

## MEC1210 THERMODYNAMIQUE

ENSEIGNANT: MARTIN GARIÉPY  
BUREAU: JAB-5067  
TELEPHONE: (514)340-4711 ext. 7450  
COURRIEL: martin.gariepy@polymtl.ca

SEPTEMBRE 2011

D'après les notes de cours de Pr. Huu Duc Vo



## Chapitres 13-14: Mélanges non réactifs

### OBJECTIFS

- Définir les paramètres qui décrivent la composition d'un mélange gazeux;
- Définir les règles et estimer les variables thermodynamiques des mélanges gazeux;
- Distinguer l'air sec de l'air atmosphérique;
- Définir et calculer l'humidité absolue et relative de l'air atmosphérique;
- Calculer le point de rosée de l'air atmosphérique



## Composition d'un mélange

- Analyse molaire et gravimétrique
  - Requisite pour connaître les propriétés thermodynamiques d'un mélange
- Analyse Molaire: composition du mélange en termes de Moles
- Analyse gravimétrique: composition en termes de masse

- fraction de masse:

$$m_m = \sum_{i=1}^k m_i \Rightarrow mf_i \equiv \frac{m_i}{m_m}$$

$$\sum_{i=1}^k mf_i = 1$$

- fraction molaire:  $y_i$

$$N_m = \sum_{i=1}^k N_i \Rightarrow y_i \equiv \frac{N_i}{N_m}$$

$$\sum_{i=1}^k y_i = 1$$



## Composition d'un mélange

□ Masse molaire:  $M = \frac{m}{N}$  [kg/mol]

□ Masse molaire moyenne:

■ 
$$M_m = \frac{m_m}{N_m} = \frac{\sum_{i=1}^k m_i}{N_m} = \frac{\sum_{i=1}^k N_i M_i}{N_m} = \sum_{i=1}^k y_i M_i$$

■ 
$$M_m = \frac{m_m}{N_m} = \frac{m_m}{\sum_{i=1}^k m_i / M_i} = \frac{1}{\sum_{i=1}^k m_i / (m_m M_i)} = \frac{1}{\sum_{i=1}^k \frac{mf_i}{M_i}}$$

□ Relation entre fraction massique et masse molaire:

■ 
$$mf_i = \frac{m_i}{m_m} = \frac{N_i M_i}{N_m M_m} = y_i \frac{M_i}{M_m}$$

□ Constante du mélange:  $R_m = \frac{R_u}{M_m}$



## Exemple p.593

Soit un mélange gazeux composé de 3 kg de  $O_2$ , de 5 kg de  $N_2$ , et de 12 kg de  $CH_4$ . Déterminez:

- La fraction massique de chaque constituant;
- La fraction molaire de chaque constituant;
- La masse molaire moyenne et la constante du gaz



## Mélange de gaz parfaits

□ Loi de Dalton:  $P_m = \sum_{i=1}^k P_i(T_m, V_m)$

□ Loi d'Amagat:  $V_m = \sum_{i=1}^k V_i(P_m, T_m)$

□ Pour un mélange de gaz parfaits, la relation suivante s'applique:

$$\frac{P_i}{P_m} = \frac{V_i}{V_m} = \frac{N_i}{N_m} = y_i$$



## Variables thermodynamique de mélanges de gaz parfaits

- Énergie interne, enthalpie et entropie d'un mélange:

- $$U_m = \sum_{i=1}^k U_i = \sum_{i=1}^k m_i u_i = \sum_{i=1}^k N_i \bar{u}_i \quad [\text{kJ}]$$

- $$H_m = \sum_{i=1}^k H_i = \sum_{i=1}^k m_i h_i = \sum_{i=1}^k N_i \bar{h}_i \quad [\text{kJ}]$$

- $$S_m = \sum_{i=1}^k S_i = \sum_{i=1}^k m_i s_i = \sum_{i=1}^k N_i \bar{s}_i \quad [\text{kJ K}]$$

- Variation d'énergie interne, enthalpie et entropie d'un mélange:

- $$\Delta U_m = \sum_{i=1}^k \Delta U_i = \sum_{i=1}^k m_i \Delta u_i = \sum_{i=1}^k N_i \Delta \bar{u}_i$$

- $$\Delta H_m = \sum_{i=1}^k \Delta H_i = \sum_{i=1}^k m_i \Delta h_i = \sum_{i=1}^k N_i \Delta \bar{h}_i$$

- $$\Delta S_m = \sum_{i=1}^k \Delta S_i = \sum_{i=1}^k m_i \Delta s_i = \sum_{i=1}^k N_i \Delta \bar{s}_i$$



## Variables thermodynamique de mélanges de gaz parfaits

□ Énergie interne, enthalpie et entropie d'un mélange par unité de masse:

$$\blacksquare \quad u_m = \frac{U_m}{m_m} = \sum_{i=1}^k \frac{m_i}{m_m} u_i = \sum_{i=1}^k mf_i u_i \quad \text{kJ/kg} \quad \text{et} \quad \bar{u}_m = \frac{U_m}{N_m} = \sum_{i=1}^k \frac{N_i}{N_m} \bar{u}_i = \sum_{i=1}^k y_i \bar{u}_i \quad \text{kJ/kmol}$$

$$\blacksquare \quad h_m = \frac{H_m}{m_m} = \sum_{i=1}^k \frac{m_i}{m_m} h_i = \sum_{i=1}^k mf_i h_i \quad \text{kJ/kg} \quad \text{et} \quad \bar{h}_m = \frac{H_m}{N_m} = \sum_{i=1}^k \frac{N_i}{N_m} \bar{h}_i = \sum_{i=1}^k y_i \bar{h}_i \quad \text{kJ/kmol}$$

$$\blacksquare \quad s_m = \frac{S_m}{m_m} = \sum_{i=1}^k \frac{m_i}{m_m} s_i = \sum_{i=1}^k mf_i s_i \quad \text{kJ/kg.K} \quad \text{et} \quad \bar{s}_m = \frac{S_m}{N_m} = \sum_{i=1}^k \frac{N_i}{N_m} \bar{s}_i = \sum_{i=1}^k y_i \bar{s}_i \quad \text{kJ/kmol.K}$$

□ Chaleur massique du mélange:

$$\blacksquare \quad c_{v,m} = \sum_{i=1}^k mf_i c_{v,i} \quad \text{kJ/kg.K} \quad \text{et} \quad \bar{c}_{v,m} = \sum_{i=1}^k y_i \bar{c}_{v,i} \quad \text{kJ/kmol.K}$$

$$\blacksquare \quad c_{p,m} = \sum_{i=1}^k mf_i c_{p,i} \quad \text{kJ/kg.K} \quad \text{et} \quad \bar{c}_{p,m} = \sum_{i=1}^k y_i \bar{c}_{p,i} \quad \text{kJ/kmol.K}$$





## Variables thermodynamique de mélanges de gaz parfaits

- Variation d'entropie d'un constituant:

- $$\Delta s_i = s_{i,2}^o - s_{i,1}^o - R_i \ln \frac{P_{i,2}}{P_{i,1}} \cong c_{p,i} \ln \frac{T_{i,2}}{T_{i,1}} - R_i \ln \frac{P_{i,2}}{P_{i,1}}$$

ou

- $$\Delta \bar{s}_i = \bar{s}_{i,2}^o - \bar{s}_{i,1}^o - R_u \ln \frac{P_{i,2}}{P_{i,1}} \cong \bar{c}_{p,i} \ln \frac{T_{i,2}}{T_{i,1}} - R_u \ln \frac{P_{i,2}}{P_{i,1}}$$

- La pression partielle est utilisée:

$$P_{i,2} = y_{i,2} P_{m,2} \quad \text{et} \quad P_{i,1} = y_{i,1} P_{m,1}$$

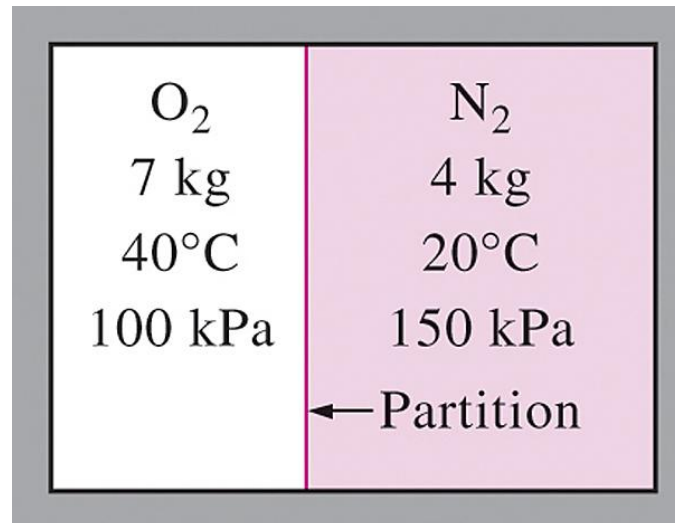


## Exemple p.600

Soit un réservoir indéformable et isolé, qui est divisé en deux parties par une paroi. Le volume de gauche renferme 7kg d'oxygène à 100kPa et à 40°C. Le volume de droite contient 4kg d'azote à 150kPa et à 20°C. La paroi est soudainement retirée, et les deux gaz se mélangent.

Déterminez:

- La température du mélange;
- La pression du mélange une fois l'équilibre thermodynamique atteint



## Exemple p.601

Soit un réservoir indéformable et isolé, qui est divisé en deux parties par une paroi. Le volume de gauche renferme 3 kmol d'O<sub>2</sub>, alors que le volume de droite contient 5 kmol de CO<sub>2</sub>. Les deux gaz se trouvent au départ à 200 kPa et à 25 °C. La paroi est alors retirée et les deux gaz se mélangent. Déterminez la variation d'entropie. Supposez que la température extérieure est de 25°C et que les gaz se comportent comme des gaz parfait.



## Psychrométrie

- ❑ Psychrométrie: Étude des mélanges d'air sec et de vapeur d'eau (considérés comme deux gaz parfaits)
- ❑ Objectif: Contrôle de l'humidité dans des applications en climatisation, dépollution, séchage, et autres.
- ❑ Air atmosphérique: Air contenant de la vapeur d'eau (humidité)
- ❑ Air sec: Air ne contenant aucune humidité



## L'humidité relative et absolue

□ Humidité absolue:  $\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{P_v / R_v}{P_a / R_a} = 0.622 \frac{P_v}{P_a}$  kg de vapeur d'eau/kg d'air sec

□ Humidité relative:  $\phi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{P_v V / R_v T}{P_{sat@T} V / R_a T} = \frac{P_v}{P_{sat@T}}$

□ Relation entre l'humidité relative et absolue:

$$\phi = \frac{\omega P}{(0.622 + \omega) P_{sat@T}} \quad \text{et} \quad \omega = \frac{0.622 \phi P_{sat@T}}{P - \phi P_{sat@T}}$$

□ L'enthalpie, l'énergie interne et l'entropie de l'air atmosphérique sont:

$$\frac{H}{m_a} = h = c_p T + \omega h_g \quad \frac{U}{m_a} = u = c_v T + \omega u_g \quad \frac{S}{m_a} = s = s_a + \omega s_g$$

[kJ/kg air sec]



## Exemple p.622

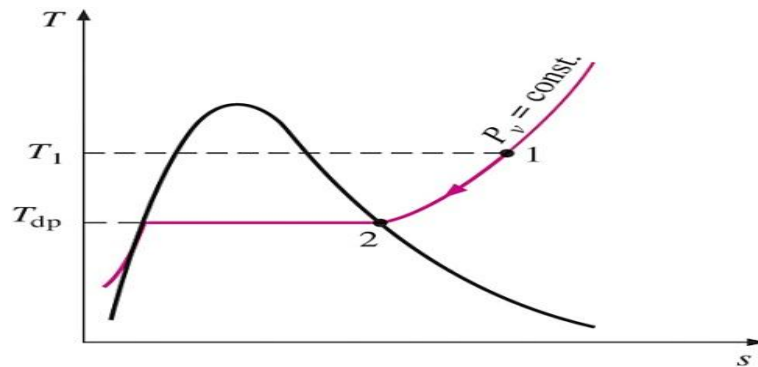
Soit une pièce dont les dimensions sont de  $5 \times 5 \times 3 \text{ m}^3$ . La pièce est remplie d'air à  $100 \text{ kPa}$  et à  $25^\circ\text{C}$ , et son humidité relative est de  $75\%$ . Déterminez:

- a) La pression partielle de l'air sec;
- b) L'humidité absolue;
- c) L'enthalpie de l'air atmosphérique par unité de masse d'air sec;
- d) La masse d'air sec;
- e) La masse de vapeur d'eau.



## Point de Rosée

- Température à laquelle la condensation commence à se manifester ( $T_{\text{rosée}} = T_{\text{sat}, P_v}$ )



## Exemple p.622

Lorsqu'il fait frais à l'extérieur, la condensation peut se produire sur la surface intérieure des vitres dans la maisons. Supposons que la température de l'air dans la maison est de  $20^\circ\text{C}$  et que l'humidité relative est de 75% à quelle température de la surface intérieure de la vitre la condensation commencera-t-elle à se manifester ?



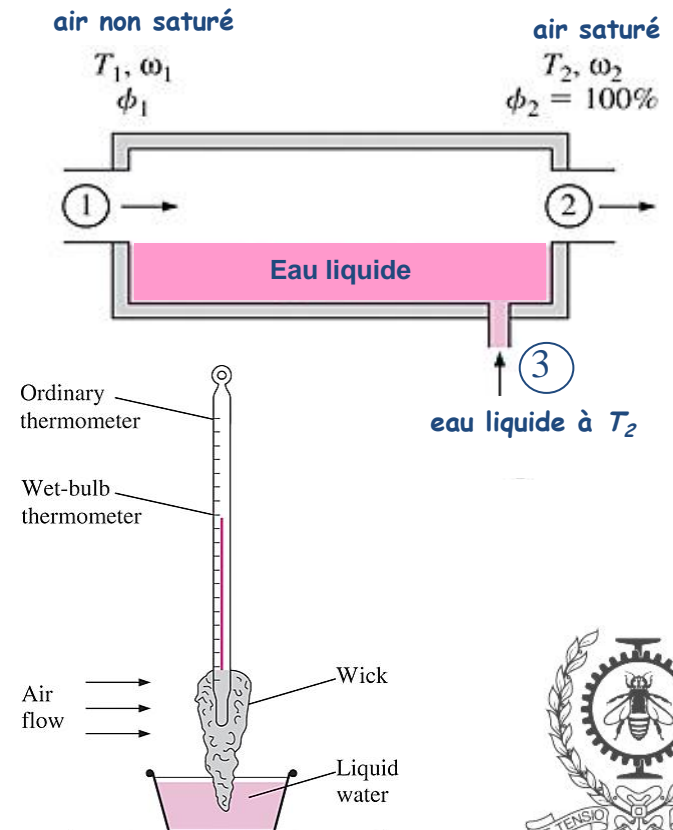
## Température de saturation adiabatique

□ Comment mesurer l'humidité relative et absolue ?

$$\blacksquare \omega_1 = \frac{c_p(T_2 - T_1) + \omega_2 h_{fg2}}{h_{g1} - h_{f2}}$$

$$\blacksquare \omega_2 = \frac{0.622 P_{g2}}{P_2 - P_{g2}} \quad (\phi_2 = 1)$$

□ Thermomètre humide  
(même principe de fonctionnement):





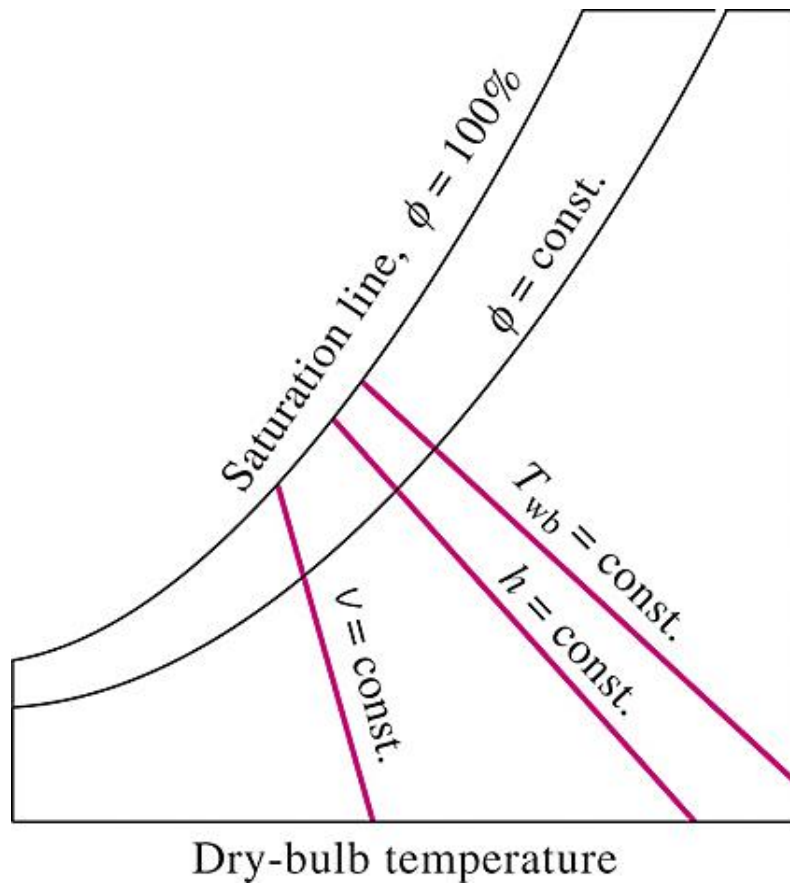
## Exemple p. 626

Les températures du thermomètre sec et humide de l'air atmosphérique à 101.325 kPa mesurées à l'aide d'un psychomètre à rotation sont respectivement de 25°C et 15°C. Déterminez:

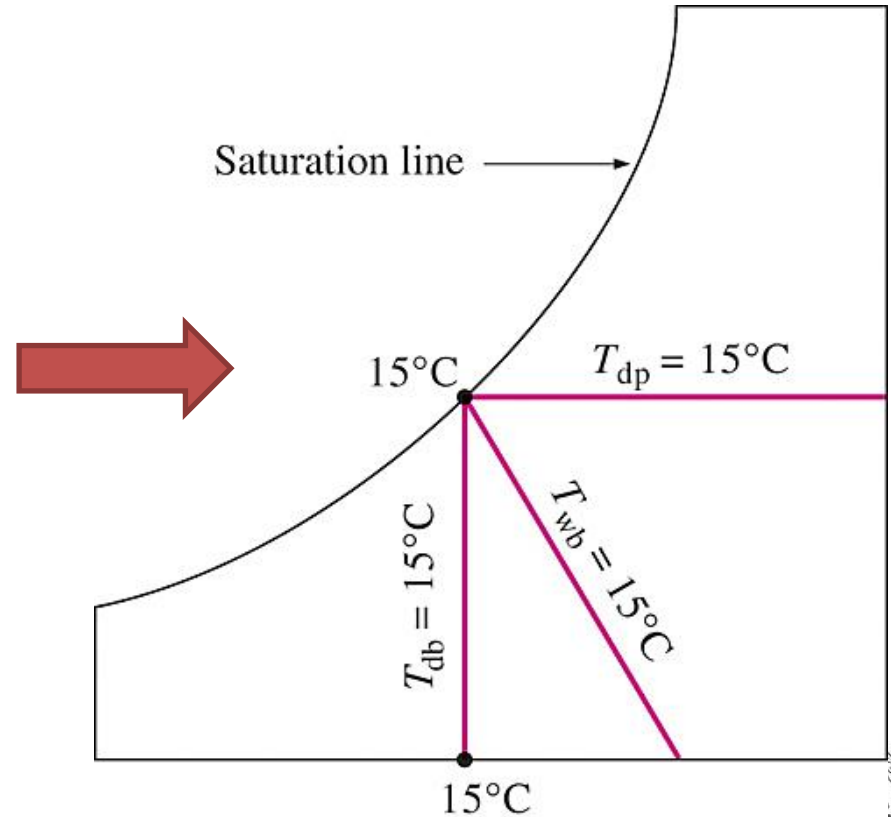
- a) L'humidité absolue;
- b) L'humidité relative;
- c) L'enthalpie de l'air.



## Diagramme psychrométrique

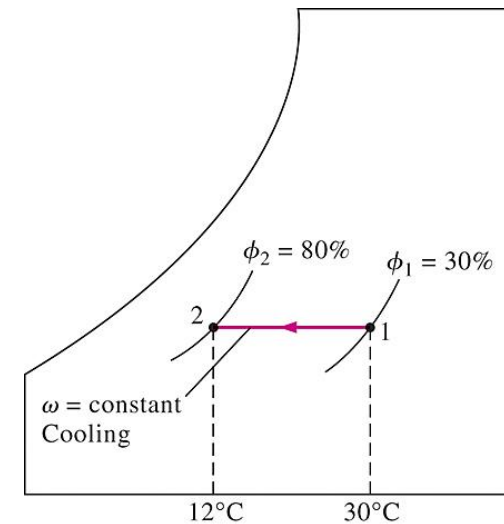
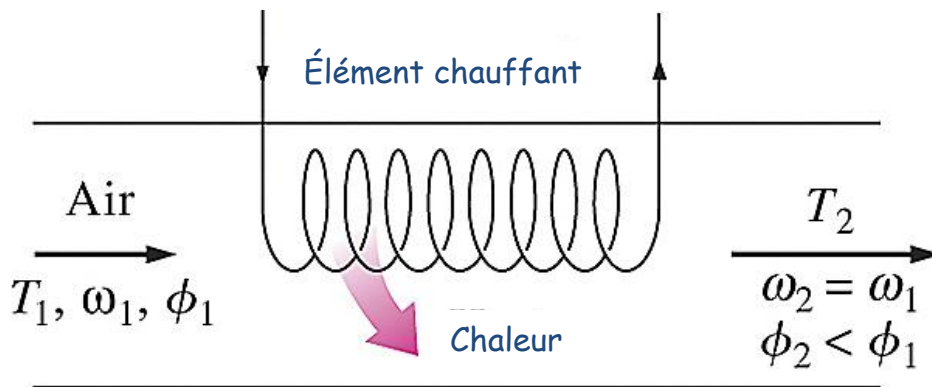


Specific humidity,  $\omega$

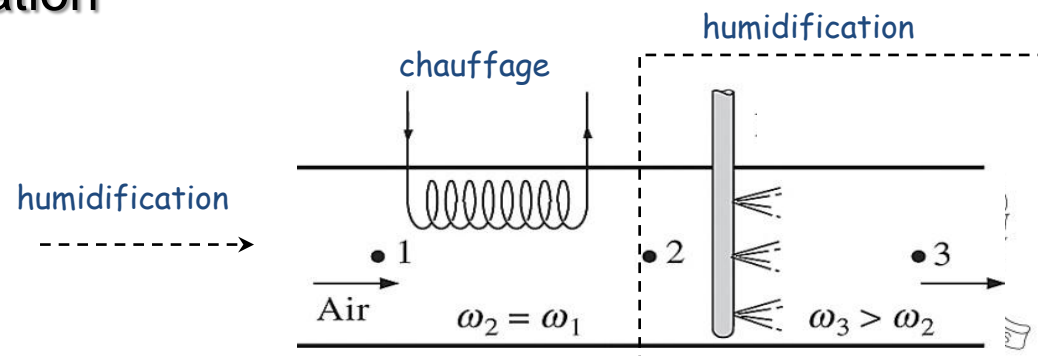


## Applications

- Chauffage et refroidissement à humidité constante ( $\omega = \text{constante}$ )

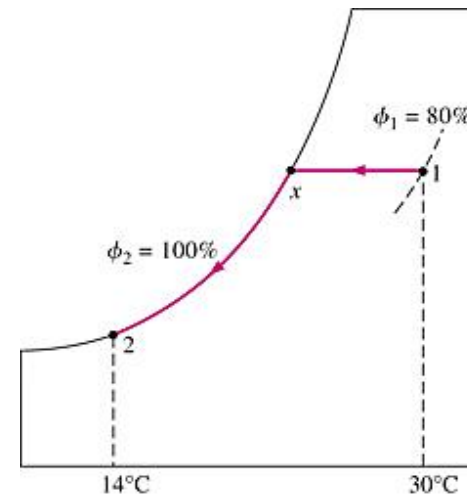
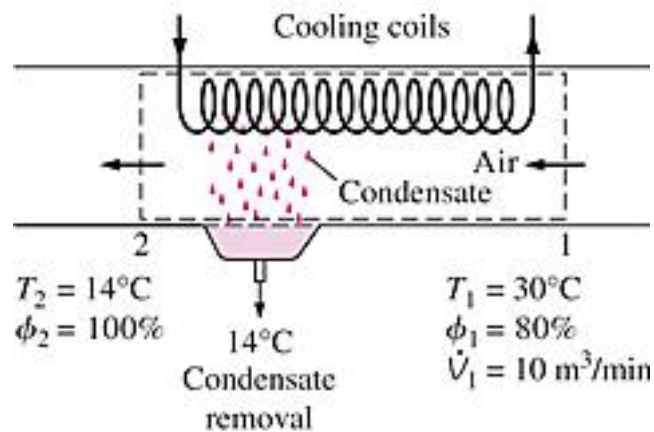


- Chauffage avec humidification



## Applications

- Refroidissement avec déshumidification



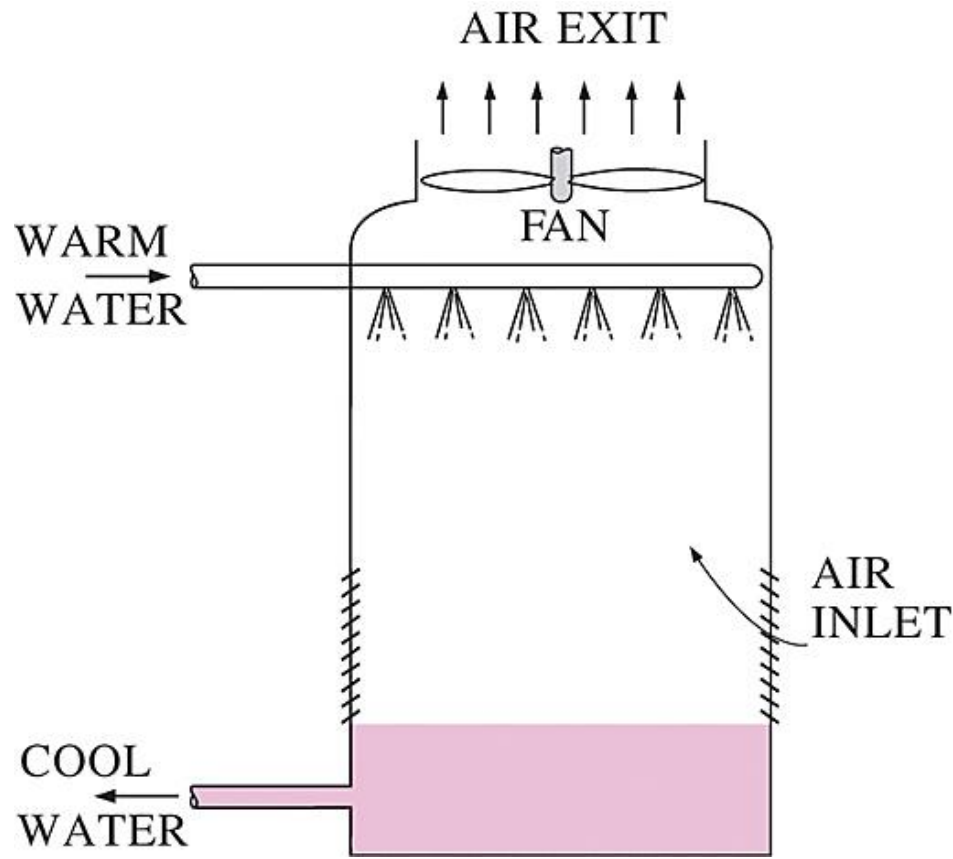
## Exemple p. 636

Un écoulement d'air pénètre dans un climatiseur encastré dans une fenêtre à pression atmosphérique et à  $30^{\circ}\text{C}$ , avec une humidité relative de 80% et un débit volumique de  $10\text{m}^3/\text{min}$ . Il en ressort saturé à  $14^{\circ}\text{C}$ , ce qui est aussi la température de la vapeur condensée. Déterminez la puissance thermique extraite de l'air.



## Applications

- Tours de refroidissement humide



## LECTURE SECTION DU LIVRE

Sections 13.1 à 13.3, 14.1, 14.5 du livre, «THERMODYNAMIQUE, une approche pragmatique», Y.A. Çengel, M.A. Boles et M. Lacroix, Chenelière-McGraw-Hill, 2008.

