

# Diagrammes d'état des fluides réels purs

---

## 1 Enthalpie de changement d'état

Hypothèse : Transformation monobare et réversible :

Rappels :

Un changement d'état a lieu à température et pression constante.

**Enthalpie de changement d'état**  $\Delta_{1 \rightarrow 2} H$  = énergie thermique que le corps pur peut emmagasiner ou restituer lors d'un changement d'état.

- Hors changement d'état :  $dH = \delta Q_p = C_p dT$
- Lors d'un changement d'état, pour une masse  $dm$  de fluide changeant d'état :  $dH = \delta Q_p = dm \times l$  où  $l$  est **l'enthalpie massique de changement d'état**

**Entropie de changement d'état**  $\Delta_{1 \rightarrow 2} S = \frac{\Delta_{1 \rightarrow 2} H}{T}$

- Lors d'un changement d'état :  $dS = dm \times s$  où  $s$  est **l'entropie massique de changement d'état**.

Remarque :

Le **signe de l'entropie** massique de changement d'état dépend du fait que l'on aille de la phase plus organisée vers moins organisée ou vice versa.

- Pour la vaporisation, la fusion et la sublimation : entropie et enthalpie massique de changement d'état seront positives. Ces trois transitions demandent donc un apport de chaleur.
- Pour la liquéfaction, la condensation et la solidification : entropie et enthalpie massique de changement d'état seront négatives. Ces trois transitions dégagent donc une quantité de chaleur.

L'enthalpie massique de changement d'état est couramment appelée **chaleur latente massique de changement d'état**.

Ordres de grandeurs :

Enthalpies massiques de vaporisation (énergie à fournir au fluide) :

- pour l'eau sous pression  $P = 10^5 \text{ Pa}$  :  $l_v = 2660 \text{ kJ.kg}^{-1}$  sous  $T = 373 \text{ K}$
- pour un fluide utilisé dans une machine frigorifique :  $l_v \approx 170 \text{ kJ.kg}^{-1}$

## 2 Equilibre liquide-vapeur

### 2.1 Titre massique en vapeur

On considère une masse,  $m$ , de corps pur en équilibre sous deux phases vapeur et liquide (sous forme de vapeur saturante). Son état est défini par deux paramètres intensifs :

- la pression,  $P$ , ou la température,  $T$
- la proportion de masse de vapeur,  $m_v$

On définit le **taux de vapeur** ou **titre massique en vapeur**,  $x$ , par :  $x = \frac{m_v}{m} = \frac{m_v}{m_v + m_l}$

## 2.2 Règle des moments

Variation élémentaire d'enthalpie lors d'une vaporisation d'une masse  $dm$  de fluide :

$$dH = dm \times l_v \text{ avec } dm = m dx \Rightarrow dh = dx \times l_v$$

En intégrant entre un taux de vapeur nul et  $x$  :

$$\int_{h_l}^{h(x)} dh = l_v \int_0^x dx \Rightarrow h(x) - h_l = l_v x \Rightarrow h(x) = h_l + (h_v - h_l)x$$

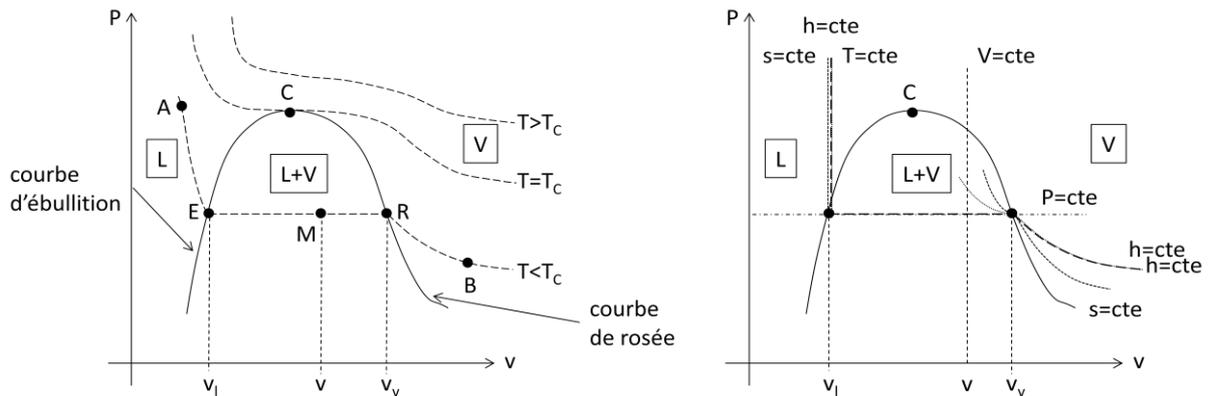
où  $h_l$  est l'enthalpie massique du liquide saturant,  $h_v$  est l'enthalpie massique de la vapeur saturante sèche.

C'est ce qu'on appelle la **règle des moments**.

La règle des moments permet de trouver la valeur de fonctions intensives du fluide au cours de son changement d'état connaissant son titre massique en vapeur,  $x$ . On l'énonce pour le volume, l'enthalpie et l'entropie massiques :

$$v = v_l + (v_v - v_l)x \text{ ou } h(x) = h_l + (h_v - h_l)x \text{ ou } s(x) = s_l + (s_v - s_l)x \quad (1)$$

## 3 Diagramme de Clapeyron (P,v)



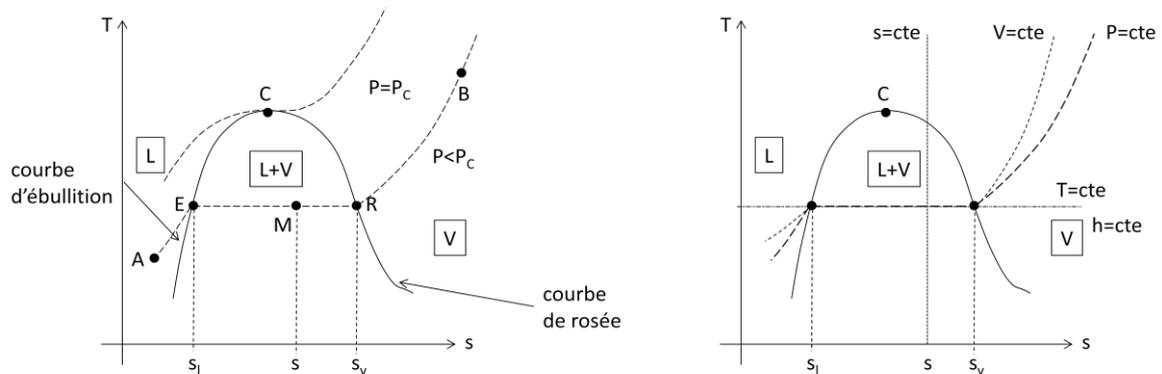
**Règle des segments :**  $\frac{v - v_l}{v_v - v_l} = x$

Equations des courbes dans la limite du gaz parfait et du liquide incompressible et indilatable :

- **Isotherme :**
  - Phase liquide incompressible et indilatable : une isotherme est une droite verticale.
  - Gaz parfait :  $PV = nRT$  ou  $Pv = \frac{RT}{M}$ , une isotherme est une hyperbole.
  - Système diphasé : changement d'état se fait à température constante sous pression constante = palier horizontal.
- **Isobare :**
  - Quelque soit l'état du système : courbe horizontale
- **Isochore :**
  - Quelque soit l'état du système : droite verticale
- **Isentropique :**

- Phase liquide incompressible et indilatable :  $dS = C \frac{dT}{T}$  donne une isotherme donc une droite verticale
- Gaz parfait :  $Pv^\gamma = cte$  donne une hyperbole de pente supérieure (en valeur absolue) à celle d'une isotherme
- **Isenthalpe :**
  - Phase liquide incompressible et indilatable :  $dH = CdT$  donne une isotherme donc une droite verticale
  - Gaz parfait :  $dH = C_p dT$  donne une isotherme donc une hyperbole

#### 4 Diagramme entropique (T,s)



Règle des segments :  $\frac{s - s_l}{s_v - s_l} = x$

Equations des courbes dans la limite du gaz parfait et du liquide incompressible et indilatable :

- **Isotherme :**
  - Quelque soit l'état du système : courbe horizontale
- **Isobare :**
  - Phase liquide incompressible et indilatable :  $dS = C \frac{dT}{T}$  donc l'isobare sera représentée par une courbe exponentielle.
  - Gaz parfait :  $dH = TdS + VdP \Rightarrow dS = \frac{dH}{T} - \frac{V}{T}dP = C_p \frac{dT}{T} - nR \frac{dP}{P} = C_p \frac{dT}{T}$  donc l'isobare sera représentée par une courbe exponentielle.
  - Système diphasé : changement d'état se fait à température constante sous pression constante = palier horizontal.
- **Isochore :**
  - Phase liquide incompressible et indilatable :  $dS = C \frac{dT}{T}$  donc l'isochore sera représentée par une courbe exponentielle.
  - Gaz parfait :  $dU = TdS - PdV \Rightarrow dS = \frac{dU}{T} + \frac{P}{T}dV = C_v \frac{dT}{T} + nR \frac{dV}{V} = C_v \frac{dT}{T}$  donc l'isochore sera représentée par une courbe exponentielle.
- **Isentropique :**
  - Quelque soit l'état du système : droite verticale

- **Ienthalpe :**
  - Phase liquide incompressible et indilatable :  $dH = CdT$  donne une isotherme donc une droite horizontale
  - Gaz parfait :  $dH = C_p dT$  donne une isotherme donc une droite horizontale

## 5 Applications des diagrammes aux fluides réels : étude d'une machine frigorifique

Son cycle est composé de la manière suivante :

- de (1) à (2) : le fluide est à l'état de vapeur saturante sèche à la température  $T_1 = -30^\circ C$ . Il subit une compression adiabatique réversible le menant à la pression  $P_2$ . Cette transformation est donc isentropique et mène à un état de vapeur sèche.
- de (2) à (3) : l'évolution est isobare. Un transfert thermique a lieu entre le fluide et une source chaude. Dans l'état (3), le liquide est saturant à la pression  $P_2$  et à la température  $T_3 = 40^\circ C$ .
- de (3) à (4) : le fluide subit une détente isenthalpique (adiabatique). L'état (4) ramène à la même pression que l'état (1). On notera  $x_4$  le taux de vapeur correspondant.
- de (4) à (1) : l'évolution est isobare. Un transfert thermique a lieu entre le fluide et la source froide (enceinte réfrigérée).

