FORMULAIRE DE THERMODYNAMIQUE

Relations générales

- **Travail des forces de pression reçu par le système :** $\boxed{\delta W_p = -p_{ext}dV}$ soit $\boxed{W_p = -\int p_{ext}dV}$ $P_{ext} = P$ si équilibre mécanique
- **Energie totale E_{TOT} :** $\boxed{E_{TOT} = U + Ec_{macro} + Ep_{ext}}$ avec U énergie interne : $\boxed{U = Ec_{micro} + Ep_{int}}$
- **Bilan issu du 1[er] principe :** $\boxed{\Delta E_{TOT} = \Delta U + \Delta Ec_{macro} + \Delta Ep_{ext} = W + Q}$ **Cas usuel** $\boxed{\Delta U = W + Q}$

  Avec $W = W_p + W_{\neq P}$ où $W_{\neq P}$ travail utile et W_p travail des forces de pression
- **Enthalpie :** $\boxed{H = U + PV}$ **soit** $\boxed{\Delta H = \Delta U + \Delta(PV)}$

Transformations particulières

Adiabatique : $\boxed{\begin{matrix} Q = 0 \\ \Delta U = W_{adiab} \end{matrix}}$

Isochore : $\boxed{\begin{matrix} W_p = 0 \\ \Delta U = Q_v + W_{\neq P} \end{matrix}}$

Si réversibilité mécanique : $\boxed{W_p = -\int PdV}$

Isobare ; ou monobare avec $P_i = P_f = P_{ext}$: $\boxed{\begin{matrix} W_p = -p_{ext}\Delta V \\ \Delta H = Q_p + W_{\neq P} \end{matrix}}$

Systèmes monophasés idéaux : Gaz parfaits et P.C.I.I. (phases condensées incompressibles indilatables)

- **Capacités thermiques :**

  Capacité thermique isochore C_v **d'un système :** $Cv = \frac{dU}{dT}$ **(en J.K^{-1}),**

  Capacité thermique isobare C_p **d'un système :** $Cp = \frac{dH}{dT}$ **(en J.K^{-1}).**

- **Corps condensés :** modèle P.C.I.I. : $V = Cte$ et $C_p = C_v = C = mc$ $\boxed{\Delta U \approx \Delta H \approx mc\Delta T}$ si $c \approx$ cte

- **Gaz parfaits :**

• **Relation de Mayer :** $\boxed{C_p - C_V = nR}$ (en J/K) ; $C_{p,m} - C_{v,m} = R$ (en J/mol/K) ; $c_p - c_V = \frac{R}{M}$ (en J/kg/K).

• **Coefficient de Laplace (ou isentropique)** γ **:** $\boxed{\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{c_p}{c_v} = \frac{C_{p,m}}{C_{v,m}}}$

• **Capacités thermiques du gaz parfait :** $\boxed{C_v = \frac{nR}{\gamma-1}}$ et $\boxed{C_p = \frac{\gamma nR}{\gamma-1}}$; soit

$C_{v,m} = \frac{R}{\gamma-1}$ et $C_{p,m} = \frac{\gamma R}{\gamma-1}$; $c_v = \frac{R}{M(\gamma-1)}$ et $c_p = \frac{\gamma R}{M(\gamma-1)}$

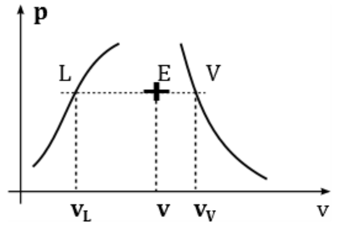
• ∀ transformation d'un G.P. si γ = cte : $\boxed{\Delta U = C_V\Delta T = \frac{nR}{\gamma-1}\Delta T \text{ et } \Delta H = C_p\Delta T = \frac{\gamma nR}{\gamma-1}\Delta T}$

• **Lois de Laplace :** Si 1) GP + 2) transformation adiabatique+ 3) réversible : $\boxed{PV^\gamma = cte}$

Transitions de phase ou changement d'état

- **Titre ou fraction massique d'un système sous 2 phases :** $\boxed{x_i = \frac{m_i}{m_{tot}}}$ et $x_1 + x_2 = 1$

- **Volume massique v en M, équilibre liquide-vapeur caractérisé par un titre en vapeur x_v :**



$$\boxed{v = x_v v_v + (1 - x_v) v_L}$$

Règle des moments associée : $\boxed{x_v = \frac{v - v_L}{v_v - v_L} = \frac{LE}{LV}}$

- **Enthalpie massique de changement d'état**, ou **chaleur latente**, à la température T, (en J/kg) : différence entre les enthalpies massiques du corps pur dans la phase 2 et dans la phase 1 à T, correspondant à la variation d'enthalpie par kg de corps subissant le changement d'état à la température T sous la pression atmosphérique.

$$\boxed{\Delta_{1\to2}h(T) = h_2(T) - h_1(T) = l_{1\to2}(T) = -\Delta_{2\to1}h(T)}$$

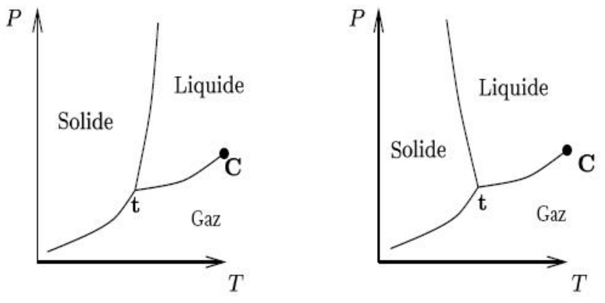
- **Enthalpie massique $\Delta_{vap}h(T)$ de vaporisation (L→ V) :**
$\boxed{\Delta_{vap}h(T) = h_v(T) - h_l(T) = l_{vap}(T) = -\Delta_{liq}h(T)}$

- **Bilan enthalpique d'un changement d'état isotherme et isobare :** $\boxed{\Delta_{1\to2}H = m_{12}\Delta_{1\to2}h = m_{12}l_{1\to2}(T)}$;

Avec m_{12} masse ayant subit le changement d'état, soit $\boxed{m_{12} = m_{2,F} - m_{2,I} = m_{tot}(x_{2,F} - x_{2,I})}$

Pour une transformation monobare en l'absence de travail utile (ou indiqué) : $\Delta_{1-2}H = Q_P$

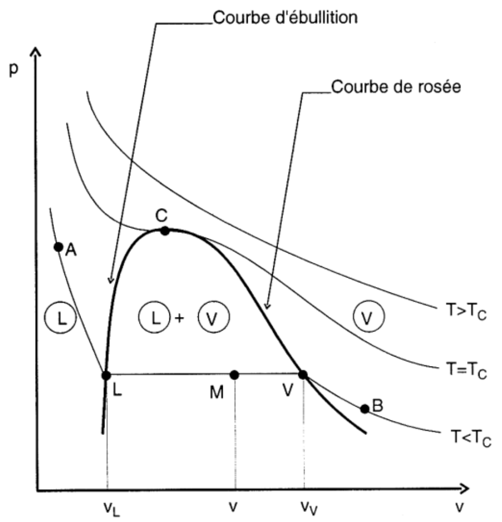
- Diagramme de phase (P, T) d'une espèce diphasée :



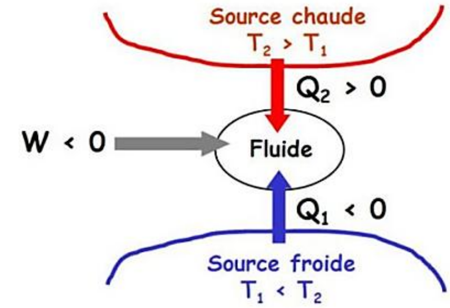
Cas usuel

Cas rare (eau)

- Diagramme de Clapeyron (P, v) d'une espèce diphasée :



- Expression générale du rendement d'un moteur thermique ; Cycle de Carnot : expression du rendement en fonction des températures des sources chaude et froide.

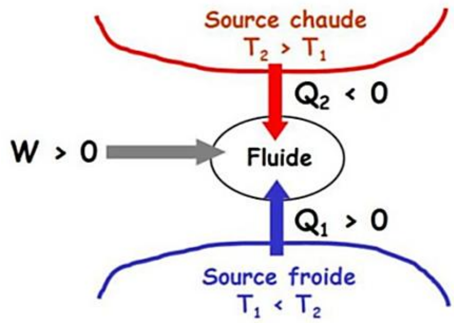


$\eta = -\frac{W_{TOT}}{Q_{Chaud}}$

Rendement de Carnot :

$\eta = 1 - \frac{T_{Froid}}{T_{Chaud}}$, Températures exprimées en Kelvin

- Expression générale de l'efficacité d'un réfrigérateur ou d'une pompe à chaleur ; Cycle de Carnot :'expression de l'efficacité en fonction des températures des sources chaude et froide.

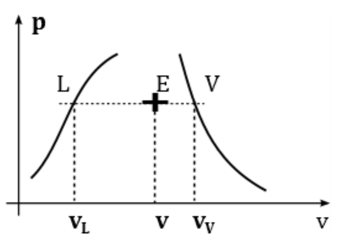
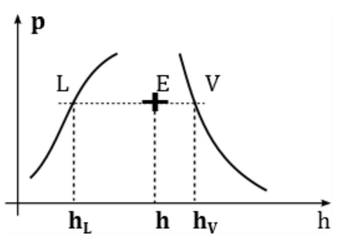


$e_{frigo} = \frac{Q_{Froid}}{W}$ **et** $e_{PAC} = -\frac{Q_{Chaud}}{W}$

Efficacité de Carnot :

$e_{frigo} = \frac{T_{Froid}}{T_{Chaud}-T_{Froid}}$ et $e_{PAC} = \frac{T_{Chaud}}{T_{Chaud}-T_{Froid}}$, Températures exprimées en Kelvin

- Règle des moments permettant de définir le titre en vapeur x à partir du diagramme de Clapeyron ou du diagramme des frigoristes :

Diagramme de **Clapeyron :** p fonction de v	Diagramme des **frigoristes :** p fonction de h
	
$x = \frac{LE}{LV} = \frac{v - v_l}{v_v - v_l}$	$x = \frac{LE}{LV} = \frac{h - h_l}{h_v - h_l}$

- Premier principe en système ouvert dans le cas d'un écoulement permanent de débit massique D_m à travers un organe ou une machine : Equation massique (écriture en J/kg), équation en termes de puissance (écriture en W).

Premier principe appliqué à un écoulement permanent, équation massique :

$$(h_s - h_e) + (½\, c_s^2 - ½\, c_e^2) + (gz_s - gz_e) = w_i + q$$ **(unité : J/kg)**

Entrée Sortie

c_e	Vitesse du fluide en entrée (m/s)	c_s	Vitesse du fluide en sortie (m/s)
z_e	Altitude en entrée (m)	z_s	Altitude en sortie (m)
h_e	Enthalpie massique en entrée (J/kg)	h_s	Enthalpie massique en sortie (J/kg)

$\boldsymbol{w_i}$ = **travail indiqué massique** (*ou* travail massique net *ou* travail massique différent du travail des forces de pression)

$\boldsymbol{q}$ = **transfert thermique massique**.

Premier principe appliqué à un écoulement permanent, équation en termes de puissance :

$$\boldsymbol{D_m\,[(h_s - h_e) + (½\,c_s^2 - ½\,c_e^2) + (gz_s - gz_e)] = P_i + P_{th}} \qquad \textbf{(unité : W)}$$

Où $D_m = \frac{dm}{dt}$ débit massique (en kg.s⁻¹),

Puissance indiquée (utile) reçue $\boldsymbol{P_i}$: $\boldsymbol{P_i = \frac{\delta W_i}{dt}}$

Puissance thermique reçue $\boldsymbol{P_{th}}$: $\boldsymbol{P_{th}} = \dot{Q} = \frac{\delta Q}{dt}$

- Vecteur densité de flux thermique $\overrightarrow{J_Q}$, loi de Fourier, conductivité thermique λ (+ unité) et flux thermique échangé Φ_Q.

On définit le **vecteur densité de flux thermique $\overrightarrow{J_Q}$**:

$\overrightarrow{J_Q}(M,t) = -\lambda.\overrightarrow{gradT}(M,t)$ ou $\boxed{\boldsymbol{\overrightarrow{J_Q} = -\lambda.\overrightarrow{gradT}}}$ **Loi de Fourier**

$\boldsymbol{j_Q}$ en W.m^{-2}

$\boldsymbol{\lambda}$: **conductivité thermique** du matériau (W.m^{-1}.K^{-1})

On définit la **Puissance thermique** ou **Flux thermique** échangé(e) $\boldsymbol{\Phi_Q}$:

$\Phi_Q(M,t) = \iint_S \overrightarrow{J_Q}(M,t).\overrightarrow{dS}$ ou $\boldsymbol{\Phi_Q = \iint_S \overrightarrow{J_Q}.\overrightarrow{dS}}$ en watts (W)

- Analogies entre grandeurs thermiques et grandeurs électriques.

Grandeur thermique	Grandeur électrique
$\boldsymbol{\overrightarrow{J_Q} = -\lambda.\overrightarrow{gradT}}$ Densité de flux thermique (W.m^{-2})	$\boldsymbol{\overrightarrow{J_e} = -\sigma.\overrightarrow{gradE}}$ Densité de courant (A.m^{-2})
T Température (K)	*V* Potentiel électrique (V)
λ Conductivité thermique (W.m^{-1}.K^{-1})	σ Conductivité électrique ($\Omega^{-1}.m^{-1}$)
$\Phi_Q = \iint_S \overrightarrow{J_Q}.\overrightarrow{dS}$ Flux ou puissance thermique (W)	$I = \iint_S \overrightarrow{J_e}.\overrightarrow{dS}$ Intensité électrique (A)
R_{th} Résistance thermique (K.W^{-1})	R Résistance électrique (Ω ou V.A^{-1})

- Résistance thermique

$\boldsymbol{R_{th} = \frac{L}{\lambda S}}$ **résistance thermique (K.W^{-1})**

L : Longueur ou épaisseur (m)

S : Section ou surface (m^2)

$\boldsymbol{\lambda}$: **conductivité thermique** du matériau (W.m^{-1}.K^{-1})

- Dans le cas de l'échange conducto-convectif, expression de la densité de flux thermique

Flux thermique par unité de surface = densité de flux thermique (W.m^{-2}) :

$\boldsymbol{\varphi_{CC} = -\lambda_{fluide}\left(\frac{T_{fluide}-T_{paroi}}{e}\right) \quad = h.(T_{paroi} - T_{fluide})}$

e : épaisseur de la couche limite

$\boldsymbol{h = \frac{\lambda_{fluide}}{e}}$ **, coefficient de transfert conducto-convectif**

$\boldsymbol{h}$ **en W.K^{-1}.m^{-2}**