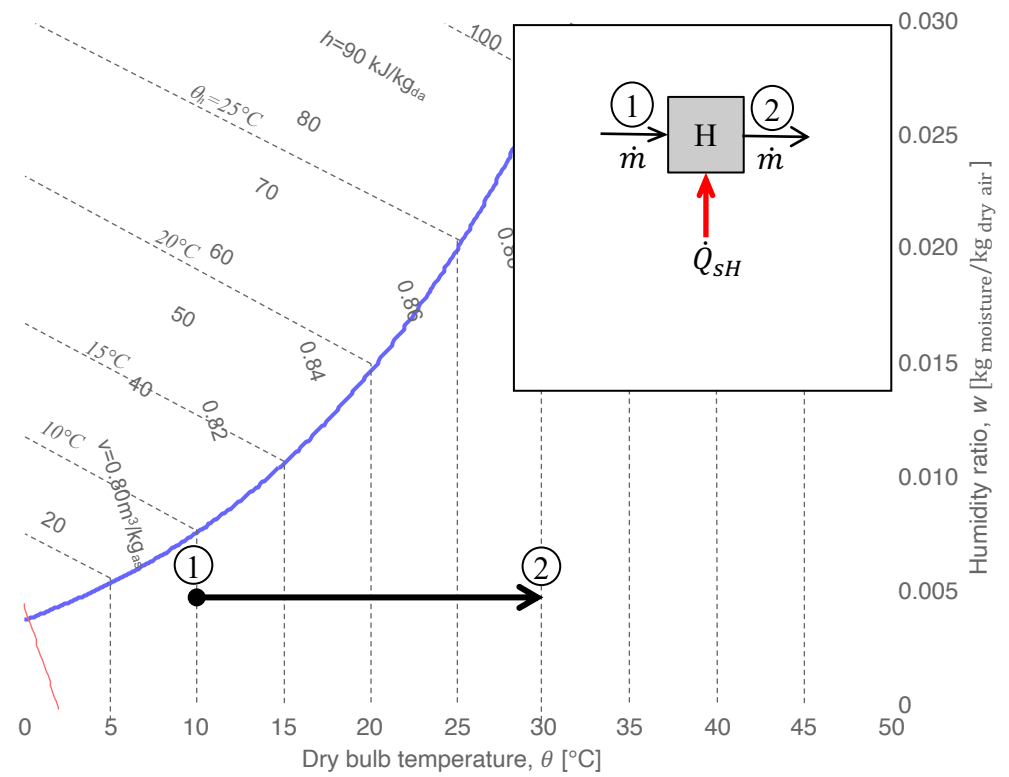
Figure 11 Chauffage et humidification de deux zones climatisées avec un système double flux avec récupération de l'énergie



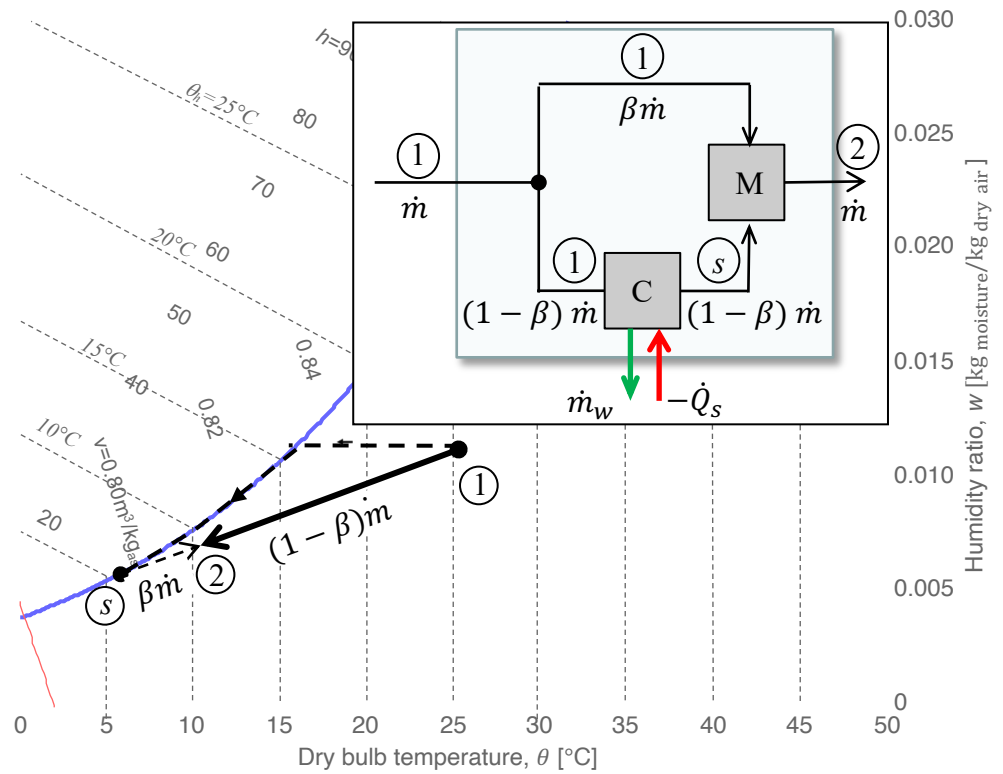
$$\begin{cases} \dot{m}c\theta_1 - \dot{m}c\theta_2 + UA(\theta_o - \theta_2) + \dot{m}_{inf}c(\theta_o - \theta_2) + \dot{Q}_{aux,s} = 0 \\ \dot{m}lw_1 - \dot{m}lw_2 + \dot{m}_{inf}l(w_o - w_2) + \dot{Q}_{aux,l} = 0 \end{cases}$$



$$\begin{cases} \epsilon \dot{m} c \theta_1 + (1 - \epsilon) \dot{m} c \theta_2 - \dot{m} c \theta_3 = 0 \\ \epsilon \dot{m} l w_1 + (1 - \epsilon) \dot{m} l w_2 - \dot{m} l w_3 = 0 \end{cases}$$



$$\begin{cases} \dot{m}c\theta_1 - \dot{m}c\theta_2 + \dot{Q}_{sH} = 0 \\ \dot{m}lw_1 - \dot{m}lw_2 = 0 \end{cases}$$



$$\begin{cases} \beta\dot{m}c\theta_1 + (1-\beta)\dot{m}c\theta_s - \dot{m}c\theta_2 = 0 \\ \beta\dot{m}lw_1 + (1-\beta)\dot{m}lw_s - \dot{m}lw_2 = 0 \\ \begin{cases} (1-\beta)\dot{m}c\theta_1 - (1-\beta)\dot{m}c\theta_s - \dot{Q}_s = 0 \\ (1-\beta)\dot{m}lw_1 + (1-\beta)\dot{m}lw_s - l\dot{m}_w = 0 \end{cases} \\ w_s = f(\theta) \quad w_s = w_s^0 + f'_{\theta_s^0}(\theta_s - \theta_s^0) \end{cases}$$

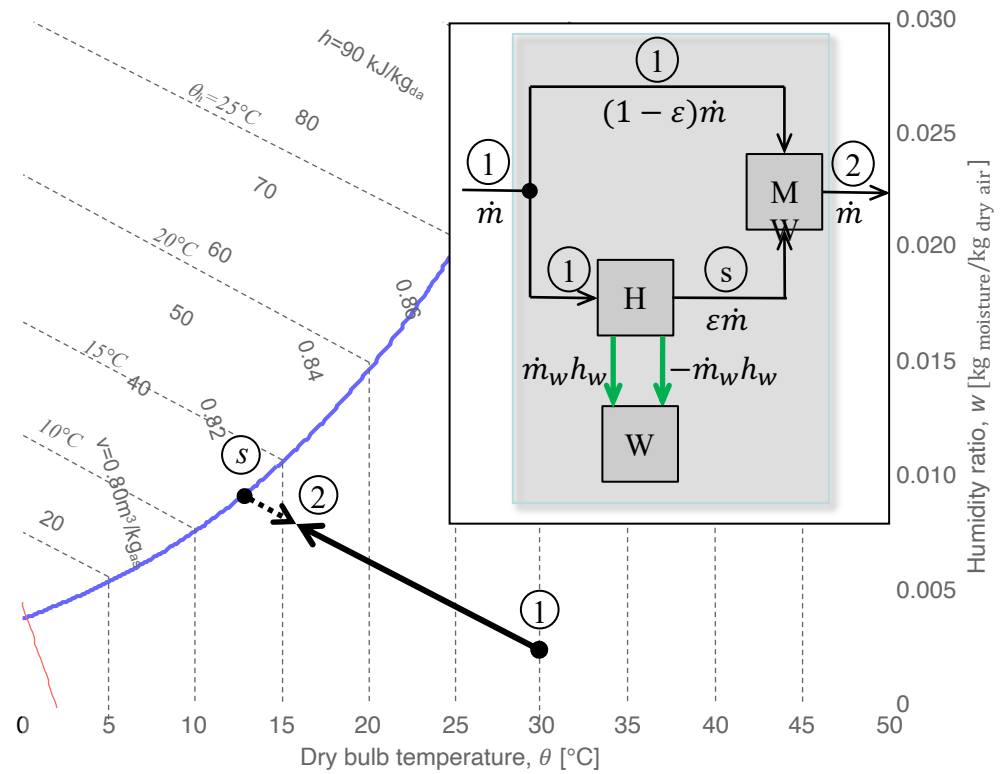
$$w_s = f(\theta)$$

$$w_s = f(\theta) = \frac{M_w}{M_{da}} \frac{p_{ws}}{p - p_{ws}} = 0.621\,547 \frac{p_{ws}}{p - p_{ws}}$$

$$p_{ws} = 610.78 \exp\left(\frac{17.2694 \theta}{\theta + 283.3}\right)$$

$$w_s = w_s^0 + f'_{\theta_s^0}(\theta_s - \theta_s^0)$$

$$\begin{aligned} f'_{\theta_s^0} &\equiv \left. \frac{df(\theta)}{d\theta} \right|_{\theta=\theta_s^0} = \frac{d}{d\theta} \left(\frac{M_w}{M_{da}} \frac{p_{ws}}{p - p_{ws}} \right) \\ &= \frac{M_w}{M_{da}} p \frac{2.51354 \cdot 10^6 e^{\frac{17.2694\theta_s^0}{\theta_s^0+238.3}}}{(\theta_s^0 + 283.3)^2 \left(p - 610.78 e^{\frac{17.2694\theta_s^0}{\theta_s^0+238.3}} \right)} \end{aligned}$$



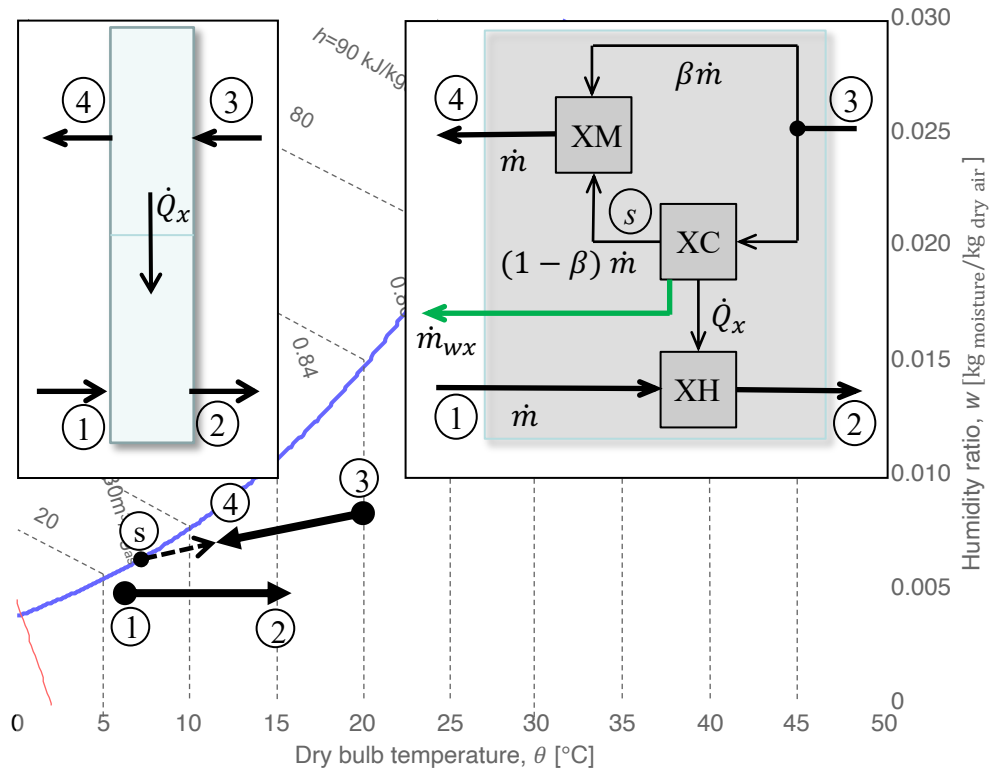
$$\begin{cases} (1 - \epsilon)\dot{m}c\theta_1 + \epsilon\dot{m}c\theta_s - \dot{m}c\theta_2 = 0 \\ (1 - \epsilon)\dot{m}lw_1 + \epsilon\dot{m}lw_s - \dot{m}lw_2 = 0 \end{cases}$$

$$c\theta_1 + lw_1 = c\theta_2 + lw_2 = c\theta_s + lw_s$$

$$w_s = w_s^0 + f'_{\theta_s^0}(\theta_s - \theta_s^0)$$

$$\dot{Q}_x = UA(\bar{\theta}_{34} - \bar{\theta}_{12})$$

$$\dot{Q}_x = UA \left(\frac{\theta_3 + \theta_4}{2} - \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right)$$



$$\begin{cases} \dot{m}c\theta_1 - \dot{m}c\theta_2 + \dot{Q}_x + l\dot{m}_{wx} = 0 \\ \dot{m}lw_1 - \dot{m}lw_2 = 0 \end{cases} \quad (\text{XH})$$

$$\begin{cases} (1 - \beta)\dot{m}c\theta_3 - (1 - \beta)\dot{m}c\theta_s - \dot{Q}_x = 0 \\ (1 - \beta)\dot{m}lw_3 - (1 - \beta)\dot{m}lw_s - h_w\dot{m}_{wx} = 0 \\ w_s - f'_{\theta_s^0} \theta_s = w_s^0 - f'_{\theta_s^0} \theta_s^0 \end{cases} \quad (\text{XC})$$

N°	Equations	Symbol	Process
1.	$-\varepsilon_1 \dot{m} c \theta_1 + \dot{Q}_x = -\varepsilon_1 \dot{m} c \theta_o$	XH	heating
2.	$-\varepsilon_1 \dot{m} l w_1 = -\varepsilon_1 \dot{m} l w_o$		
3.	$(1-b)\varepsilon_1 \dot{m} c \theta_{10} - (1-b)\varepsilon_1 \dot{m} c \theta_{11} - \dot{Q}_x = 0$	XC	cooling and dehumidification
4.	$(1-b)\varepsilon_1 \dot{m} l w_{10} - (1-b)\varepsilon_1 \dot{m} l w_{11} - h_w \dot{m}_{wx} = 0$		
5.	$w_{11} - f'_{\theta_{11}} \theta_{11} = w_{11}^0 - f'_{\theta_{11}} \theta_{11}^0$		
6.	$b\varepsilon_1 \dot{m} c \theta_{10} + (1-b)\varepsilon_1 \dot{m} c \theta_{11} - \varepsilon_1 \dot{m} c \theta_{12} = 0$	XM	mixing
7.	$b\varepsilon_1 \dot{m} l w_{10} + (1-b)\varepsilon_1 \dot{m} l w_{11} - \varepsilon_1 \dot{m} l w_{12} = 0$		
8.	$UA\theta_1 - UA\theta_{10} - UA\theta_{11} + 2Q_x = UA\theta_o$		heat transfer between exhaust and fresh air
9.	$\varepsilon_1 \dot{m} c \theta_1 - \dot{m} c \theta_2 + (1-\varepsilon_1) \dot{m} c \theta_{10} = 0$	M1	adiabatic mixing
10.	$\varepsilon_1 \dot{m} l w_1 - \dot{m} l w_2 + (1-\varepsilon_1) \dot{m} l w_{10} = 0$		
11.	$\dot{m} c \theta_2 - \dot{m} c \theta_3 = -\dot{Q}_{sH}$	H	heating
12.	$\dot{m} l w_2 - \dot{m} l w_3 = 0$		
13.	$c\theta_3 + lw_3 - c\theta_4 - lw_4 = 0$	W	adiabatic humidification
14.	$w_4 - f'_{\theta_4} \theta_4 = w_4^0 - f'_{\theta_4} \theta_4^0$		
15.	$(1-\varepsilon_w) \dot{m} c \theta_3 + \varepsilon_w \dot{m} c \theta_4 - \dot{m} c \theta_5 = 0$	MW	mixing
16.	$(1-\varepsilon_w) \dot{m} l w_3 + \varepsilon_w \dot{m} l w_4 - \dot{m} l w_5 = 0$		
17.	$\varepsilon_2 \dot{m} c \theta_5 - \varepsilon_2 \dot{m} c \theta_6 = -\dot{Q}_{sH1}$	H1	heating
18.	$\varepsilon_2 \dot{m} l w_5 + \varepsilon_2 \dot{m} l w_6 = 0$		
19.	$\varepsilon_2 \dot{m} c \theta_6 - (\varepsilon_2 \dot{m} c + U_1 A_1 + \dot{m}_{inf1} c) \theta_7 = -\dot{Q}_{aux, sS1} - (U_1 A_1 + \dot{m}_{inf1} c) \theta_o$	S1	air-conditioned space
20.	$\varepsilon_2 \dot{m} l w_6 - (\varepsilon_2 \dot{m} l + \dot{m}_{inf1} l) w_7 = -\dot{Q}_{aux, lS1} - \dot{m}_{inf1} l w_o$		
21.	$(1-\varepsilon_2) \dot{m} c \theta_5 - (1-\varepsilon_2) \dot{m} c \theta_8 = -\dot{Q}_{sH2}$	H2	heating

$$10. \quad \varepsilon_2 mW_5 + \varepsilon_2 mW_6 = 0$$

$$19. \quad \varepsilon_2 \dot{m} c \theta_6 - (\varepsilon_2 \dot{m} c + U_1 A_1 + \dot{m}_{inf1} c) \theta_7 = -\dot{Q}_{aux,SS1} - (U_1 A_1 + \dot{m}_{inf1} c) \theta_o \quad S1 \quad \text{air-conditioned space}$$

$$20. \quad \varepsilon_2 \dot{m} l w_6 - (\varepsilon_2 \dot{m} l + \dot{m}_{inf1} l) w_7 = -\dot{Q}_{aux,LS1} - \dot{m}_{inf1} l w_o$$

$$21. \quad (1 - \varepsilon_2)\dot{m}c\theta_5 - (1 - \varepsilon_2)\dot{m}c\theta_8 = -\dot{Q}_{sH2}$$

$$22. \quad (1 - \varepsilon_2)\dot{m}lw_5 + (1 - \varepsilon_2)\dot{m}lw_8 = 0$$

23.	$(1 - \varepsilon_2)\dot{m}c\theta_8 - [(1 - \varepsilon_2)\dot{m}c + U_2A_2 + \dot{m}_{inf\,2}c)\theta_9$ $= -\dot{Q}_{aux,S2} - (U_1A_1 + \dot{m}_{inf\,1}c)\theta_o$	S2	air-conditioned space
-----	---	----	-----------------------

$$24. \quad (1 - \varepsilon_2)\dot{m}lw_8 - [(1 - \varepsilon_2)\dot{m}l + \dot{m}_{inf1}l]w_9 = -\dot{Q}_{aux,LS2} - \dot{m}_{inf2}lw_o$$

25.	$\varepsilon_2 \dot{m} c \theta_7 + (1 - \varepsilon_2) \dot{m} c \theta_9 - \dot{m} c \theta_{10} = 0$	M2	mixing
-----	---	----	--------

$$26. \quad \varepsilon_2 \dot{m}lw_7 + (1 - \varepsilon_2) \dot{m}lw_9 - \dot{m}lw_{10} = 0$$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
θ_1	w_1	θ_2	w_2	θ_3	w_3	θ_4	w_4	θ_5	w_5	θ_6	w_6	θ_7	w_7	θ_8	w_8	θ_9	w_9	θ_{10}

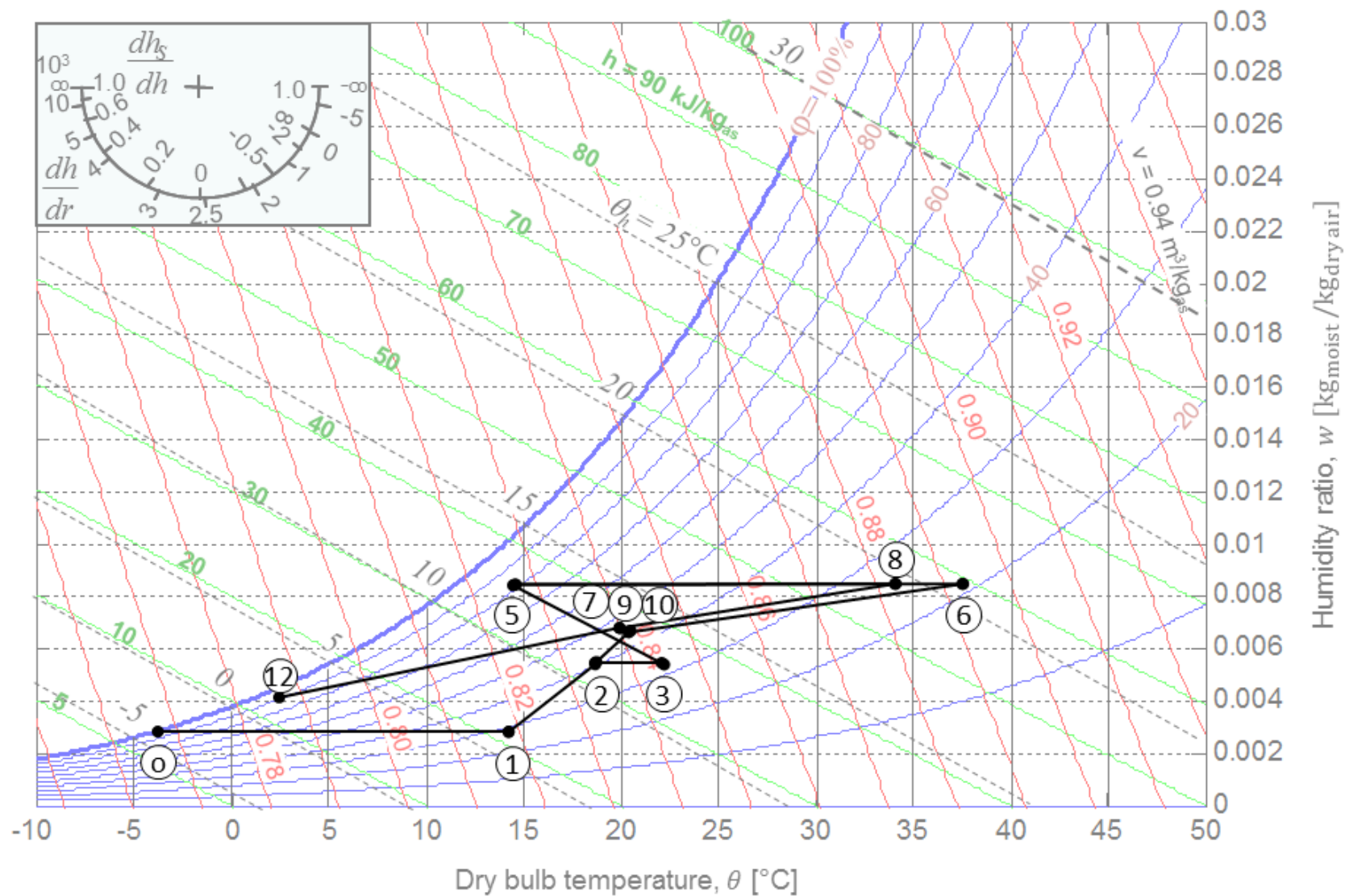
9	20	21	22	23	24	25	26
0	w_{10}	θ_{11}	w_{11}	θ_{12}	w_{12}	$\dot{Q}_x$	$\dot{m}_{wx}$

$$\mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{b}$$

<i>Index of unknown</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Unknown</i>	θ_1	w_1	θ_2	w_2	θ_3	w_3	θ_4	w_4	θ_5	w_5
<i>Iteration 1</i>	13.9	2.8	18.2	5.4	22.0	5.4	12.9	9.0	14.7	8.4
2	13.9	2.8	18.1	5.4	21.9	5.4	12.8	9.2	14.6	8.4
3	13.9	2.8	18.1	5.5	21.9	5.5	12.8	9.2	14.6	8.4

<i>Index of unknown</i>	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<i>Unknown</i>	θ_6	w_6	θ_7	w_7	θ_8	w_8	θ_9	w_9	θ_{10}	w_{10}
<i>Iteration 1</i>	37.6	8.3	20.4	6.6	34.4	8.3	20.3	7.3	20.4	6.8
2	37.5	8.4	20.3	6.6	34.2	8.4	20.2	7.3	20.3	6.8
3	37.5	8.4	20.3	6.6	34.2	8.4	20.2	7.3	20.3	6.8

<i>Index of unknown</i>	21	22	23	24	25	26
<i>Unknown</i>	θ_{11}	w_{11}	θ_{12}	w_{12}	$\dot{Q}_x$	$\dot{m}_{wx}$
<i>Iteration 1</i>	0.4	6.8	2.4	6.8	5.4	0
2	0.4	3.9	2.4	4.2	5.4	0.8
3	0.4	3.9	2.4	4.2	5.4	0.8



Confort thermique

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Confort thermique

Bilan enthalpique

Indices

- **La satisfaction des personnes avec leur environnement thermique**
- **Question :**
 - Le confort correspond-il à l'état d'esprit dans lequel l'individu éprouve de **la satisfaction** à l'égard de son environnement ou celui dans lequel il n'éprouve **pas d'insatisfaction** ?
- **Le confort déduit des réponses subjectives**
 - l'estimation subjective des sensations et du confort est normalisée sur la base de trois questions essentielles :
 - sensation
 - agrément
 - préférence

Confort thermique

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Confort thermique

Bilan enthalpique

Indices

- **Exemple 1**

- **sensation** : je n'ai ni chaud, ni froid,
- **agrément** : je trouve cela légèrement agréable,
- **préférence** : je ne souhaite aucun changement de climat.

- **Exemple 2**

- **sensation** : j'ai légèrement chaud,
- **agrément** : je trouve cela agréable,
- **préférence** : je préférerais avoir un peu plus chaud.

Confort thermique

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Confort thermique

Bilan enthalpique

Indices

- **Chaleur accumulée**

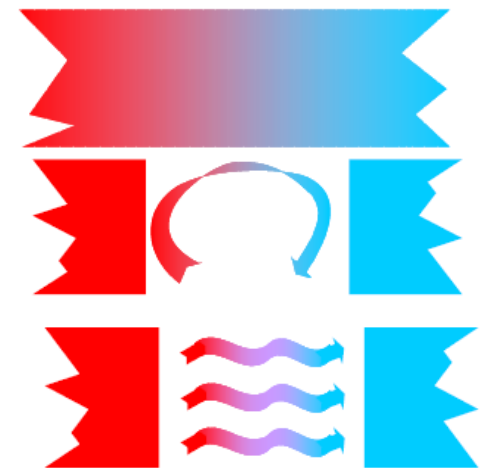
$$Q = mc_p(T_2 - T_1)$$

- **Formes de transfert
(chaleur sensible)**

- Conduction
- Convection
- Rayonnement

- (chaleur latente)**

- Evaporation condensation



Confort thermique

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

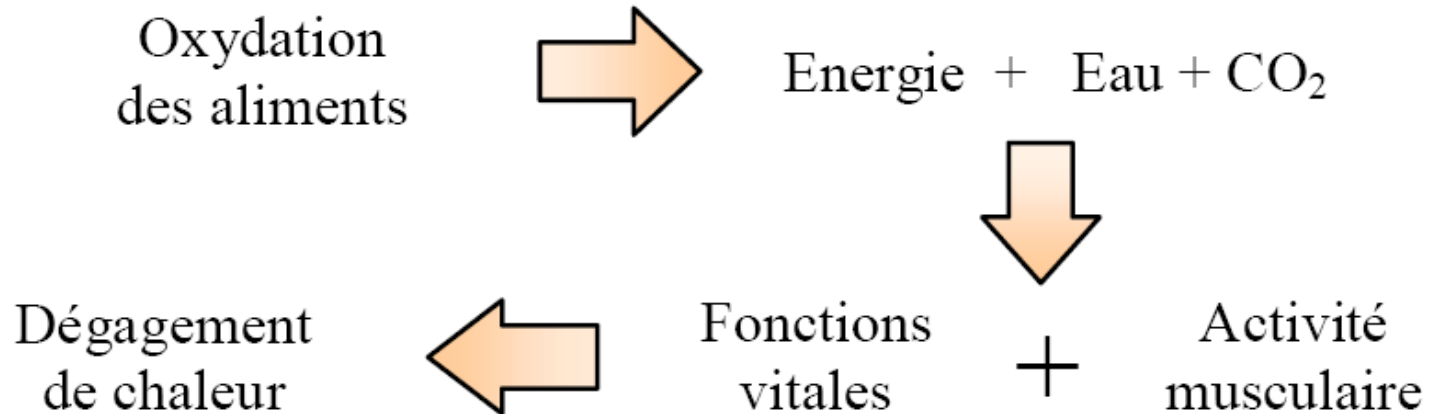
Climatisation

Confort thermique

Bilan enthalpique

Indices

- **Métabolisme humaine**



Métabolisme = Puissance totale produite par le corps [met]

$$1 \text{ met} = 58 \text{ W/m}^2_{\text{corps}}$$

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Confort thermique

Bilan enthalpique

Indices

- **Métabolisme humaine**

$$\frac{dq_c}{dt} = M - W - \dot{q}_p - \dot{q}_r$$

q_c quantité de chaleur du corps

M flux de chaleur produit par métabolisme

W énergie mécanique dispensé par mouvement

$\dot{q}_p = \dot{q}_{pc} + \dot{q}_{pr} + \dot{q}_{pl}$ flux de chaleur par la peau

$\dot{q}_r = \dot{q}_{ra} + \dot{q}_{rl}$ flux de chaleur par respiration

Confort thermique

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Confort thermique

Bilan enthalpique

Indices



- **conduction** – contact. Objet froid ou conducteur de chaleur (métal, pierre) → sensation de froid. Si il est chaud ou isolant thermique → sensation de chaud.



- **convection** – air ambiant. La sensation de froid (ou de chaud si l'air est trop chaud) est augmentée par le vent relatif.

Confort thermique

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Confort thermique

Bilan enthalpique

Indices



- **rayonnement** – surfaces. Surfaces sont froides, elles nous rafraîchissent (plafonds froids). Dans le cas contraire (soleil, surface du calorifère, radiateur)



- **évapotranspiration** – air avec point de rosée $<$ temp. peau. Evacuer de la chaleur même si l'air ou les surfaces environnantes sont plus chauds que notre peau. Si le point de rosée dépasse la température de la peau, c'est la vapeur qui s'y condense, en chauffant la peau (dans le sauna)

Confort thermique

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

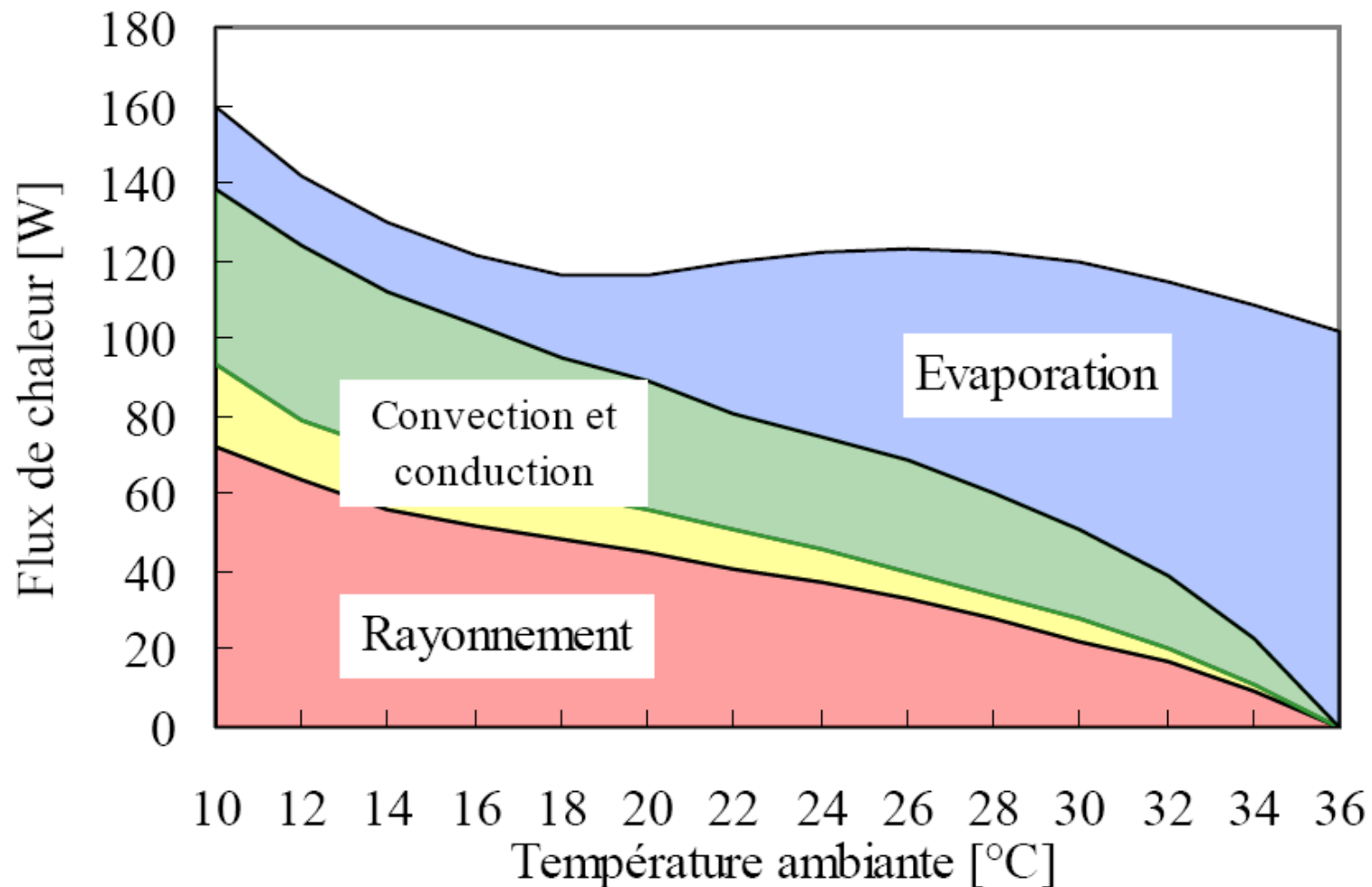
Climatisation

Confort thermique

Bilan enthalpique

Indices

- **Métabolisme humaine**



Confort thermique

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Confort thermique

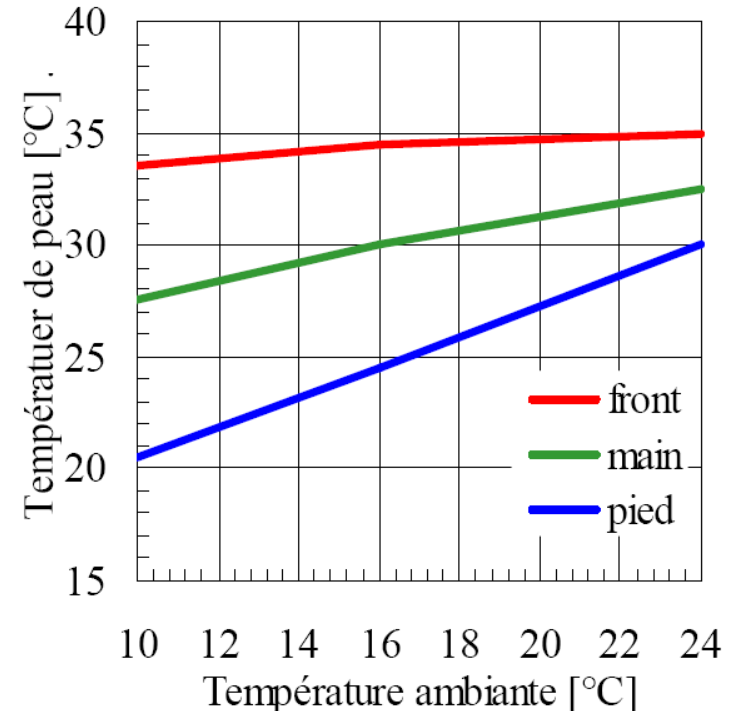
Bilan enthalpique

Indices

- **Le corps est homéotherme**

- l'hypothalamus déclenche les fonctions de rafraîchissement du corps lorsque la température interne dépasse 37°C
- les capteurs sensoriels de la peau déclenchent les fonctions de protection lorsque la température superficielle descend en dessous de 34°C

- La température de la peau varie en fonction de circonstances



Confort thermique

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Confort thermique

Bilan enthalpique

Indices

- **Facteurs environnementaux :**

- température de thermomètre sec ;
- humidité relative ;
- vitesse de l'air ;
- température des surfaces vues par le corps et avec qui le corps a des échanges radiatifs.

- **Facteurs individuels :**

- métabolisme
- habillement

Confort thermique

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Confort thermique

Bilan enthalpique

Indices

• Métabolisme

$1 \text{ met} = 58.1 \text{ W/m}^2$

Activité	Dégagement de chaleur		
	(ASTM)	W/m ² †	W/pers*
Couché, inactif, sommeil	0,8	46	83
Assis inactif	1,0	58	104
Activité sédentaire (bureau, lecture, études)	1,2	70	126
Debout, inactif	1,2	70	126
Activité légère, debout (magasin, établi, laboratoire)	1,6	93	167
Travail debout (ménage, atelier)	2,0	116	209
Marche (4 km/h)	2,8	162	292
Travail intensif (mécanique lourde)	3,0	174	313
Marche (5 km/h)	3,4	197	354
Course (10 km/h)	8,0	464	834

† par rapport à la surface du corps.

* valable pour une personne de 1,8 m² de surface corporelle (par ex. taille 1.7 m, poids 69 kg)

0,8 MET

8 MET

4 MET



1 MET

Confort thermique

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Confort thermique

Bilan enthalpique

Indices

- Habillement**

$$1 \text{ clo} = 0.155 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

Tenue vestimentaire	clo	m ² K/W
Nu, debout	0,0	0,0
Shorts, costume de bain	0,1	0,015
Tenue tropicale : slip, chemise courte à col ouvert, shorts, chaussettes légères et sandales	0,3	0,045
Tenue d'été : slip, chemise courte à col ouvert, pantalons longs légers ou jupe chaussettes légères et chaussures	0,5	0,08
Tenue de travail légère : sous-vêtements légers, chemise courte à col ouvert, pantalons de travail, chaussettes et chaussures	0,7	0,11
Tenue d'intérieur pour l'hiver : sous-vêtements, chemise à manches longues, pull-over, pantalons ou robe, chaussettes et chaussures	1,0	0,15
Tenue de ville : sous-vêtements à manches et jambes longues, chemise à manches longues, pantalons et gilet ou robe, veste, chaussettes épaisses et chaussures	1,5	0,23
Tenue d'hiver fourrée	3,0	0,45

Confort thermique

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Confort thermique

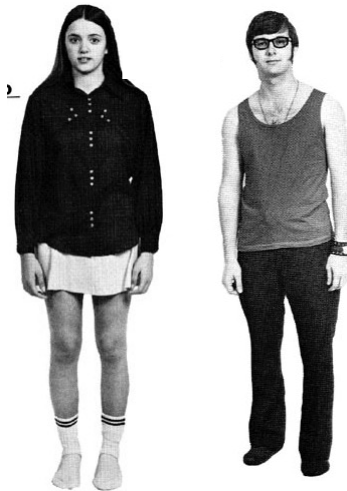
Bilan enthalpique

Indices

• Habillement

$$1 \text{ clo} = 0.155 \text{ m}^2 \text{K/W}$$

0,4 CLO



0,6 CLO



0,8 CLO



Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Confort thermique

Bilan enthalpique

Indices

Climatisation

- **Mesure du confort**

- Echelle (ISO 7730)

-3	très		froid
-2	froid	insatisfait parce que trop	froid
-1	frais		
0	confortable	satisfait	
1	tiède		
2	chaud	insatisfait parce que trop	chaud
3	très chaud		

Confort thermique

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Confort thermique

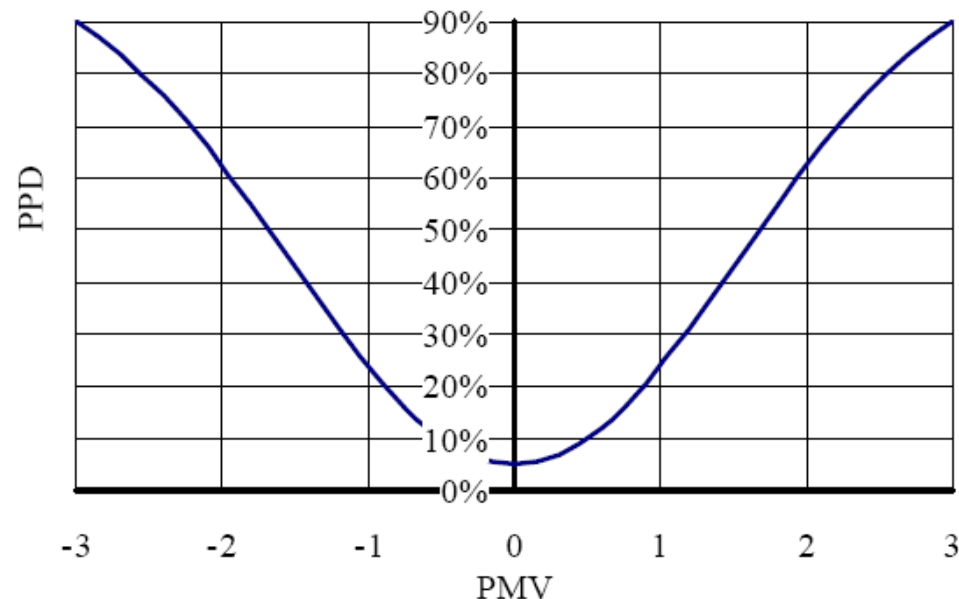
Bilan enthalpique

Indices

Climatisation

• Mesure du confort

- **vote moyen *PMV*** (Predicted Mean Vote) = l'appréciation moyenne d'une population dans un environnement donné, sur l'échelle de -3 à + 3. Le confort optimal correspond à un PMV nul.
- ***pourcentage prévu de personnes mecontentes PPD*** (Predicted Percentage of Dissatisfied) .



Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Confort thermique

Bilan enthalpique

Indices

• Indices

- **température radiante moyenne** = température d'une surface fictive isotherme noire dans laquelle une personne échangerait le même flux de chaleur que dans l'environnement réel ; mesurée par la **température du globe noir**.

$$\bar{T}_r^4 = T_g^4 + C v^{1/2} (T_g - T_a)$$

$$C = 0.247 \cdot 10^9 \text{ (s/m)}^{0.5}$$

- **température opérative** est la température d'un environnement homogène qui engendrerait le même flux de chaleur sensible que l'environnement réel.

$$\theta_o = \frac{h_r \bar{\theta}_r + h_c \theta_a}{h_r + h_c} \cong \frac{\bar{\theta}_r + \theta_a}{2}$$

Confort thermique

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Confort thermique

Bilan enthalpique

Indices

- **Indices**

- **Température effective** = la température de l'air qui, à l'humidité relative 50%, donne la même sensation de confort que la **température opérative** combinée avec la **humidité relative de l'ambiance réelle**, à condition que la **vitesse de l'air reste constante**.

Le fait que la température effective dépend des facteurs individuels (c. à d. l'activité et l'habillement) rend son calcul laborieux.

Confort thermique

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

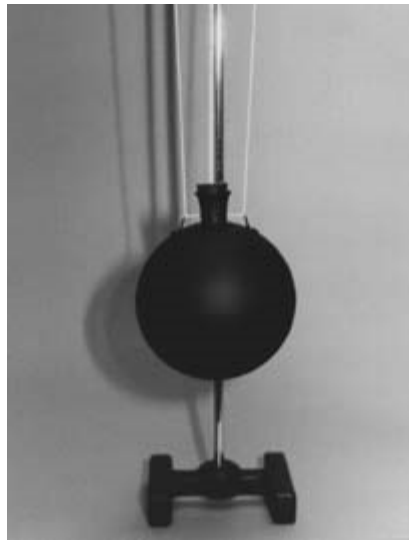
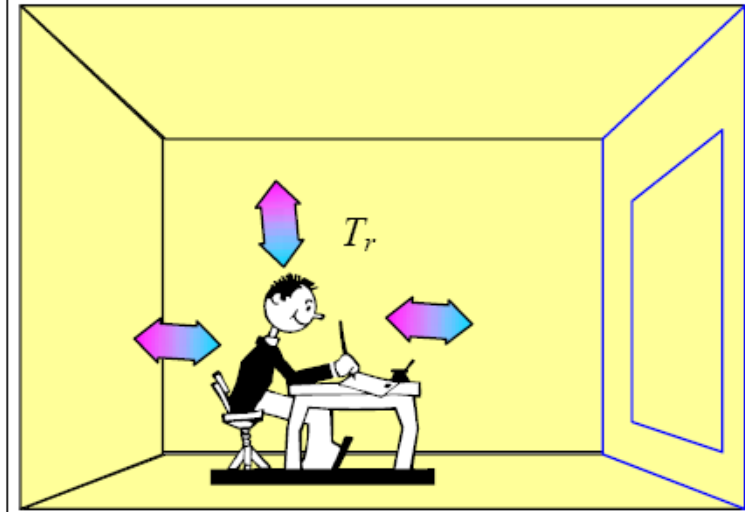
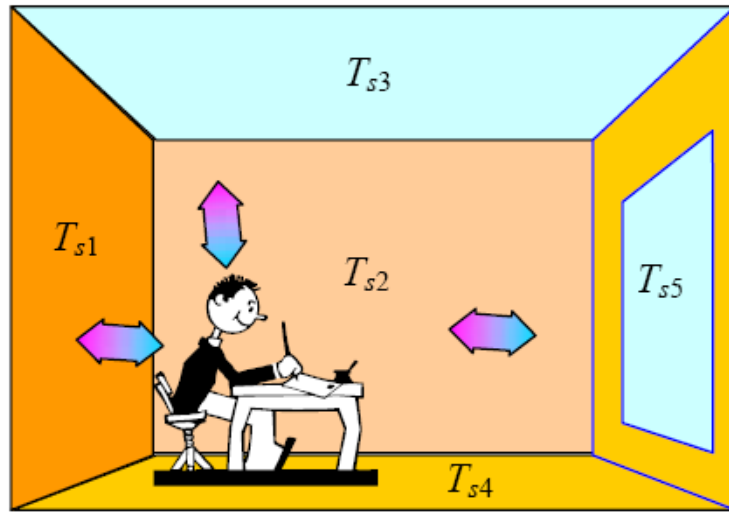
Confort thermique

Bilan enthalpique

Indices

• Indices

– température radiante moyenne et opérative

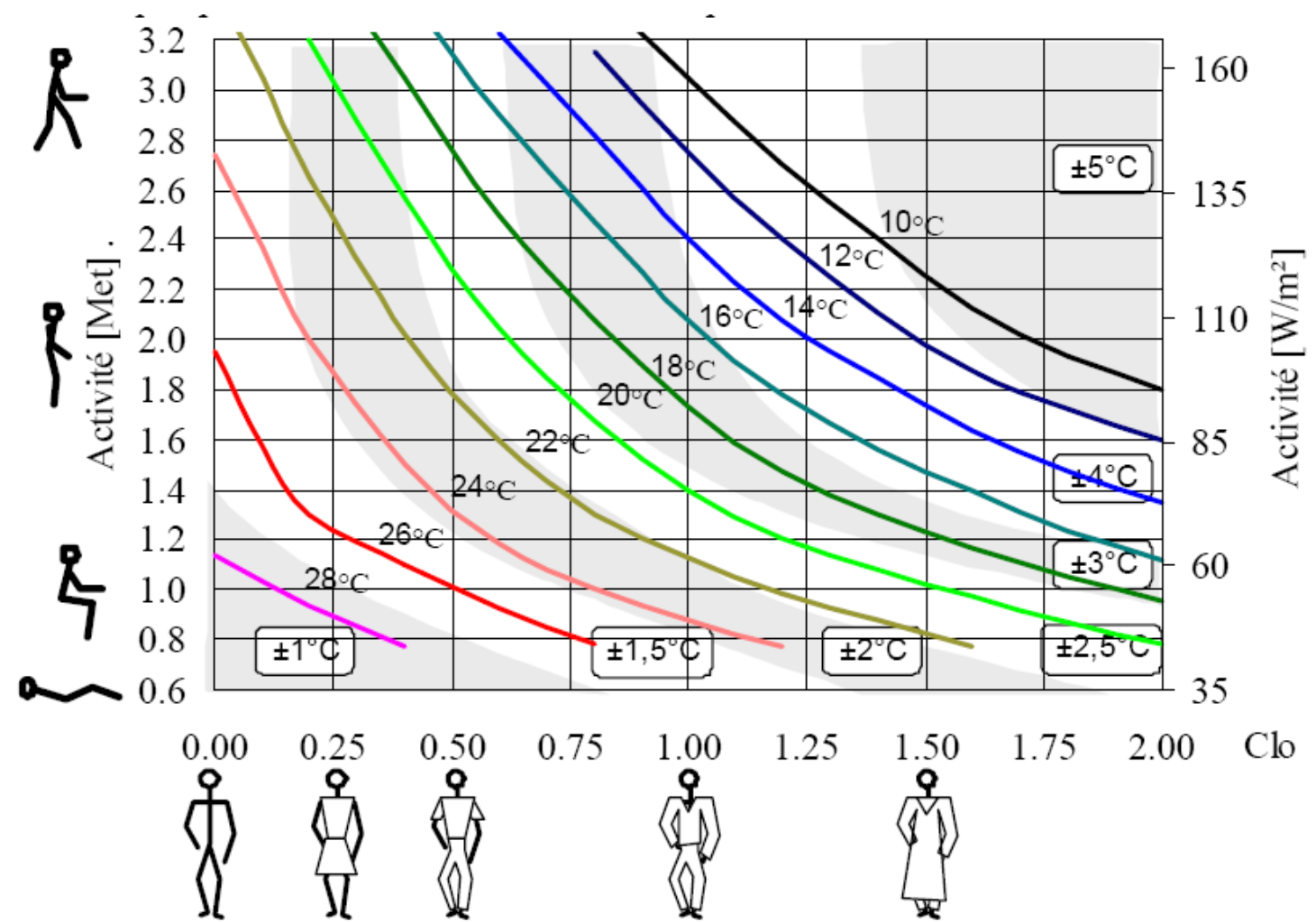


Confort thermique

Climatisation

- Introduction
- Propriétés air humide
- Diagramme
- Climatisation
- Confort thermique
- Bilan enthalpique
- Indices

- Température opérative idéale en fonction de l'habillement et du métabolisme (ISO 1993).



Confort thermique

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Confort thermique

Bilan enthalpique

Indices

- Température opérative forfaitaires (CEN 1998)*

Espace	Habillement (clo)		Activité (met)	Classe de confort	Température en	
	Eté	Hiver			Eté	Hiver
Bureau	0,5	1,0	1,2	A (haute)	24.5 ± 0.5	22.0 ± 1.0
				B (moyenne)	24.5 ± 1.5	22.0 ± 2.0
				C (minimum)	24.5 ± 2.5	22.0 ± 3.0
Cafétéria ou restaurant	0,5	1,0	1,4	A	23.5 ± 1.0	20.0 ± 1.0
				B	23.5 ± 2.0	20.0 ± 2.5
				C	23.5 ± 2.5	20.0 ± 3.5
Dépôt	0,5	1,0	1,6	A	23.0 ± 1.0	19.0 ± 1.5
				B	23.0 ± 2.0	19.0 ± 3.0
				C	23.0 ± 3.0	19.0 ± 4.0

Confort thermique

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

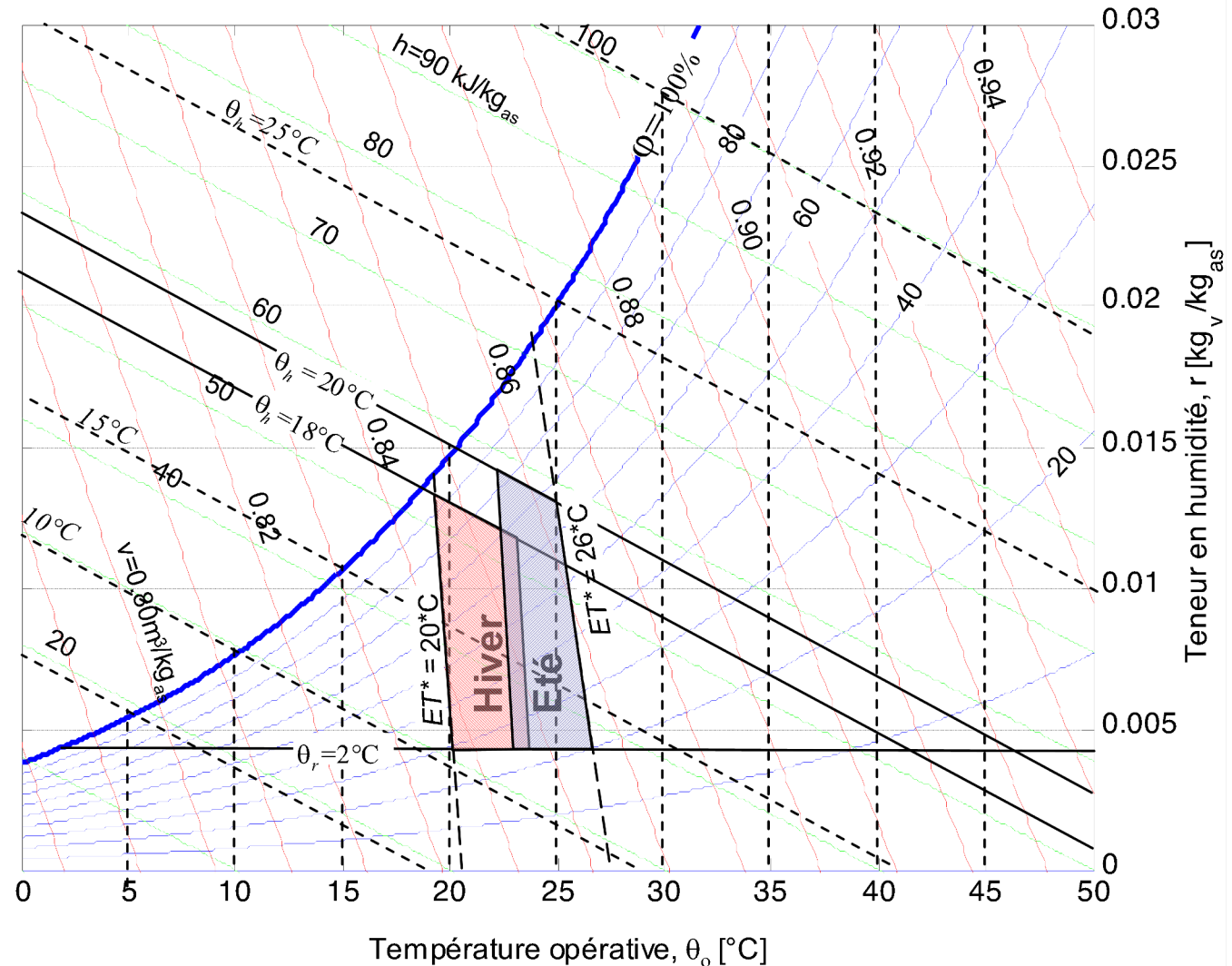
Climatisation

Confort thermique

Bilan enthalpique

Indices

- ## Zones de confort (ASHRAE).



Confort thermique

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

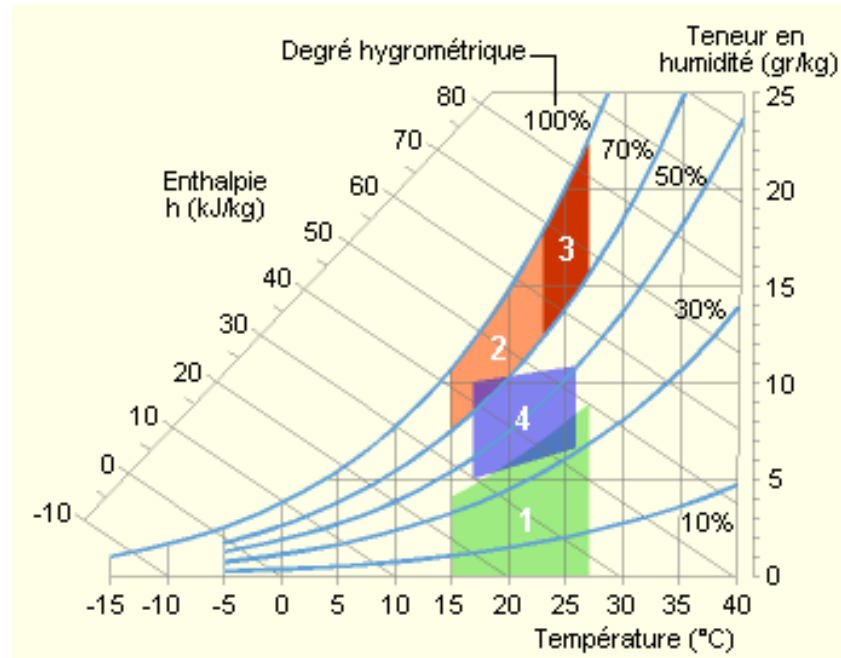
Climatisation

Confort thermique

Bilan enthalpique

Indices

• Zones de confort



source : [Energieplus](#)

1. Zone à éviter vis-à-vis des problèmes de sécheresse.
- 2 et 3. Zones à éviter vis-à-vis des développements de bactéries et de micro-champignons.
3. Zone à éviter vis-à-vis des développements d'acariens.
4. Polygone de confort hygrothermique

Confort thermique

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Confort thermique

Bilan enthalpique

Indices

- **Zones de confort**

Les zones de confort pour autre facteur individuel s'obtiennent par la modification des limites de la température opérative :

- + 0.6 K pour chaque 0.1 clo d'habillage supplémentaire ;
- -1.4 K pour chaque augmentation de l'activité de 1 met au dessus de 1.2 met .

Confort thermique

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

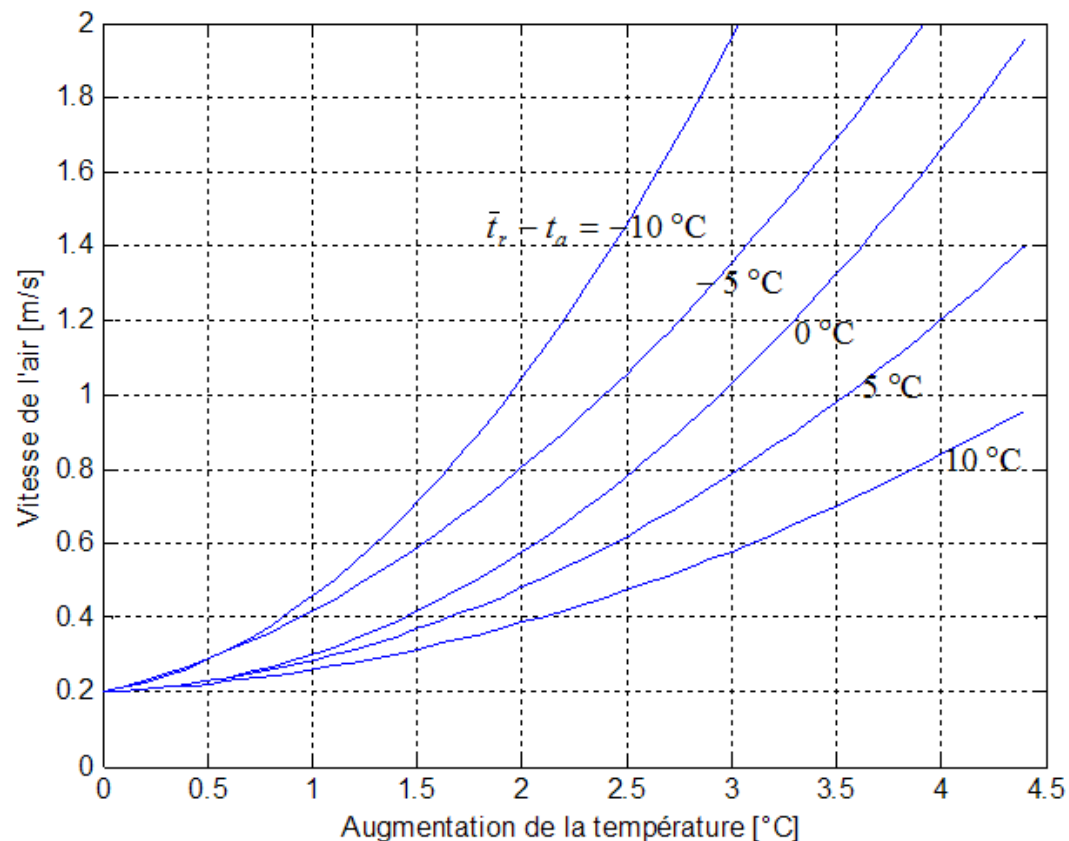
Climatisation

Confort thermique

Bilan enthalpique

Indices

- Zones de confort**



Vitesse de l'air nécessaire pour compenser l'augmentation de la température (Standard ASHRAE 55)

Confort thermique

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

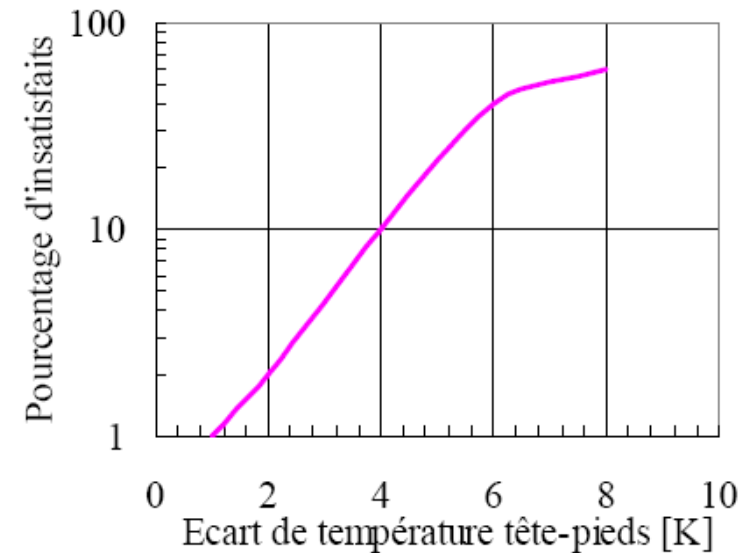
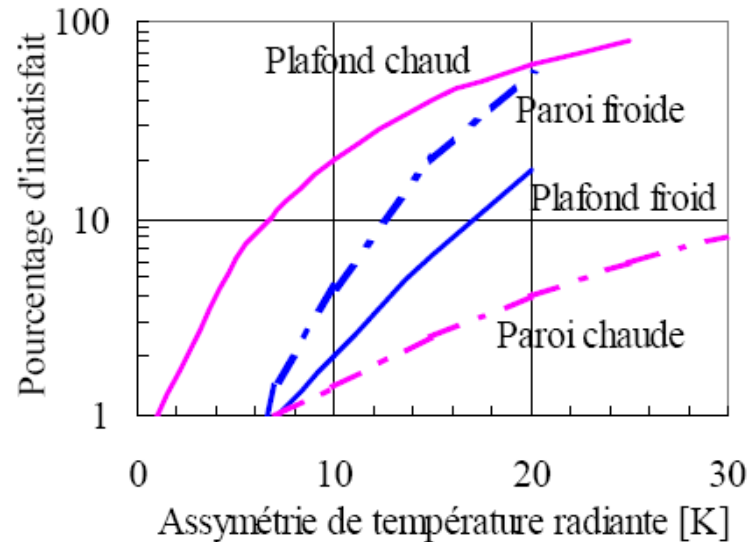
Confort thermique

Bilan enthalpique

Indices

- **Facteurs d'inconfort supplémentaires**

- *asymétrie de température radiante*
- *écart tête et les chevilles.*



Confort thermique

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

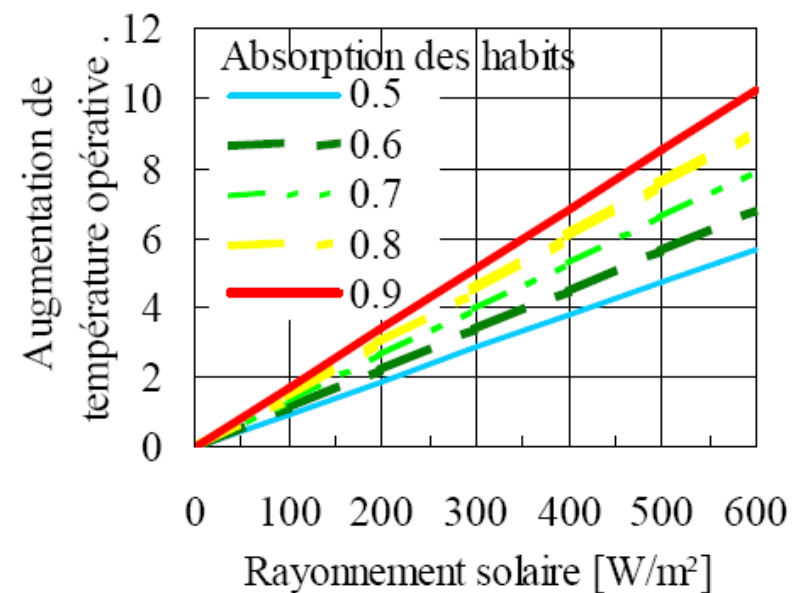
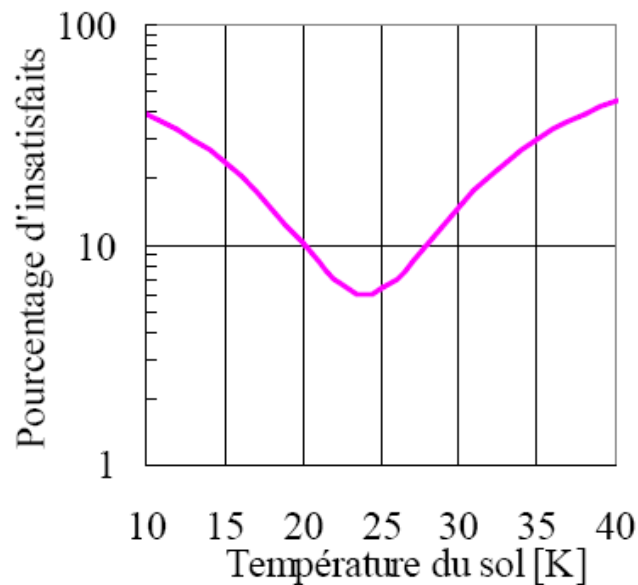
Confort thermique

Bilan enthalpique

Indices

• Facteurs d'inconfort supplémentaires

- *température du sol*
- *rayonnement solaire*



Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Confort thermique

Bilan enthalpique

Indices

- **Paramètres secondaires qui influencent le confort**
 - *Météo : pas de variation journalière et saisonnière*
 - *Age : métabolisme différent compensé par activité différente*
 - *Sexe : métabolisme compensé par le taux de transpiration*
 - **Mêmes conditions de confort pour tout le monde pour toute l'année en tout climat ?**

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Confort thermique

Bilan enthalpique

Indices

- **Confort adaptatif**

- *études menés dans des conditions réelles ont montré que la perception du confort thermique est influencée par :*
 - les conditions thermiques d'avant
 - les coutumes culturelles et techniques.
- *prémisse importante des modèles adaptatifs :*
 - la personne n'est plus un sujet passif ;
 - elle est un agent actif qui interagisse avec son environnement
- les gens ont une tendance normale de s'adapter à leur environnement
- principe d'adaptation : s'il y a un changement qui provoque l'inconfort, les gens réagiront pour rétablir leur confort

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Confort thermique

Bilan enthalpique

Indices

- **Confort adaptatif**

- *le principe d'adaptation relie la température de confort au contexte dans lequel les occupants se trouvent.*
- *la probabilité de se sentir inconfortable sera plus faible pour ceux qui ont plus d'opportunités de s'adapter, en s'adaptant eux même à l'environnement ou en adaptant l'environnement à eux même.*

Confort thermique

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

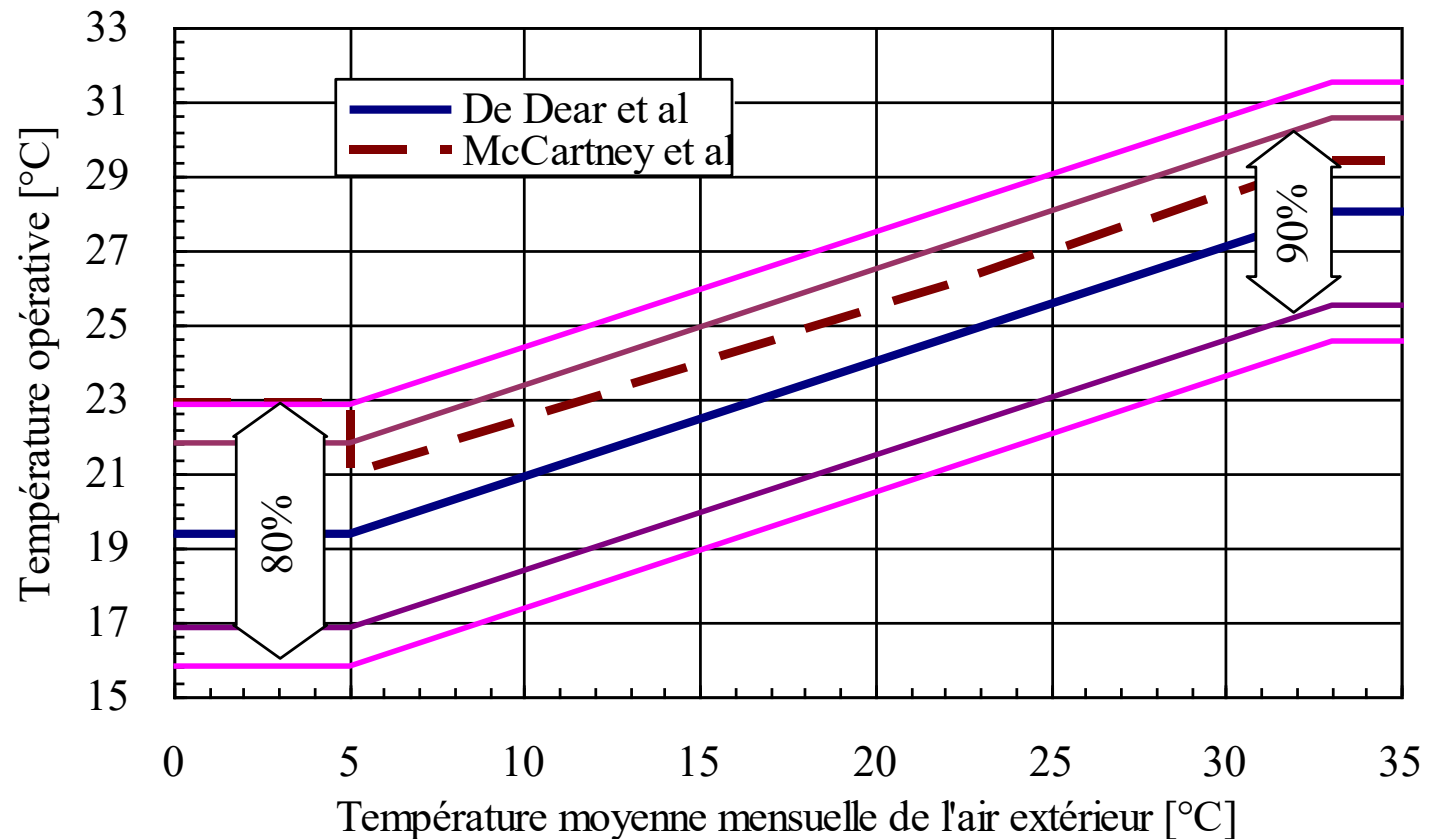
Climatisation

Confort thermique

Bilan enthalpique

Indices

• Confort adaptatif



Confort thermique

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

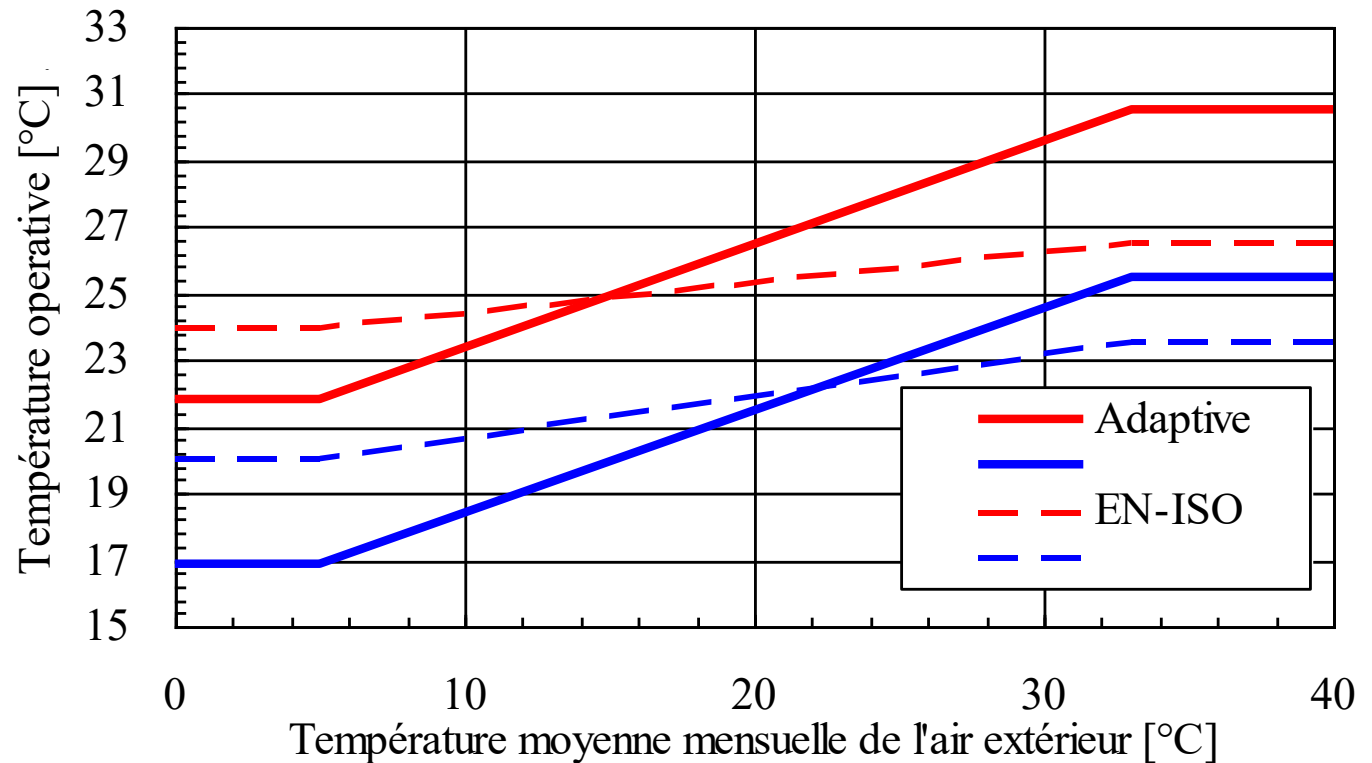
Climatisation

Confort thermique

Bilan enthalpique

Indices

- Confort adaptatif



Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Confort thermique

Bilan enthalpique

Indices

- **Potentiel d'adaptation**

- Les standards de confort imposent des conditions pour le climat intérieur qui sont difficilement atteignables sans l'utilisation des systèmes de climatisation
- La prescription d'une zone de confort est faite en associant les conditions idéales avec la neutralité
- La neutralité (ou le fait de ne pas avoir une sensation) peut être différente de confort.
- Si les occupants ont le choix, ils peuvent entreprendre des actions pour adapter leur confort au delà des limites indiquées par les standards de confort.

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Confort thermique

Bilan enthalpique

Indices

- **Facteurs environnementaux qui peuvent être changés**

- températures élevées compensées par la vitesse de l'air.
 - jusqu'à 3 °C de différence en utilisant de courant d'air de 0.82 m/s pour les personnes sédentaires
 - 2 °C à 4,4 °C de différence avec les conditions de confort en utilisant un courant d'air de 1,5 m/s, pour les personnes actives
 - des vitesses de l'air jusqu'au 1,5 m/s rends les conditions acceptable pour les personnes sédentaires pour des températures de 30 °C
- température radiante moyenne
 - incluse dans la température opérative (comme la vitesse de l'air, d'ailleurs)
 - source de confort (influence de la masse thermique)
- endroits avec des conditions différentes

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Confort thermique

Bilan enthalpique

Indices

- **Facteurs sociaux**

- Facturation individuelle
- Raison sociaux : séparation espace « privé » espace « accueille »
- Rituels sociaux :
 - vacances
 - habillement
 - boissons fraîches / chaudes
- Perception culturelle : « comment les conditions de confort devront être »

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Confort thermique

Bilan enthalpique

Indices

- **Confort personnalisé**

- Conditions de confort en fonction de
 - Bâtiment
 - Systèmes
 - Climat
 - Facteurs sociaux
- ➔ **bâtiments confortables sans répondre aux normes de confort !**
- **Spécification :**
 - **Potentiel d'adaptation du bâtiment**
 - **Système de contrôle-commande**

Confort thermique

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Confort thermique

Bilan enthalpique

Indices

- **Personnalités**



Ole Fanger



Fergus Nicol

Questions

Climatisation

Introduction

Propriétés air humide

Diagramme

Climatisation

Confort thermique

Bilan enthalpique

Indices

- Dans quelles conditions le point de mélange se trouve dans la zone de sursaturation. Est-ce que cet état est stable ? Quel phénomène a lieu ?
- Expliquer le phénomène de formation du givre dans le congélateur.
- La masse volumique de l'air humide est plus grande, égale ou plus petite que la masse volumique de l'air sec. Donner l'explication.
- Expliquer dans quelles conditions on peut avoir de la condensation sur les parois intérieures. Quelles est l'influence des ponts thermiques à ce phénomène ?
- Pourquoi le liquide d'une bouteille fermée ne s'évapore pas alors qu'il s'évapore d'une bouteille ouverte ?