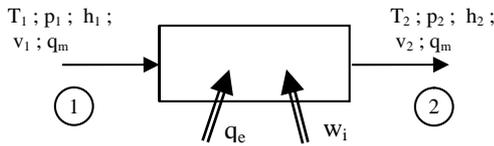


# METHODE D'ANALYSE D'UN PROBLEME DE THERMODYNAMIQUE

## I - Quelle est la nature du système ?

Ouvert ? Fermé ?

### Système Ouvert :



$$\mathbf{1PSO : w_i + q_e = \Delta h \{ + \Delta E_c \}}$$

(avec  $w_i = w_e + \Delta p v$ ) (Pour les tuyères).

Ou si il y a plusieurs débits, entrant(s) ou sortant(s) :

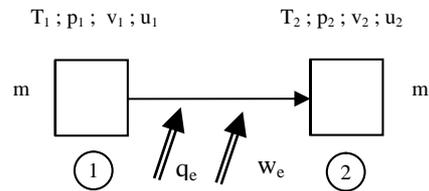
$$\mathbf{1PSO Généralisé : \Sigma P_i + \Sigma \Phi_e = \Sigma q_{ms} \cdot h_s - \Sigma q_{me} \cdot h_e}$$

$$\Sigma P_i + \Sigma \Phi_e = \Sigma q_{mc} \cdot (h_{sc} - h_{ec}) - \Sigma q_{mf} \cdot (h_{sf} - h_{ef})$$

(Avec  $P_i = 0$  si pas de parties mobiles).

$$[\Delta E_c = \frac{1}{2} (C_2^2 - C_1^2) ; \text{Cas des tuyères.}]$$

### Système Fermé :



$$\mathbf{1PSF : w_e + q_e = \Delta u}$$

$$w_e = - \int p \cdot dv \text{ (Evolution supposée réversible).}$$

(1PSF : Système qui accumule de l'énergie sous forme de travail / chaleur (interne).

Voir ci-dessous (II) pour les différents calculs de  $w_e$  selon l'évolution.

## II - Quelle est la nature de l'évolution ?

\* Voir complément d'informations au verso.

Isobare :  $p = \text{cste.}$

Isochore :  $v = \text{cste.}$

Isotherme :  $T = \text{cste.}$

Isotherme réversible :  $T = \text{cste}$  et  $q_e = \int T \cdot \Delta s$

Isenthalpe :  $h = \text{cste.}$

Isentropique (Adiabatique réversible) :  $s = \text{cste.}$

Isentropique (Gaz parfait : adiabatique réversible) :  $p \cdot v^\gamma = \text{cste.}$

Adiabatique :  $q_e = 0.$

Polytropique :  $p \cdot v^k = \text{cste.}$

Réversible :  $q_{\text{int}} = 0 \rightarrow q_e = \int T \cdot \Delta s$  et en SF :  $w_e = - \int p \cdot dv.$

Isobare :  $w_e = - p \cdot (v_2 - v_1).$

Isochore :  $w_e = 0.$  ( $dv = 0$  ; le volume ne varie pas).

Isentropique :  $GI$  :  $w_e = \Delta u = C_v \cdot \Delta T$

( $\leftarrow$  A partir du premier principe : Isentropique :  $q_e = 0.$ )

Isotherme :  $w_e = - p_1 \cdot v_1 \cdot \ln \left( \frac{v_2}{v_1} \right)$  ou  $w_e = - r \cdot T \cdot \ln \left( \frac{v_2}{v_1} \right).$

Polytropique :  $w_e = \frac{p_1 \cdot v_1}{k-1} \left[ \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^{(1-k)} - 1 \right].$

$$\text{Ou : } w_e = \frac{r \cdot T_1}{k-1} \left[ \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^{(1-k)} - 1 \right].$$

$$\text{Ou : } w_e = \frac{p_2 \cdot v_2 - p_1 \cdot v_1}{k-1}.$$

## III - Quelle est la nature du fluide qui subit l'évolution ?

- Gaz :** Idéal : (Parfait à  $\gamma = \text{cst}$ )

$r ; \gamma ; C_p ; C_v \rightarrow$  Table A.8.

$$r = C_p - C_v.$$

$$\gamma = C_p / C_v.$$

$$r = C_p \cdot ((\gamma - 1) / \gamma).$$

Equation d'état :  $p \cdot v = r \cdot T$

Fonctions d'état :  $\Delta u = C_v \cdot \Delta t.$

$$\Delta h = C_p \cdot \Delta t.$$

$$\Delta s = C_p \cdot \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right) - r \cdot \ln \left( \frac{p_2}{p_1} \right).$$

$$\Delta s = C_v \cdot \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right) + r \cdot \ln \left( \frac{v_2}{v_1} \right).$$

Réel ou Vapeur :  $u, h, s$  lus dans les tables ou diagrammes.

- Liquide :** Incompressible :  $v = \text{cste} \forall p.$   $\Delta u = \Delta h = C \cdot \Delta T$  avec  $C \rightarrow$  A.7.  $\Delta s = C \cdot \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right).$   
( $v$  ne dépend que de  $T$ ). ( $h = C \cdot T$ ).

**Ou bien** :  $u, h, s, v$  ne dépendent que de  $T \rightarrow$  lus dans les tables liquide saturé à  $T$ .

**Exception** : Cas des pompes où  $\Delta h = v \cdot \Delta p.$

- Mél. LV :**  $x = \frac{v_{\text{mél}} - v_L}{v_v - v_L} = \frac{q_{mv}}{q_m(L+v)}$

$\rightarrow$

$$\begin{cases} u = (1-x) \cdot u_L + x \cdot u_v \\ h = (1-x) \cdot h_L + x \cdot h_v \\ s = (1-x) \cdot s_L + x \cdot s_v \\ v = (1-x) \cdot v_L + x \cdot v_v \end{cases}$$

$\left\{ \begin{array}{l} \text{Avec } u, h, s, v, \text{ lus dans les tables de} \\ \text{saturation.} \\ \text{Ou bien } u, h, s, v, \text{ lus directement dans un} \\ \text{diagramme.} \end{array} \right\}$

## IV - Deuxième principe :

$$\mathbf{Tds = \delta q_e + \delta q_{\text{int}}}$$

(avec  $\delta q_{\text{int}} > 0$ ) ;

si évolution réversible :  $\delta q_{\text{int}} = 0 \rightarrow Q_e = \int Tds.$

Identités thermodynamiques :

$$h = u + p \cdot v.$$

$$Tds = du + p \cdot dv.$$

$$Tds = dh - v \cdot dp.$$

# METHODE D'ANALYSE D'UN PROBLEME DE THERMODYNAMIQUE

## \* Complément d'informations :

- Cas d'une évolution polytropique réversible en système fermé :**

$$p \cdot v^k = \text{cste et } w_e = - \int p \cdot dv$$

$$w_e = \frac{p_2 \cdot v_2 - p_1 \cdot v_1}{k-1} = \frac{p_1 \cdot v_1}{k-1} \left[ \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^{(1-k)} - 1 \right]$$

- Cas d'une évolution isentropique (adiabatique réversible d'un gaz parfait) :**  $p \cdot v^\gamma = \text{cste}$  et  $p \cdot v = r \cdot T$

$$\left. \begin{array}{l} p_1 \cdot v_1^\gamma = p_2 \cdot v_2^\gamma \\ p_1 \cdot v_1 = r \cdot T_1 \\ p_2 \cdot v_2 = r \cdot T_2 \end{array} \right\} \rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{\gamma-1} ; \quad \frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^\gamma = \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (\text{Avec } p \text{ en pressions absolues}).$$

$$T_2 = T_1 \cdot \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} ; \quad p_2 = p_1 \cdot \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^\gamma ; \quad T_2 = T_1 \cdot \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{\gamma-1} ; \quad p_2 = p_1 \cdot \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} .$$

On retrouve les mêmes expressions avec  $k$  au lieu de  $\gamma$  pour une évolution polytropique d'un gaz parfait.

- Éléments dans lesquels l'évolution est supposée adiabatique :**  $q_e = 0$  :

Vanne de détente :

Pompe :

Compresseur centrifuge :

Compresseur à piston :

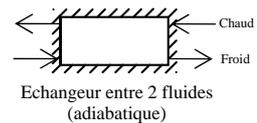
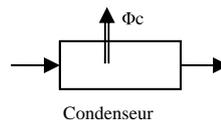
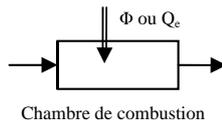
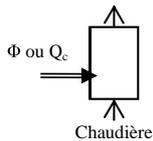
Turbine :   
(Idéal : Isentropique)

Mélangeur, échangeur isolé :

Tuyère :   
(Enthalpie transformée en énergie cinétique)

- Éléments dans lesquels il n'y a pas de partie mobile :**  $w_i = 0$  :

Vanne de détente ; Tuyère ; Mélangeur ; Echangeur (condenseur, évaporateur, réchauffeur, chaudière, chambre de combustion...)



## V - Loi des gaz parfaits : $p \cdot v = r \cdot T$ :

$p \cdot v = r \cdot T$  avec  $r = \frac{R}{M}$  où  $R = 8.32 \text{ J/Kg} \cdot \text{°K}$  et  $M$  : Masse molaire en  $\text{Kg/mol}$  ;  $\rho = \frac{1}{v}$  donc  $\rho = \frac{p}{r \cdot T}$  .

$$C_v = \frac{r}{\gamma-1} ; \quad C_p = \frac{\gamma \cdot r}{\gamma-1}$$

$\left. \begin{array}{l} p \cdot v \cdot m = m \cdot r \cdot T \\ p \cdot V = m \cdot r \cdot T \\ v \cdot m = V \end{array} \right\} \text{ Voir ci-dessous !}$
--

$\begin{aligned} r_{\text{Air}} : M_{\text{Air}} &= 79\% \text{ N}_2 + 21\% \text{ O}_2 \quad (\rightarrow \text{Tableau périodique}) \\ &= 0.79 \times M_{\text{N}_2} + 0.21 \times M_{\text{O}_2} \\ &= 0.79 \times (2 \times 14) + 0.21 \times (2 \times 16) = 28.8 \text{ g/mol} \\ r_{\text{Air}} &= R/M_{\text{Air}} \Rightarrow r_{\text{Air}} = 287 \text{ J/Kg} \cdot \text{°K} \end{aligned}$
---

$$\left. \begin{array}{l} p_1 \cdot v_1 = r \cdot T_1 \\ p_2 \cdot v_2 = r \cdot T_2 \end{array} \right\} \frac{p_1 \cdot v_1}{p_2 \cdot v_2} = \frac{r \cdot T_1}{r \cdot T_2} \left\} \frac{p_1 \cdot v_1}{p_2 \cdot v_2} = \frac{T_1}{T_2} \right\} ; \quad \frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2} \times \frac{p_2}{p_1} \text{ avec } \frac{p_2}{p_1} = 1 \text{ si évolution isobare ; } \frac{v_2}{v_1} = \frac{\rho_1}{\rho_2} .$$

## VI - Grandeurs intensives et extensives :

$p$  et  $T$  sont des grandeurs intensives.  
 $U, H, S, V$  sont des grandeurs extensives.

Et  $\frac{U}{m} = u$  devient intensive !  $u, h, s, v$  sont alors intensives (massiques) lorsqu'ils sont divisés par une masse  $m$ .

## VII - Variables d'état et fonctions d'état :

Variables d'état :  $p ; v ; T$   
Fonctions d'état :  $u ; h ; s$

