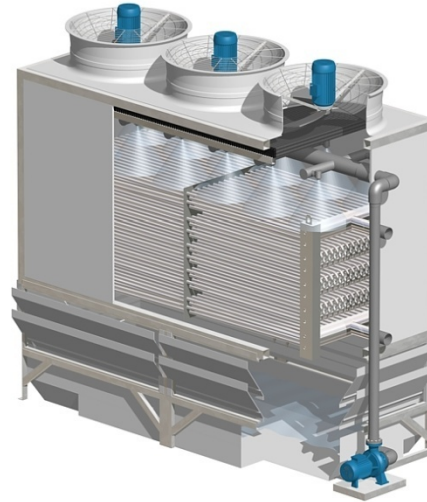


MEC1210_Thermodynamique (Heures 34-39)

Mélanges non réactifs



Smail Guenoun

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

Objectifs

- ✓ Définir les paramètres qui décrivent la composition d'un mélange gazeux
- ✓ Predire le comportement P-v-T de mélanges gazeux à l'aide de la loi de Dalton à propos des pressions et de la loi d'Amagat à propos des volumes
- ✓ Distinguer l'air sec de l'air atmosphérique
- ✓ Définir et calculer l'humidité absolue et relative de l'air atmosphérique
- ✓ Établir la relation entre la température de saturation adiabatique et la température du thermomètre humide.
- ✓ Utiliser le diagramme psychrométrique pour déterminer les variables thermodynamiques de l'air atmosphérique

Composition d'un mélange gazeux

Fraction de masse et molaire

➤ **Analyse molaire et gravimétrique:**

- **Analyse molaire** : La composition du mélange en termes du nombre de moles.
- **Analyse gravimétrique** : La composition en termes de la masse de chaque constituant.

Pour un mélange de gaz (m) composé de k composants (i), on peut décrire la composition de deux façons:

Fraction de masse: La masse du mélange est la somme des masses des composantes:

$$m_m = \sum_{i=1}^k m_i \rightarrow mf_i \equiv \frac{m_i}{m_m} \equiv \text{fraction de masse}$$

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

Fraction molaire: Le nombre de moles (N) du mélange est la somme de ceux des composantes:

$$N_m = \sum_{i=1}^k N_i \rightarrow y_i \equiv \frac{N_i}{N_m} \equiv \text{fraction molaire}$$

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

Composition d'un mélange gazeux

Fraction de masse et molaire

- Pour trouver la masse molaire du mélange :

$$m_m = \sum_{i=1}^k m_i \rightarrow m = NM \quad , \text{ où } M \text{ (kg/kmol) est la masse molaire}$$

$$N_m M_m = \sum_{i=1}^k N_i M_i$$

$$M_m = \sum_{i=1}^k \frac{N_i}{N_m} M_i$$

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

Exemple 1 (Exo. 13.13)

Déterminez les fractions volumiques (molaires) d'un mélange gazeux dont la fraction massique d'oxygène est de 20% , celle de l'azote est de 30% et celle du gaz carbonique, de 50%.

Déterminez également la constante du gaz.

Données: Les masses molaires (table A1) : Oxygène (O_2) = 32 kg/kmol ;
Azote (N_2) = 28 kg/kmol
Gaz carbonique (CO_2) = 44 kg/kmol

Solution (en classe)

Le comportement P-v-T des mélanges de gaz parfaits

Lois de Dalton et Amagat

Pour un gaz parfait:

- Les molécules sont très éloignées l'un de l'autre de sorte qu'elles ne sont pas affectées l'un par l'autre
- Comportement approximé par gaz réels à basse pression et haute température (donc basse densité) par rapport au point critique.
- Mélange de gaz parfaits se comporte donc comme un gaz parfait

❖ **Relation P-v-T** : il existe deux lois:

- 1) **Modèle de Dalton**: La pression du mélange gazeux dans un volume donné est égale à la somme des pressions que chaque constituant exercerait s'il occupait à lui seul le volume, sa température étant égale à celle du mélange.

$$P_m = \sum_{i=1}^k P_i(T_m, V_m)$$

$$\frac{P_i(T_m, V_m)}{P_m} = \frac{N_i R_u T_m / V_m}{N_m R_u T_m / V_m} = \frac{N_i}{N_m} = y_i \Rightarrow P_i = y_i P_m, \text{ où } P_i \text{ est la pression partielle}$$

$$\sum_{i=1}^k P_i = \sum_{i=1}^k y_i P_m = P_m \left(\sum_{i=1}^k y_i \right) = P_m (1) = P_m$$

=1

Le comportement P-v-T des mélanges de gaz parfaits

Lois de Dalton et Amagat

- 2) **Modèle d'Amagat:** *Le volume du mélange* est égal à la somme des *volumes partielles* occupés par les gaz composants si chacun d'eux était à la pression et la température du mélange.

$$V_m = \sum_{i=1}^k V_i(P_m, T_m) \quad , \text{ où } V_i \text{ est le volume partiel}$$

$$\frac{V_i(P_m, T_m)}{V_m} = \frac{N_i R_u T_m / P_m}{N_m R_u T_m / P_m} = \frac{N_i}{N_m} = y_i \Rightarrow V_i = y_i V_m$$

$$\sum_{i=1}^k V_i = \sum_{i=1}^k y_i V_m = V_m \left(\sum_{i=1}^k y_i \right) = V_m (1) = V_m$$

=1

Notes : Les modèles de Dalton et d'Amagat sont exacts et équivalent pour les gaz parfaits. Cependant, ils peuvent aussi être utilisés pour approximer les mélanges de gaz réels.

Les variables thermodynamiques de mélanges de gaz parfaits

Énergie interne, enthalpie et l'entropie du mélange

ii) Propriétés U, H et S

U , H et S sont des propriétés extensives (comme la masse), donc les valeurs pour le mélange sont les sommes de leurs valeurs pour les composantes:

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

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

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

, où: $\bar{u}_i, \bar{h}_i, \bar{s}_i$ sont en terme de $kmol$ au lieu de kg

De meme pour les variables:

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

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

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

Les variables thermodynamiques de mélanges de gaz parfaits

Énergie interne, enthalpie et l'entropie du mélange

L'énergie interne (U), l'enthalpie (H) et l'entropie (S) d'un mélange gazeux par unité de masse ou par mole:

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

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

$$s_m = \frac{S_m}{m_m} = \sum_{i=1}^k \frac{m_i}{m_m} s_i = \sum_{i=1}^k m f_i s_i \quad (\text{kJ / kg}) \quad \text{et} \quad \bar{s}_m = \frac{S_m}{N_m} = \sum_{i=1}^k \frac{N_i}{N_m} \bar{s}_i = \sum_{i=1}^k y_i \bar{s}_i \quad (\text{kJ / kmol})$$

De même, les chaleurs massiques sont estimées selon:

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

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

Note: $\bar{u} = M u$, $\bar{h} = M h$, $\bar{s} = M s$, $\bar{c}_v = M c_v$, $\bar{c}_p = M c_p$

Les variables thermodynamiques de mélanges de gaz parfaits

Énergie interne, enthalpie et l'entropie du mélange

Note: Attention au changement d'entropie qui dépend du changement de température et aussi de pression, où il faut utiliser la pression partielle. Pour chaque composante (i):

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

ou

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

Avec:

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

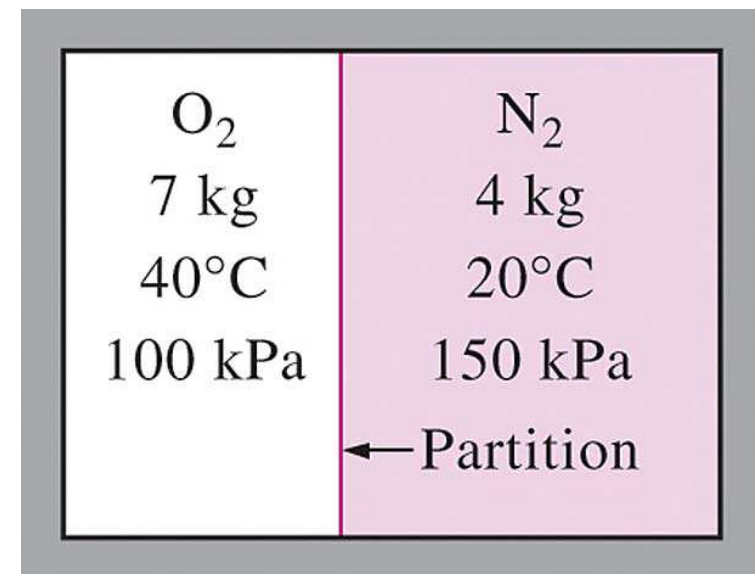
Remarque: La pression partielle P_i de chaque constituant est utilisée pour estimer la variation d'entropie et non la pression de mélange P_m .

Exemple 2 (Exemple. 13.3)

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

- 1) La température du mélange
- 2) La pression du mélange une fois l'équilibre thermodynamique atteint de **2 façons différentes**.

Solution (en classe)



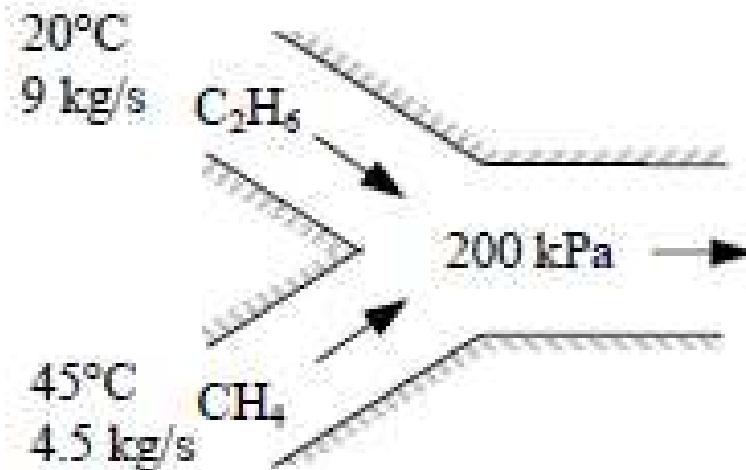
Exemple 3 (Exo. 13.55_version anglaise)

Un écoulement d'éthane (C_2H_6) à 20°C et 200 kPa et un écoulement de méthane (CH_4) à 45°C et 200 kPa pénètrent dans une chambre de mélange adiabatique. Le débit massique de l'éthane est de 9 kg/s et celui de méthane, de 4,5 kg/s.

Déterminer :

- 1) La température du mélange
- 2) Le taux auquel l'entropie est produite durant l'évolution en kW/K

Solution (en classe)

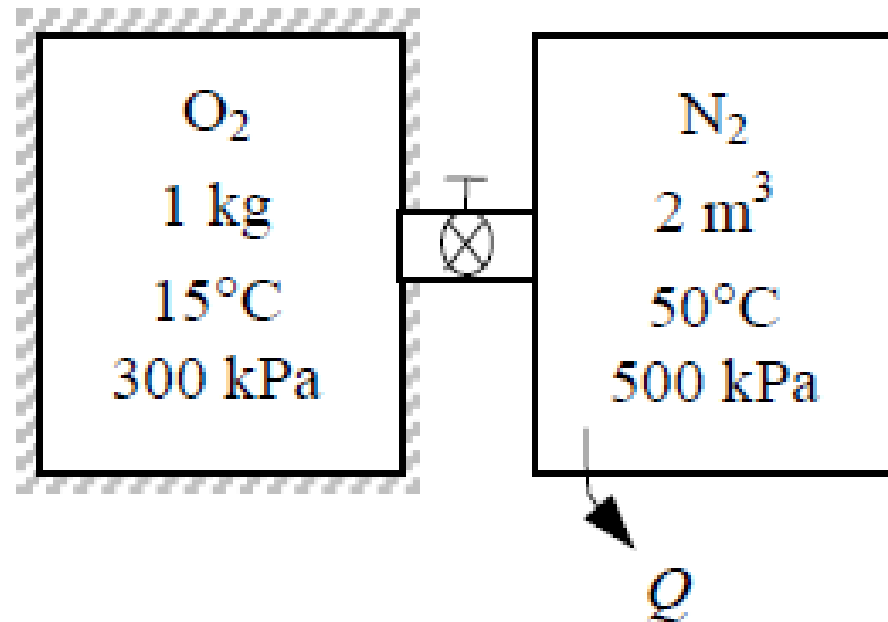


Exemple 4 (Exo. 13.61_version anglaise)

Un réservoir rigide et isolé contient 1 kg d'oxygène à 15°C et à 300 kPa est relié par une soupape à un autre réservoir rigide non-isolé qui contient 2m³ d'azote à 50°C et à 500 kPa. La soupape est ouverte, et les deux gaz se mélangent. Si la température d'équilibre est de 25°C, déterminez:

- 1) La pression du mélange
- 2) La quantité de chaleur Q
- 3) La génération d'entropie en kJ/K

Solution (en classe)



Psychrométrie

Définitions

- ❑ La psychrométrie étudie des mélanges d'air sec et de vapeur d'eau pour le contrôle de l'humidité dans des applications en climatisation, dépollution, séchage et autres.
- ❑ On suppose que la présence de l'air n'affecte pas l'équilibre vapeur-eau.

1) L'air atmosphérique ou humide:

- On parle d' '**air atmosphérique**' , car l'air dans l'atmosphère contient de la vapeur d'eau (humidité).
- '**L'air sec**' : L'air qui ne contient aucune trace d'humidité.

$$\text{air humide: } P = \frac{mRT}{V} = \frac{NRT}{V} = P_a + P_v \quad (\text{mélange})$$

$$\text{air sec: } P_a = \frac{m_a R_{air} T}{V} = \frac{N_a R_u T}{V} \quad (\text{comp. 1})$$

$$\text{vapeur d'eau: } P_v = \frac{m_v R_{vap,eau} T}{V} = \frac{N_v R_u T}{V} \quad (\text{comp. 2})$$

Psychrométrie

Définitions

Humidité absolue et humidité relative:

❖ La quantité de vapeur d'eau dans l'air peut être exprimée par:

- **Humidité absolue (ω):**

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{P_v V / R_v T}{P_a V / R_a T} = \frac{P_v / R_v}{P_a / R_a} = 0.622 \frac{P_v}{P_a} = 0.622 \frac{P_v}{P - P_v}; \text{ kg de vapeur d'eau / kg d'air sec}$$

Pression totale $P = P_a + P_v$

- **Humidité relative (ϕ):**

$$\phi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{P_v V / R_v T}{P_{sat @ T} V / R_a T} = \frac{P_v}{P_{sat @ T}} \quad (\text{valeur entre 0 et 1})$$

Maximum masse de vapeur d'eau saturée que le volume donné (V) peut contenir à cette température (T)

□ On peut relier ω et ϕ en jouant avec ces deux relations pour donner:

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

Psychrométrie

Définitions

Notes: - les propriétés U, H et S peuvent être exprimé en terme de ω .

$$\text{L'enthalpie totale: } H = m_a h_a + m_v h_v = m_a \left(h_a + \frac{m_v}{m_a} h_v \right) = m_a (h_a + \omega h_v)$$

De la meme manière pour l'énergie inerne (U) et l'entropie (S):

$$\frac{H}{m_a} = h_a + \omega h_v \quad \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{ d'air sec} \right)$$

$$\frac{U}{m_a} = u_a + \omega u_v \quad \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{ d'air sec} \right)$$

$$\frac{S}{m_a} = s_a + \omega s_v \quad \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{ d'air sec} \right)$$

- Pour la vapeur d'eau à basse pression tel que dans les applications psychrométriques, on peut faire l'approximation:

$$h_v(T, P_{\text{basse}}) \approx h_g(T)$$

Psychrométrie

Définitions

Point de rosée:

Le point de rosée $T_{rosée}$ est défini comme la température à laquelle la condensation commence à se manifester lorsque l'air est refroidi à pression constante.

$$T_{rosée} = T_{sat, P_v}$$

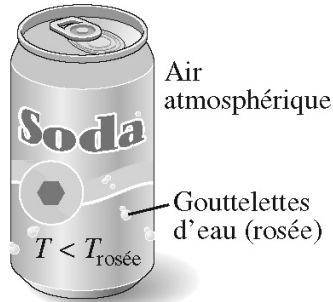
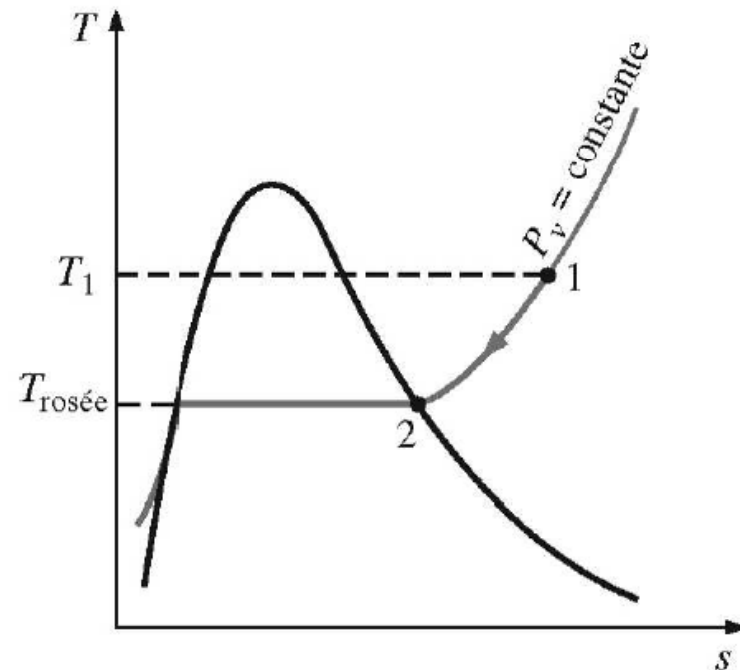


FIGURE 14.9

Lorsque la température d'un contenant de boisson est inférieure au point de rosée, la vapeur d'eau dans l'air se condense sur ses parois.



Psychrométrie

Analyse de systèmes psychrométriques

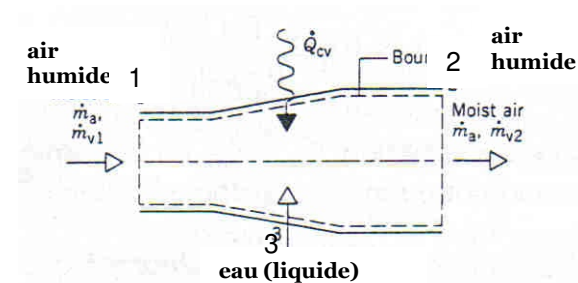
➤ L'analyse des systèmes psychrométriques se fait comme celui de mélange de gaz parfait, mais généralement en terme d'unité de masse ou de débit d'air sec (avec ω ou ϕ) aux entrées et sorties.

Exemple:

Conservation de masse:

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_3 = \dot{m}_2 \rightarrow \text{air : } \dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_a$$

$$\text{eau : } \dot{m}_{v1} + \dot{m}_{eau,3} = \dot{m}_{v2} \rightarrow \dot{m}_{eau,3} = \dot{m}_a (\omega_2 - \omega_1)$$



Bilan d'énergie:

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_3 h_3 + \dot{Q}_{cv} = \dot{m}_2 h_2$$

$$\dot{m}_a (h_{a1} + \omega_1 h_{v1}) + \dot{m}_a (\omega_2 - \omega_1) h_{eau,3} + \dot{Q}_{cv} = \dot{m}_a (h_{a2} + \omega h_{v2})$$

$$\dot{Q}_{cv} = \dot{m}_a [h_{a2} - h_{a1} + \omega_2 h_{v2} - \omega_1 h_{v1} + (\omega_1 - \omega_2) h_{eau,3}]$$

Psychrométrie

Saturation adiabatique et abaque psychrométrique

Comment obtenir ω ou ϕ à partir de quantités mesurables?

□ Saturation adiabatique

Soit un écoulement en régime permanent d'air humide T_1 connue et ω_1 connue (etat 1) penetrant dans un reservoir d'eau:

➤ Faisant la même analyse que pour l'exemple de la page précédente avec :

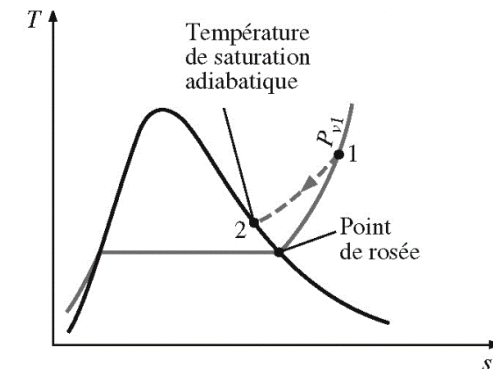
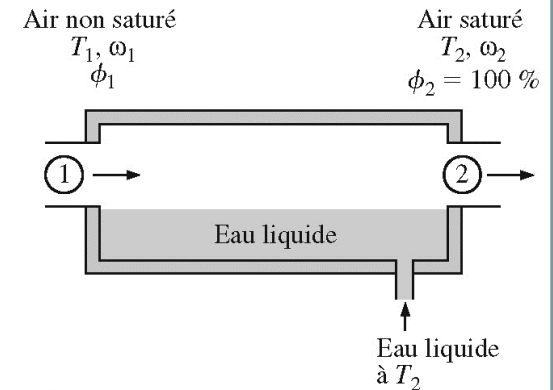
$$\dot{m}_a (h_{a1} + \omega_1 h_{g1}) + \dot{m}_a (\omega_2 - \omega_1) h_{eau,3} = \dot{m}_a (h_{a2} + \omega h_{g2}) \rightarrow h_{eau,3} \approx h_{f2}$$

$$h_{a2} - h_{a1} + \omega_2 h_{g2} - \omega_1 h_{g1} + (\omega_1 - \omega_2) h_{f2} = 0$$

$$\omega_1 = \frac{h_{a2} - h_{a1} + \omega_2 (h_{g2} - h_{f2})}{h_{g1} - h_{f2}} \rightarrow h_{a2} - h_{a1} = c_p (T_2 - T_1) ; h_{g2} - h_{f2} \equiv h_{fg2}$$

$$\omega_1 = \frac{c_p (T_2 - T_1) + \omega_2 h_{fg2}}{h_{g1} - h_{f2}} \quad \text{et} \quad \omega_2 = \frac{0.622 P_{g2}}{P - P_{g2}} \quad (\phi_2 = 1)$$

Il suffit de mesurer la pression et la température de l'air à l'entrée Et à la sortie d'un saturateur adiabatique pour avoir : ω_1 **et** ω_2



Psychrométrie

Saturation adiabatique et abaque psychrométrique

- En pratique on peut approximer la saturation adiabatique avec un thermomètre à bulbe humide:

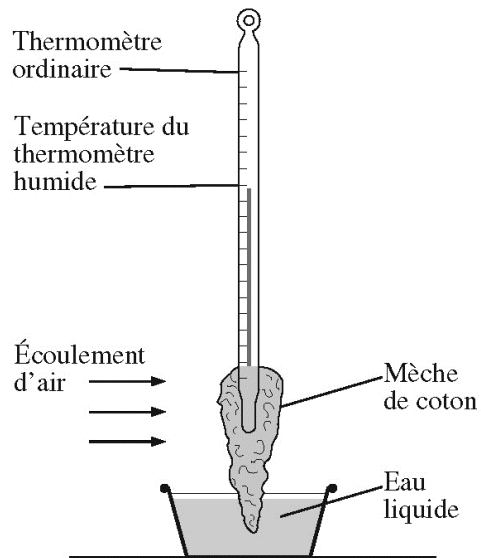


FIGURE 14.12

Dispositif pour mesurer la température du thermomètre humide.

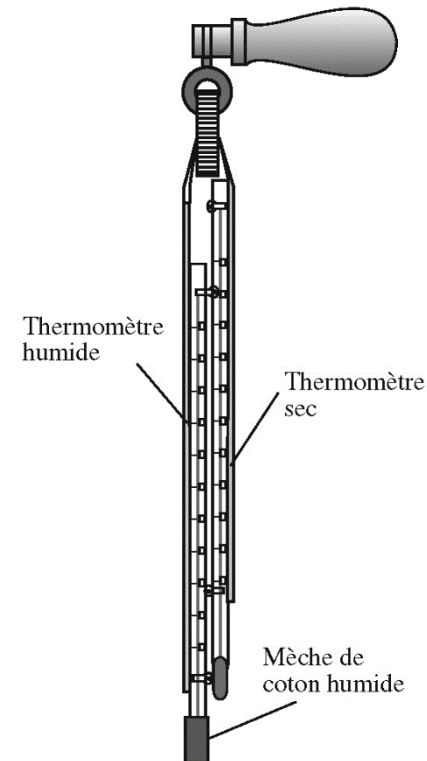


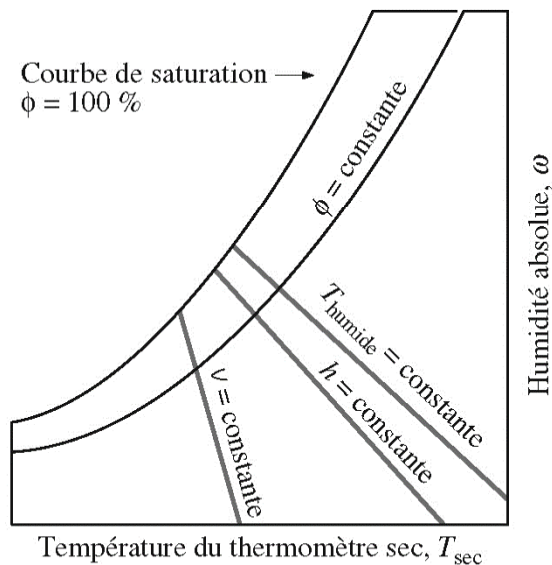
FIGURE 14.13

Psychromètre à rotation.

Psychrométrie

Abaque psychrométrique

Toutes les variables thermodynamiques de l'air atmosphérique ont été regroupées dans un seul diagramme: **Diagramme psychrométrique**



$$\omega_1 = f(T_{wb}, T, P)$$

FIGURE 14.14

Schéma du diagramme psychrométrique. T_{humide} est la température du thermomètre humide et T_{sec} est celle du thermomètre sec.

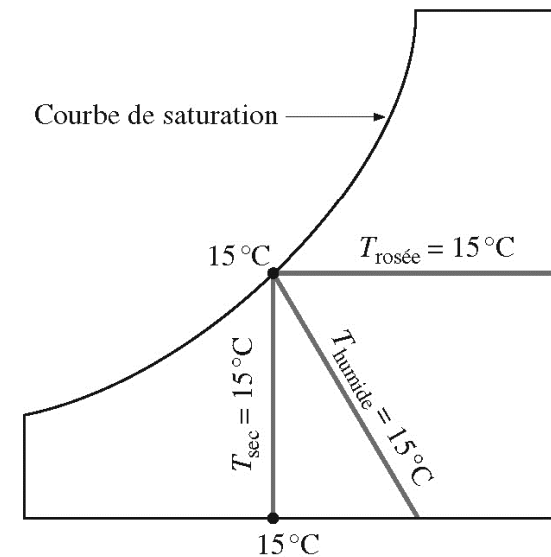
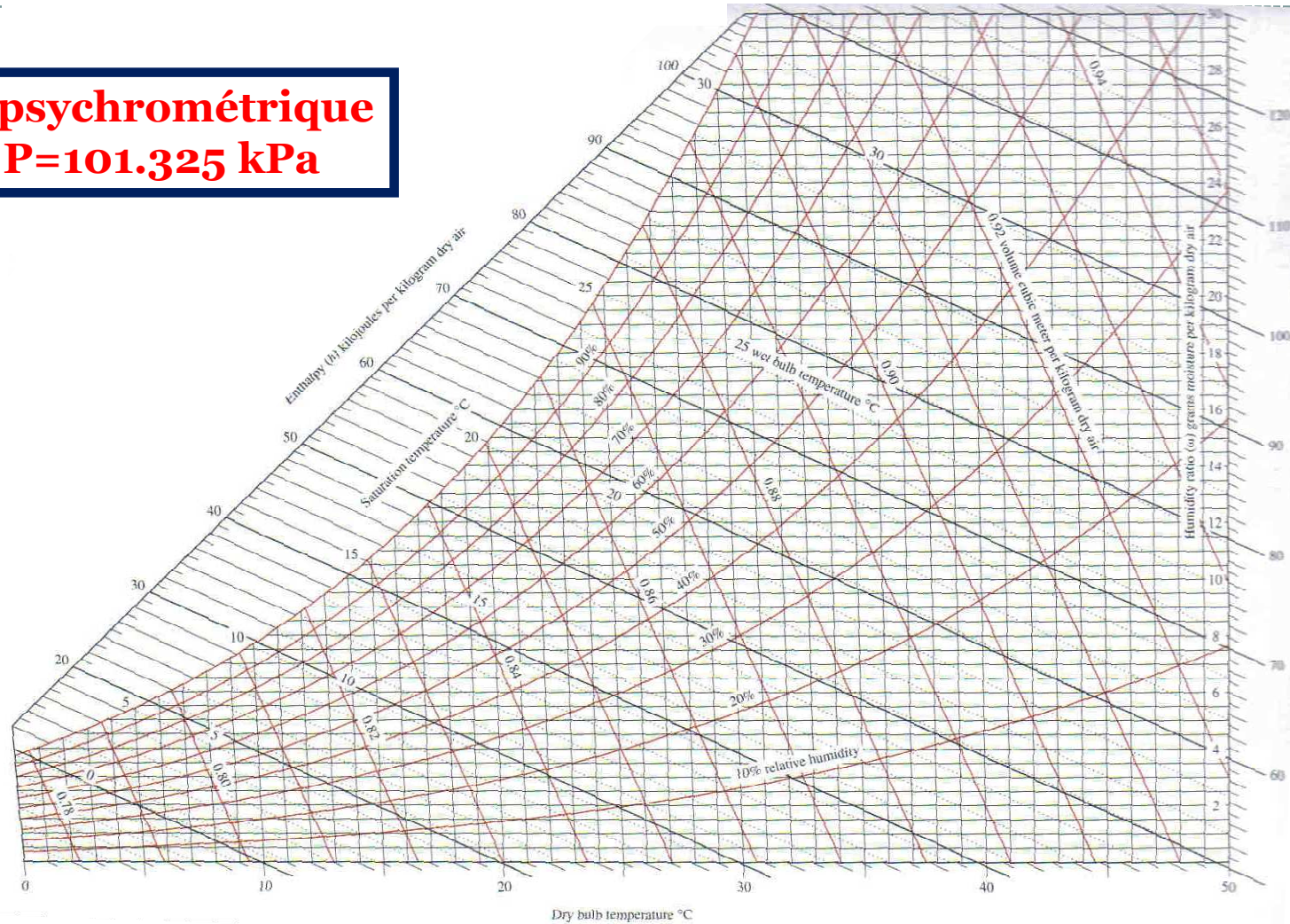


FIGURE 14.15

Dans l'air saturé, la température du thermomètre sec et la température du thermomètre humide ainsi que le point de rosée sont identiques.

Psychrométrie

**Abaque psychrométrique
pour $P=101.325$ kPa**



Psychrométrie

Applications

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

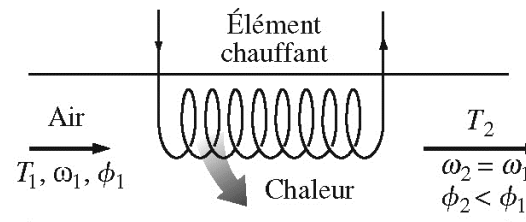


FIGURE 14.19

Au cours d'une simple évolution de chauffage, l'humidité absolue demeure inchangée. Cependant, l'humidité relative diminue.

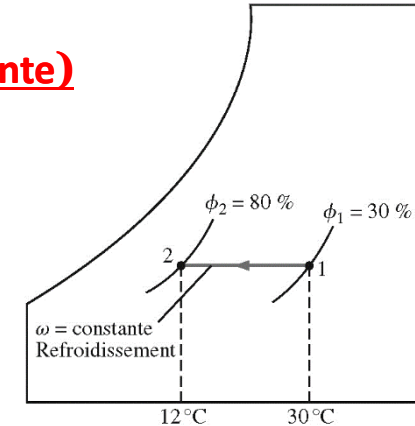
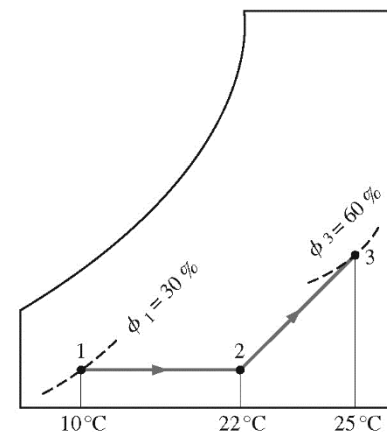
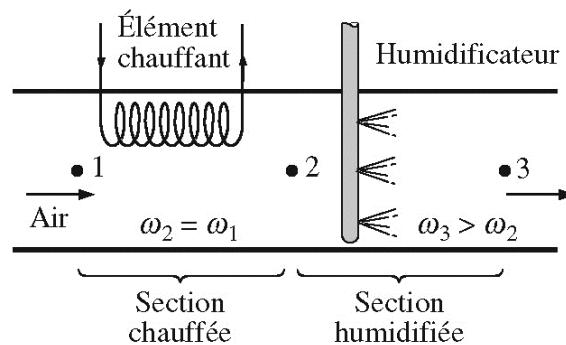


FIGURE 14.20

Au cours d'une simple évolution de refroidissement, l'humidité absolue demeure inchangée. Cependant, l'humidité relative augmente.

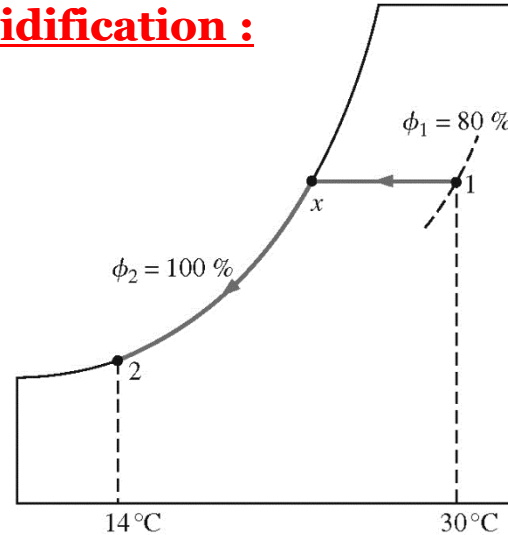
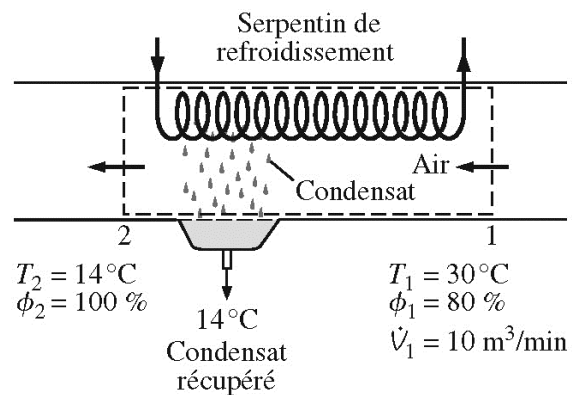
2) Chauffage avec humidification



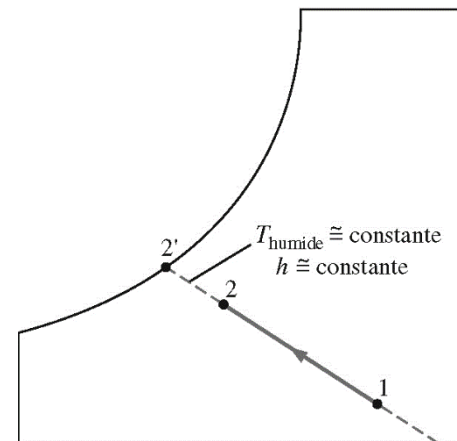
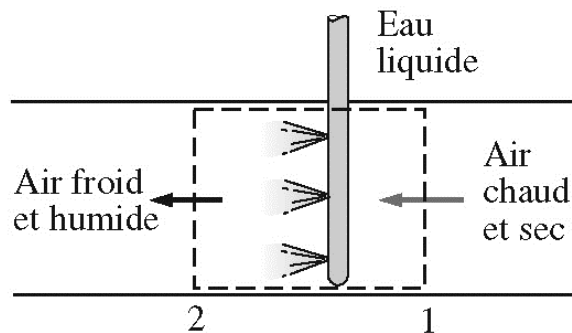
Psychrométrie

Applications

1) Refroidissement avec deshumidification :



2) Chauffage avec humidification :



Psychrométrie

Applications

Tour de refroidissement

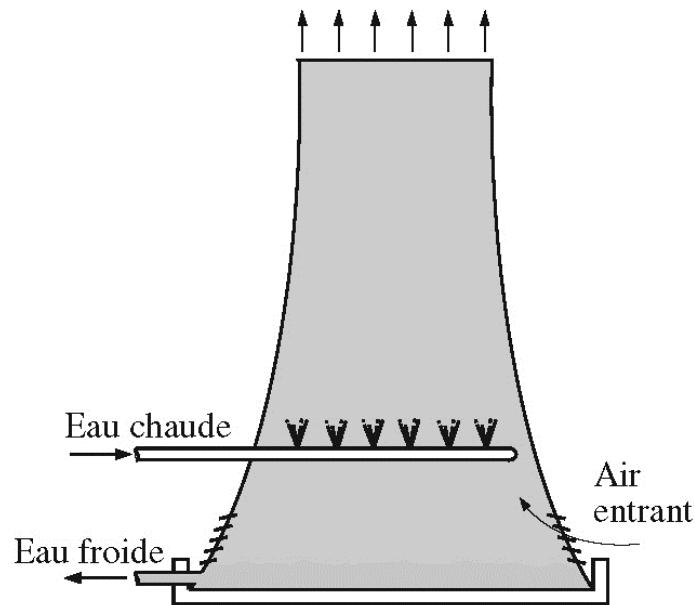
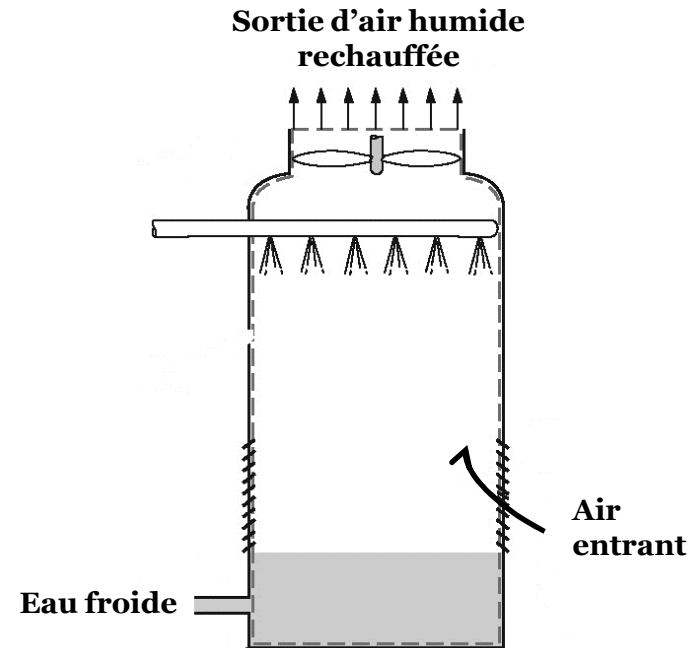


FIGURE 14.30

Tour de refroidissement humide à circulation naturelle.



Tour de refroidissement humide à circulation forcée

Exemple (à lire): CB&L ex. 14.9, p. 639

Lecture suggérée

Sections **13.1 à 13.3, 14.1, 14.5** du livre, «**Thermodynamique, une approche pragmatique**», Y. Cengel, M. Boles, M. Kanoğlu et M. Lacroix, Chenelière-McGraw-Hill, 2019.