

CHAPITRE 13 LES DIAGRAMMES THERMODYNAMIQUES

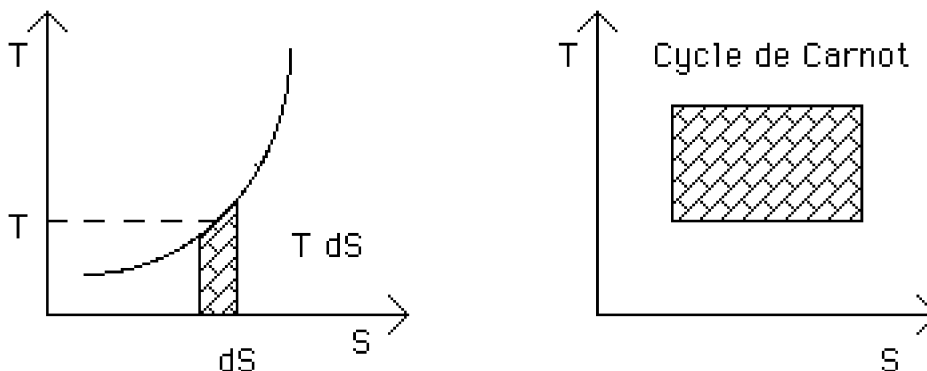
I GENERALITES

Pour étudier des fluides réels s'éloignant des propriétés des gaz parfait, les équations caractéristiques des gaz réels sont d'un emploi compliqué. En fait, on utilise souvent des tables de valeurs ou des diagrammes. Pour étudier les évolutions d'un système et faire des bilans énergétiques, on dispose d'un certain nombre de paramètres et de fonctions d'état: T, P, V, U, H, S, G, F. Du fait de l'équation d'état reliant les paramètres, $f(P,V,T) = 0$, il suffit de 2 paramètres pour caractériser l'état et les transformations d'un système. On dispose donc d'un certain nombre de couples P-V, T-S, H-S, U-S, P-H,...

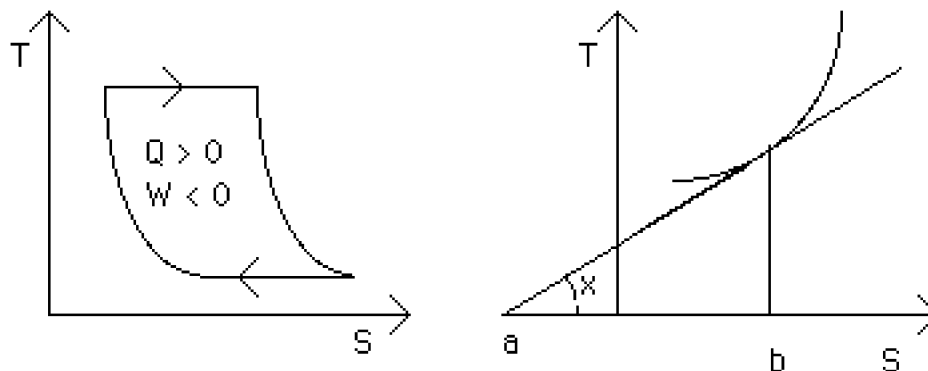
En fait pour l'étude d'un système et de ses transformations on utilise le couple le plus approprié. On dispose ainsi d'un certain nombre de diagrammes, ayant chacun des propriétés particulières: nous allons en présenter quelques uns parmi les plus utilisés. En fait l'étude des diagrammes et leur utilisation est relativement simple à partir du moment où toutes les bases sont connues. Nous ne reviendrons pas sur le diagramme de Clapeyron, largement utilisé. Les propriétés décrites le sont en général pour des transformations réversibles.

II DIAGRAMME ENTROPIQUE (T-S)

Nous avons déjà décrit brièvement ce diagramme:



Dans le diagramme entropique, les isothermes sont, bien sûr, horizontales et les isentropiques verticales. Le cycle de Carnot est donc représenté par un rectangle. L'aire inscrite sous une transformation réversible (aire = T dS) est égale à la quantité de chaleur échangée au cours de cette transformation. L'aire d'un cycle est donc égale au travail et à la quantité de chaleur échangée:



La sous tangente à une courbe (segment ab) est égale à la capacité calorifique:

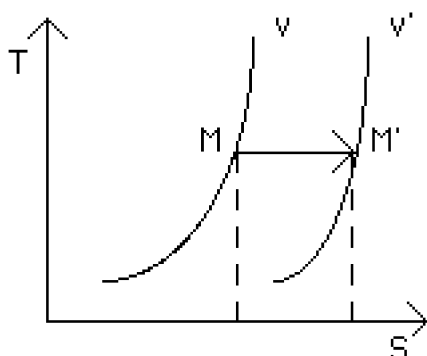
$$ab = \frac{T}{\text{tg } x} = \frac{T}{dT/dS} = \frac{T dS}{dT} = \frac{\delta Q}{dT}$$

Pour une transformation isobare réversible, par exemple, si le diagramme est tracé pour 1 kg, la sous tangente est égale à la chaleur massique à pression constante:

$$ab = c_p.$$

- Transformations isobares et isochores d'un gaz parfait

Pour une transformation isochore réversible d'un gaz parfait: $dS = \frac{C_V}{T} dT$



$S = C \ln T + B$ où B est une constante

$$T = e^{(S-B)/C_V} = k e^{S/C_V}$$

Une transformation isochore d'un gaz parfait est représentée par une exponentielle.

Une isobare est représentée par une exponentielle d'équation $T = k' e^{S/C_p}$

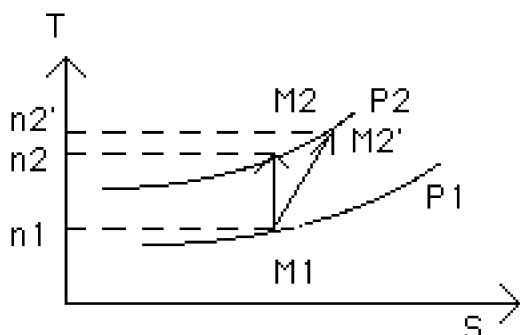
$$\text{De plus } MM' = S' - S = r \ln \frac{v}{v'} = Cte$$

Deux isochores ou deux isobares se déduisent l'une de l'autre par translation.

- Cas d'un mélange liquide- vapeur:

Dans le domaine d'équilibre liquide-vapeur correspondant à l'ébullition, les isobares sont confondues avec les isothermes. Ce sont donc des horizontales.

- Etude d'une compression ou d'une détente d'un système ouvert:



Une détente isentropique dans une turbine est représentée par une verticale M_1M_2 , avec $W'_{sd} = H_2 - H_1$

La détente réelle irréversible se fait à entropie croissante M_1M_2' :

$$W'_{rd} = H'_2 - H_1$$

Le rendement isentropique de compression est donné par:

$$\eta_{sd} = \frac{H'_2 - H_1}{H_2 - H_1} = \frac{n_1 n_2'}{n_1 n_2}$$

Une compression isentropique dans un compresseur est représentée par une verticale M_1M_2 , avec $W'_{sc} = H_2 - H_1$

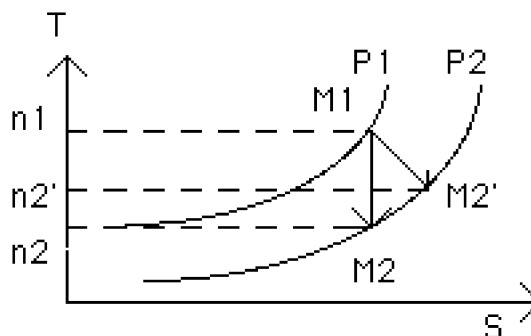
Pour un gaz parfait $H = C_p T + cte$

La compression réelle irréversible se fait à entropie croissante M_1M_2' :

$$W'_{rc} = H'_2 - H_1$$

Le rendement isentropique de compression est donné par:

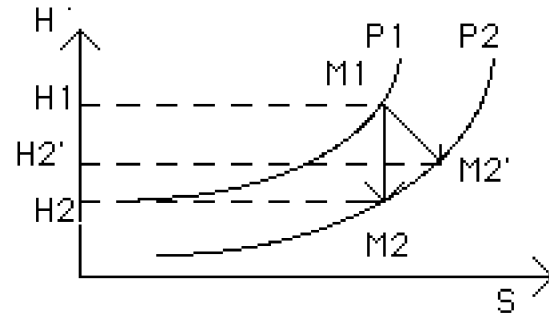
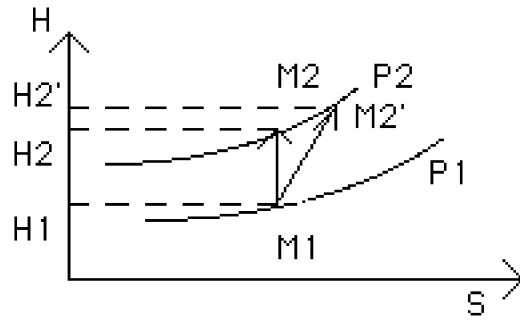
$$\eta_{sc} = \frac{H_2 - H_1}{H'_2 - H_1} = \frac{n_1 n_2}{n_1 n'_2}$$



III DIAGRAMME ENTHALPIQUE (H-S)

Pour un gaz parfait et si C_p est constant le diagramme enthalpique est identique au diagramme entropique à un changement sur l'échelle des ordonnées

Pour l'air, dans les conditions habituelles d'utilisation, par exemple pour l'étude du cycle de Joule des turbines à gaz, l'échelle des ordonnées est en même temps, l'échelle des températures et l'échelle des enthalpies; On retrouve bien sur les résultats du diagramme entropique:



Pour une compression:

$$W'_{sc} = H_2 - H_1$$

$$W'_{rc} = H'_2 - H_1$$

$$\eta_{sc} = \frac{W'_{sc}}{W'_{rc}} = \frac{H_2 - H_1}{H'_2 - H_1}$$

Pour une détente:

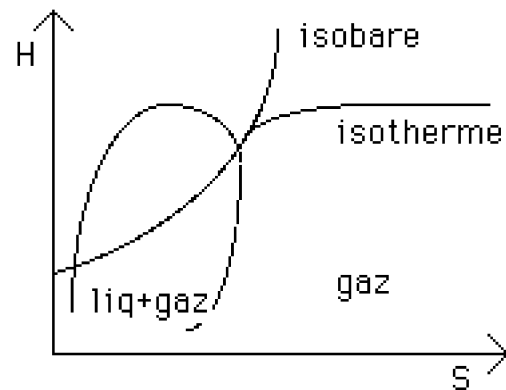
$$W'_{sd} = H_2 - H_1$$

$$W'_{rd} = H'_2 - H_1$$

$$\eta_{sd} = \frac{W'_{rd}}{W'_{sd}} = \frac{H'_2 - H_1}{H_2 - H_1}$$

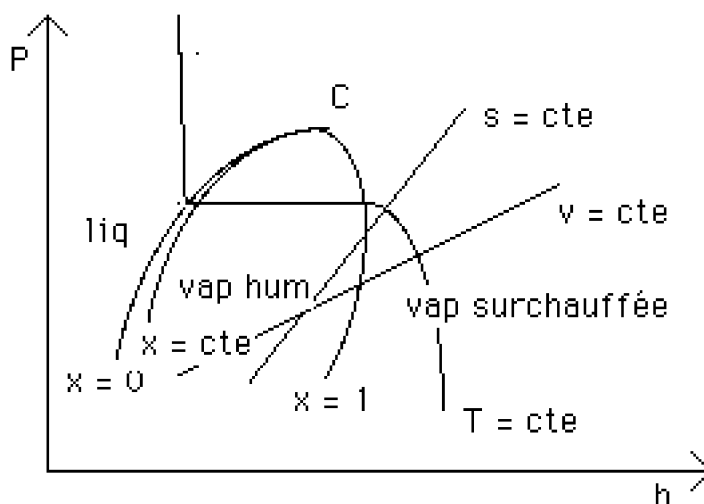
- Cas d'un mélange liquide-vapeur (diagramme de Mollier)

Dans ce cas les isobares et les isothermes sont confondues dans le domaine où les deux phases, liquide et vapeur, sont en équilibre (vapeur humide); elles se séparent dès que l'on quitte ce domaine: les isobares ont en général une allure exponentielle, les isothermes aussi dans le domaine de la vapeur humide; dans le domaine de la vapeur surchauffée, les isothermes s'éloignent des isobares pour tendre vers l'horizontale que l'on obtient pour un gaz parfait.



IV DIAGRAMME P-H (ou LnP-H)

Ce diagramme est particulièrement utilisé dans le cas des machines frigorifiques des PAC.



V AUTRES DIAGRAMMES

Il existe un grand nombre d'autres diagrammes dont l'utilisation spécifique dépend de leurs propriétés et de leurs caractéristiques. Par exemple:

- Diagramme Ln V-S

Utilisé dans le cas des moteurs à allumage commandé, cycle Beau de Rochas par exemple

- Diagramme enthalpie-richesse

Richesse: $\rho = \frac{q_k}{q_a} = \frac{\text{rapport de mélange}}{\text{rapport de mélange stoechiométrique}}$

VI GAZ BRULES

Dans le cas des moteurs à combustion, il est préférable d'utiliser, chaque fois que cela est possible, les propriétés des gaz brûlés et non celles de l'air. Ceci encore plus dans le cas des moteurs à allumage commandé et Diesel où le rapport de mélange est proche de la stoechiométrie. Dans le cas des turbines à gaz, le mélange est très dilué avec un excès d'air important afin d'éviter des températures excessives dans la turbine. Les propriétés des gaz brûlés se rapprochent alors de celles de l'air. A partir de l'équation de combustion, on peut déduire les propriétés des gaz brûlés à partir des propriétés de l'air.

VII L'AIR HUMIDE

1 Généralités

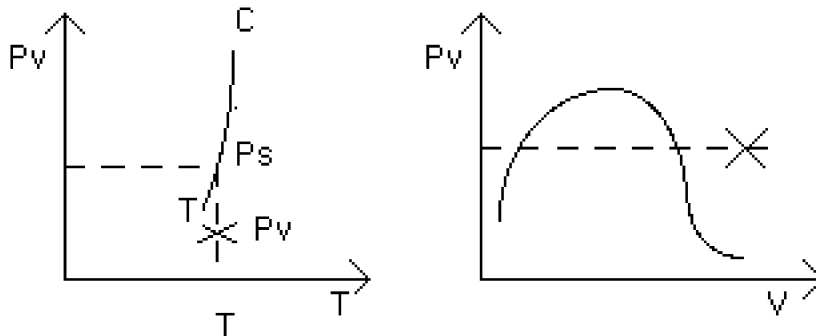
L'air sec est un mélange de gaz constitué de:

- 78.05 % d'azote N₂
- 20.97 % d'oxygène O₂
- 0.93270 % d'argon
- 0.00161 % de néon
- 0.00046 % d'hélium
- 0.00011 % de krypton
- 0.03 % de dioxyde de carbone
- 0.01 % d'hydrogène
- 0.0002 % de monoxyde de carbone (en ville)

On le considère généralement comme un gaz parfait diatomique.

L'air humide est un mélange d'air et de vapeur d'eau: si P_a et P_v sont respectivement les pressions partielles d'air sec et de vapeur d'eau, la pression totale est $P = P_a + P_v$, c'est la pression atmosphérique.

P_v est la pression (ou tension) de vapeur saturante. La vapeur d'eau dans l'air est en général à l'état de vapeur surchauffée:



En général la pression de vapeur d'eau dans l'air est inférieure à la pression de saturation P_s . Dans l'air, la vapeur d'eau est alors à l'état surchauffé. Quand la pression de vapeur d'eau est égale à la pression de saturation, le point représentatif est sur la courbe de saturation. En aucun cas on ne peut avoir de la vapeur humide.

2 Définitions

-Degré hygrométrique ou humidité relative:

$$e = \frac{m_v}{m_v''} = \frac{P_v}{P_v''}$$

m_v et P_v représentent la masse et la pression de vapeur d'eau; m_v'' et P_v'' représentent la masse et la pression de vapeur d'eau saturante .

A la saturation l'humidité relative est de 100 %

-Teneur en vapeur d'eau ou humidité absolue:

$$x = \frac{m_v}{m_a} = \frac{\text{masse de vapeur d'eau}}{\text{masse d'air sec}}$$

par exemple pour 11.9 g de vapeur d'eau par kg d'air sec, $x = 0.0119$ kg par kg d'air sec

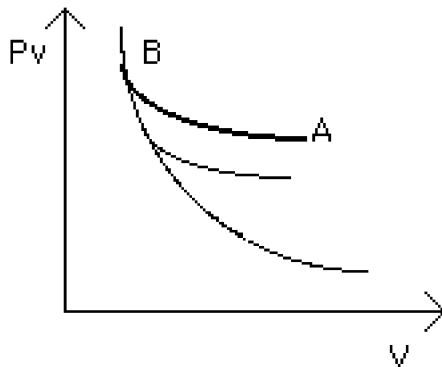
-Unité d'air humide:

$$1 + x = \frac{m_a + m_v}{m_a}$$

-Taux de saturation:

$$\varphi = \frac{x}{x''} = \frac{\text{humidité absolue de l'air humide}}{\text{humidité absolue de l'air humide à saturation}}$$

3 Influence de la température et de la pression



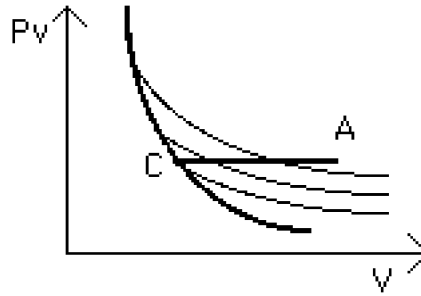
Si la pression totale varie à température constante, les pressions P_a et P_v varient proportionnellement.

Le point représentatif de la vapeur d'eau se déplace, en suivant une isotherme, jusqu'au point B où il atteint la saturation ($e = 1$).

L'humidité relative e augmente avec la pression.

Si c'est la température qui varie à pression totale constante, le point représentatif de la vapeur d'eau se déplace jusqu'au point C où il atteint la saturation ($e = 1$).

L'humidité relative e augmente quand la température diminue.



4 Mesure de l'humidité

a hygromètre à cheveu

Cette méthode est peu précise mais pratique. Elle est utilisée dans les hygromètres enregistreurs.

b hygromètre à condensation

On refroidit une paroi polie par évaporation d'éther. Quand la vapeur se condense sur la paroi, on a atteint la saturation; la température correspondante est la température du point de rosée θ_r .

La pression étant constante, la pression de saturation du point de rosée P_{θ_r} correspond à la pression de vapeur d'eau dans l'air P_v : $P_v = P_{\theta_r}$

Par exemple si $\theta_r = 10^\circ\text{C}$ et $\theta_a = 30^\circ\text{C}$

On lit dans les tables:

$$\text{pour } \theta_p = 10^\circ\text{C} \quad P_v = P_{\theta_r} = 12.27 \text{ mbar}$$

$$\text{pour } \theta = 30^\circ\text{C} \quad P_v'' = 42.41 \text{ mbar} \quad e = \frac{P_v}{P_v''} = 0.29$$

L'humidité relative est de 29 %

c Psychromètre à 2 thermomètres

Un thermomètre a son réservoir maintenu sec. On lit: θ

l'autre thermomètre a son réservoir maintenu humide. On lit: θ_h

La quantité d'eau qui s'évapore au réservoir humide est celle qui est nécessaire pour saturer l'air. Elle est proportionnelle à $(x'' - x)$, où x'' est l'humidité absolue de l'air saturé à θ_h et x l'humidité absolue de l'air à θ .

soit m la masse d'eau évaporée en $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}$

L_v la chaleur latente de vaporisation de l'eau à 0°C : $L_v = 594.7 \text{ kcal/kg}$

$c_{pa} = 0.24 \text{ kcal/kg}$ la chaleur massique de l'air à pression constante

$c_{pv} = 0.46 \text{ kcal/kg}$ la chaleur massique à pression constante de la vapeur d'eau

L'air humide contient $x \text{ kg d'eau par kg d'air sec}$. A la saturation il en contient x'' .

Pour passer à l'état de saturation au réservoir humide, il absorbe $(x'' - x)$ de vapeur d'eau par kg d'air sec .

Il a fallu $\frac{m}{x'' - x}$ kg d'air sec et la quantité de chaleur correspondant au refroidissement de θ à θ_h :

$\frac{m}{x'' - x} (c_{pa} + x c_{pv}) (\theta - \theta_h)$ a été absorbée par la vaporisation: $m L_v$

$$x = \frac{L_v x'' - c_{pa} (\theta - \theta_h)}{L_v + c_{pv} (\theta - \theta_h)}$$

d diagrammes de l'air humide

On utilise le diagramme de Carrier (x, θ) et le diagramme de Mollier (h, x) :

