

Chapitre IV

Premier principe de la thermodynamique

IV.1 Introduction

Le premier principe de la thermodynamique est souvent appelé le principe de la conservation de l'énergie et, comme nous le constatons plus tard cela est tout à fait vrai. Notre cheminement sera d'établir ce principe d'abord pour un système subissant un cycle et, ensuite pour un système subissant un changement d'état. Enfin le premier principe de la thermodynamique sera appliqué à un volume de contrôle. Le principe de la conservation de la masse sera aussi étudié dans ce chapitre.

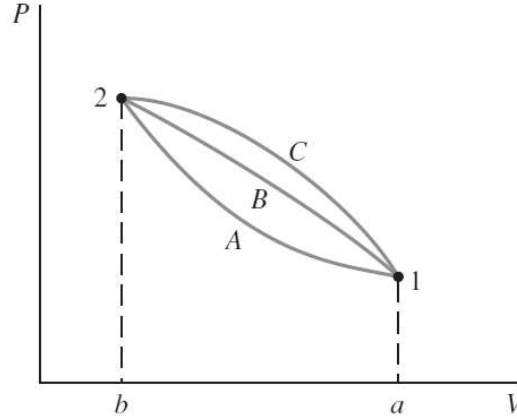
IV.2 Énoncé du premier principe pour un système qui subit un cycle

Le premier principe de la thermodynamique stipule, que pendant tout cycle que subit un système, l'intégrale du contour fermé de la chaleur est proportionnelle à l'intégrale du contour fermé du travail (Pendant tout cycle que subit un système, l'échange de chaleur net est égal au travail net échangé au cours de ce cycle).

$$\oint \delta Q = \oint \delta W \quad (IV.1)$$

IV.3 Le premier principe d'un système fermé subissant un changement d'état

Considérons un système subissant un cycle constitué, de deux évolutions (A) et (B).



Appliquons le premier principe pour ce cycle :

$$\oint \delta Q = \oint \delta W \Leftrightarrow \int_{1A}^{2A} \delta Q + \int_{2B}^{1B} \delta Q = \int_{1A}^{2A} \delta W + \int_{2B}^{1B} \delta W \quad (\text{IV.2})$$

Considérons un autre cycle constitué de la même évolution A et d'une autre évolution (C).

Appliquons le premier principe pour ce cycle

$$\oint \delta Q = \oint \delta W \Leftrightarrow \int_{1A}^{2A} \delta Q + \int_{2C}^{1C} \delta Q = \int_{1A}^{2A} \delta W + \int_{2C}^{1C} \delta W \quad (\text{IV.3})$$

(IV.3) - (IV.2) :

$$\int_{2C}^{1C} \delta Q - \int_{2B}^{1B} \delta Q = \int_{2C}^{1C} \delta W - \int_{2B}^{1B} \delta W \Leftrightarrow \int_{2C}^{1C} (\underbrace{\delta Q - \delta W}_{=dE}) = \int_{2B}^{1B} (\underbrace{\delta Q - \delta W}_{=dE}) \quad (\text{IV.4})$$

Puisque (B) et (C) représentent les évolutions arbitraires entre les états (1) et (2), donc la quantité $(\delta Q - \delta W)$ est la même pour toutes les évolutions entre les états (1) et (2). Par conséquent la quantité $(\delta Q - \delta W)$ dépend seulement de l'état initial et final et non pas du chemin suivi entre les deux états, d'où on va associer la quantité $(\delta Q - \delta W)$ à une différentielle d'une variable d'état, où cette variable est l'énergie du système qu'on lui attribue le symbole E :

$$\delta Q - \delta W = dE \Leftrightarrow \delta Q = dE + \delta W$$

E : l'énergie du système (**variable d'état**) [J]

$$\int_1^2 \delta Q = \int_1^2 dE + \int_1^2 \delta W \Leftrightarrow Q_{1 \rightarrow 2} = E_2 - E_1 + W_{1 \rightarrow 2} \quad (\text{Dans le cas d'un système fermé})$$

Ou : $(Q_{1 \rightarrow 2} = E_2 - E_1 + W_{1 \rightarrow 2})$

E_1 : l'énergie du système à l'état (1).

E_2 : l'énergie du système à l'état (2).

Dans un état donné l'énergie d'un système se présente sous trois formes :

L'énergie du système (E) = l'énergie interne (U) + l'énergie cinétique (Ec) + l'énergie potentielle (Ep)

D'où : $E = U + Ec + Ep \quad [J]$

L'énergie interne : c'est la somme des énergies microscopiques du système (énergie de vibration des atomes), c'est-à-dire son énergie propre.

La forme différentielle du premier principe :

$$\delta Q = dU + dEc + dEp + \delta W \quad (\text{IV.5})$$

En intégrant entre deux états :

$$Q_{1 \rightarrow 2} = \underbrace{(U_2 - U_1)}_{=\Delta U} + \underbrace{\frac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2)}_{=\Delta Ec} + \underbrace{m \cdot g(z_2 - z_1)}_{=\Delta Ep} + W_{1 \rightarrow 2} \quad (\text{IV.6})$$

Le changement net d'énergie d'un système est toujours égal au transfert d'énergie à travers les frontières du système sous forme de travail et de chaleur.

Remarque :

Si ΔEc et ΔEp sont négligeables devant ΔU :

$$Q_{1 \rightarrow 2} = U_2 - U_1 + W_{1 \rightarrow 2}$$

$$u = \frac{U}{m} \left[\frac{J}{kg} \right] : \text{L'énergie interne massique (L'énergie interne spécifique)}$$

D'où :

$$q_{1 \rightarrow 2} = u_2 - u_1 + w_{1 \rightarrow 2}$$

Pour un mélange liquide-vapeur ayant un titre (x) à une pression (P) ou bien à une température (T) :

$$U = U_{liq} + U_{vap}$$

$$U = U_{liq} + U_{vap} \Leftrightarrow m u \left(\frac{1}{m} \right) = (m_f u_f + m_g u_g) \left(\frac{1}{m} \right)$$

$$\Leftrightarrow u = \frac{m_f}{m} u_f + \frac{m_g}{m} u_g \quad \text{Avec : } m_f = m - m_g$$

$$\Leftrightarrow u = \frac{m - m_g}{m} u_f + \frac{m_g}{m} u_g$$

$$\Leftrightarrow v = 1 - \underbrace{\frac{m_g}{m}}_{=x} v_f + \underbrace{\frac{m_g}{m}}_{=x} v_g$$

$$\Leftrightarrow u = (1-x) u_f + x u_g$$

$$\Leftrightarrow u = u_f + x \underbrace{(u_g - u_f)}_{=u_{fg}}$$

$$\Leftrightarrow u = u_f + x u_{fg}$$

u_f : L'énergie interne massique du liquide saturé (L'énergie interne spécifique liq-sat)

u_g : L'énergie interne massique de la vapeur saturée (L'énergie interne spécifique avp-sat)

Exemple 1 :

Considérons de l'air contenu (renfermé) dans un vérin constitué d'un cylindre et d'un piston, où la variation de l'énergie interne est de 16 kJ, et le travail nécessaire pour comprimer cet air est de 300 kJ.

- Déterminer la quantité de la chaleur échangée au cours de ce processus

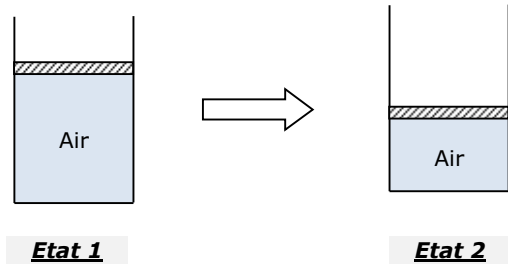
Résolution de l'exercice 1:

$$Q_{1-2} = (U_2 - U_1) + W_{1-2} \Leftrightarrow Q_{1-2} = \Delta U + \underbrace{W_{1-2}}_{\text{reçoit} \Rightarrow < 0}$$

AN :

$$Q_{1-2} = \Delta U + W_{1-2} \Leftrightarrow Q_{1-2} = 16 + (-300)$$

$$= -284 \text{ kJ } (< 0 \Rightarrow \text{cède de la chaleur})$$



Donc :

dans le cas où : $W_{12} = 300 \text{ kJ}$, $Q_{12} = 284$ et $\Delta U = ?$

$$Q_{12} = \Delta U + W_{12} \Leftrightarrow \Delta U = Q_{12} - W_{12} = -284 - (-300) = 16$$

- Le système cède de l'énergie $\Leftrightarrow W > 0$, $Q < 0$
- Le système reçoit de l'énergie $\Leftrightarrow W < 0$, $Q > 0$

Exemple 2 :

Un cycle de réfrigération reçoit 400 kJ de chaleur d'une source de chaleur, et rejette 500 kJ de chaleur dans un puits de chaleur. Le travail reçu est 100 kJ.

- Vérifier si le fonctionnement de cycle est conforme au premier principe (ou pas).

Résolution de l'exercice 2:

Il s'agit d'un cycle

Vérifions la conformité de ce cycle au premier principe.

$$Q_{1-2} = (U_2 - U_1) + W_{1-2} \Leftrightarrow Q_{1-2} = \Delta U + \underbrace{W_{1-2}}_{\text{reçoit} \Rightarrow < 0}$$

L'échange de chaleur net :

$$Q_{12} = \oint \delta Q = 400 - 500 \\ = -100 \text{ kJ}$$

Le travail net :

$$W_{1-2} = -100 \text{ kJ}$$

Exemple 3 :

Un réservoir rigide (qui ne se déforme pas) contient initialement 1 m³ de la vapeur d'eau saturée à 200 °C. Suite à un transfert de chaleur vers le milieu extérieur, la température a chuté jusqu'à 100 °C

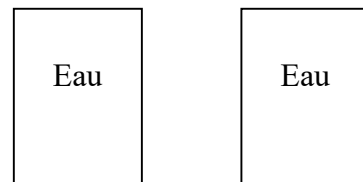
- Calculer la quantité de chaleur transférée.

Résolution de l'exercice 3:

$$Q_{1-2} = \underbrace{(U_2 - U_1)}_{\Delta U} + \underbrace{\frac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2)}_{\Delta Ec=0} + \underbrace{m \cdot g(z_2 - z_1)}_{\Delta Ep=0} + \underbrace{W_{1-2}}_{=0}$$

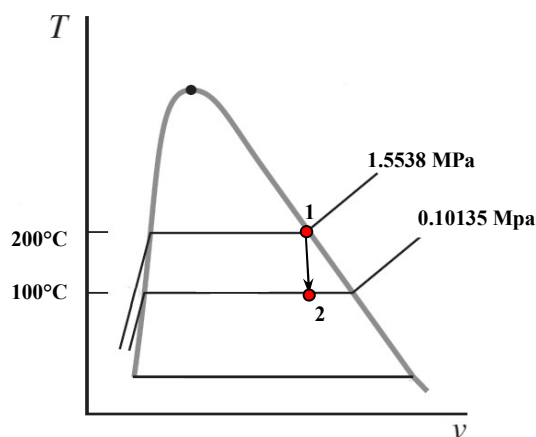
$$Q_{1-2} = U_2 - U_1$$

$$Q_{1-2} = m(u_2 - u_1)$$



Etat 1
V₁=1 m³
T₁=200°C

Etat 2
V₂=1 m³
T₂=100°C



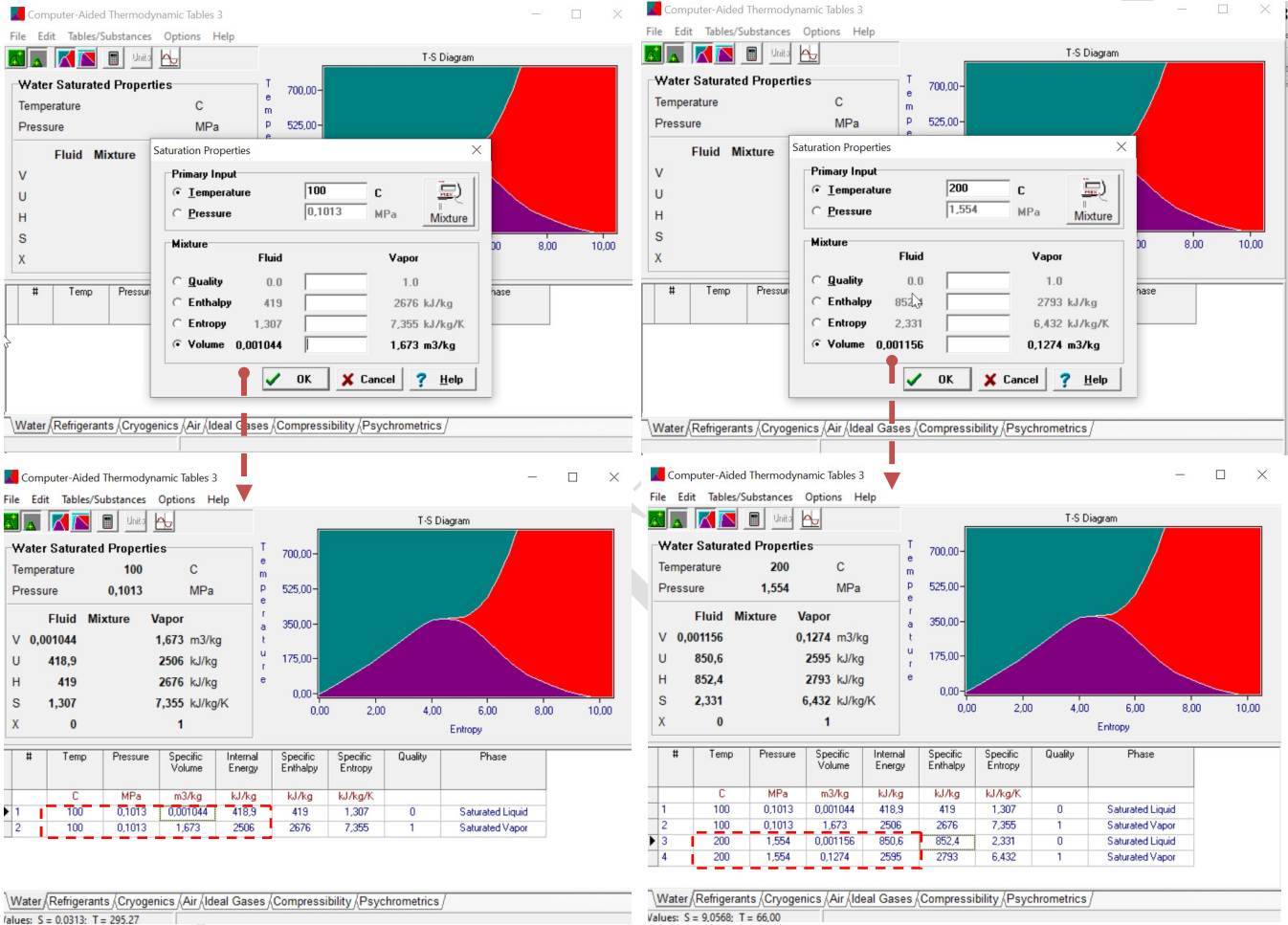
Des tables thermodynamiques

Vapeur saturée: table de la température

2

Temp. °C T	Pres. kPa P	Volume massique m^3/kg		Énergie interne kJ/kg			Enthalpie kJ/kg		Entropie $kJ/kg \cdot K$		
		Liquide sat. v_f	Vapeur sat. v_g	Liquide sat. u_f	Évap. u_{fg}	Vapeur sat. u_g	Liquide sat. h_f	Évap. h_{fg}	Liquide sat. s_f	Évap. s_{fg}	Vapeur sat. s_g
100	0.10135	0.001044	1.6729	418.94	2087.6	2506.5	419.04	2257.0	1.3069	6.0480	7.3549
200	1.5538	0.001157	0.12736	850.65	1744.7	2595.3	852.45	1940.7	2.3309	4.1014	6.4323

Ou bien du logiciel de thermodynamique *computer aided thermodynamic* :



Etat 2 :

$$V_2 = 1 \text{ m}^3$$

$$T_2 = 100^\circ\text{C}$$

$$v_{f2} = 0.001044 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_{g2} = 1.6729 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$u_{f2} = 418.94 \text{ J/kg}$$

$$u_{fg2} = 2087.64 \text{ J/kg}$$

$$u_{g2} = 2506.5 \text{ J/kg}$$

$$v_2 = v_1 = v_{g2} = 0.12736 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Etat 1:

$$V_1 = 1 \text{ m}^3$$

$$T_1 = 200^\circ\text{C}$$

$$v_{f1} = 0.001157 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_{g1} = 0.12736 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$u_{f1} = 850.65 \text{ J/kg}$$

$$u_{fg1} = 1744.7 \text{ J/kg}$$

$$u_{g1} = 2595.3 \text{ J/kg}$$

$$m = \frac{V}{v} = \frac{1}{0.12736} = 7.852 \text{ kg}$$

$$u_1 = u_{g1} = 2595.3 \text{ J/kg}$$

Définition du titre x à l'état 2 :

$$x = \frac{v - v_{f2}}{v_{g2} - v_{f2}} = \frac{v - v_{f2}}{v_{fg2}} = \frac{0.12736 - 0.001044}{1.6729 - 0.001044} = 0.0755$$

$$u_2 = u_{f2} + x(u_{g2} - u_{f2}) = 576.66 \text{ kJ}$$

$Q_{1-2} = m(u_2 - u_1) = 7.852(576.66 - 2595.3) = -15850.36 \text{ kJ} < 0 \Rightarrow$ **Le système cède de l'énergie (de la chaleur)**

- **Le système cède de l'énergie $\Rightarrow W > 0$, $Q < 0$**
- **Le système reçoit de l'énergie $\Rightarrow W < 0$, $Q > 0$**

IV.4 Définition de la variable thermodynamique enthalpie

Par définition; l'enthalpie est la variable thermodynamique défini par :

$$H = P \cdot V + U \quad \text{l'unité est le joule [J]}$$

L'enthalpie (H), l'énergie interne (U), la pression (P) et le volume (V) sont des variables d'état.

Si m est la masse du système $h = \frac{H}{m} \Leftrightarrow h = \frac{H}{m} = u + P \cdot v$ l'unité est $\left[\frac{J}{kg} \right]$ (IV.7)

Pour une substance qui se trouve dans un état de mélange liquide vapeur ayant un titre x une pression P , on a:

$$h = h_f + x(h_g - h_f) = h_f + x \cdot h_{fg} \quad (IV.8)$$

Avec :

h_g : enthalpie spécifique du liquide saturée à la pression P .

h_f : enthalpie spécifique de la vapeur saturée à la pression P .

h_g et h_f sont définis dans les tables de la thermodynamique

On aussi :

$$h_f = u_f + P \cdot v_f \quad (IV.9.a)$$

$$h_g = u_g + P \cdot v_g \quad (IV.9.b)$$

Pour certaines substances dans les tables thermodynamique l'énergie interne n'est pas donner (fourni) celle-ci devra-t-être calculer à partir de l'équation suivante :

$$u = h - P \cdot v \quad (IV.10)$$

Dans la région du liquide comprimé on confond toutes les variables d'état v , u et h avec celles du liquide saturé à la même température.

Exemple :

H₂O ($P=100 \text{ kPa}$, $T=25^\circ\text{C}$) **liquide comprimé :**

$$\begin{cases} 100 \text{ kPa} \\ 25^\circ\text{C} \end{cases} \Rightarrow v = v_{f, 25^\circ\text{C}}, \quad u = u_{f, 25^\circ\text{C}}, \quad h = h_{f, 25^\circ\text{C}}$$

IV.5 Définition de la chaleur spécifique à volume constant et à chaleur spécifique à pression constante

IV.5.a Chaleur spécifique à volume constant C_v

$$C_v = \left(\frac{\delta q}{\delta T} \right)_v \rightarrow \text{Volume constant}$$

On sait qu'à **volume constant** $\delta q = du$ car $\delta w = 0$ est une variable d'état, donc elle est fonction de deux autres variables T et u où $u = u(T, v)$.

$$C_v = \left(\frac{\delta q}{\delta T} \right)_v \Rightarrow C_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v$$

$$\begin{aligned} \delta q &= \delta u + \underbrace{\delta w}_{=0} \Leftrightarrow \delta q = \delta u + \underbrace{P \cdot \underbrace{dv}_{=0}}_{=0} \\ &\Leftrightarrow \delta q = du \end{aligned}$$

IV.5.2 Chaleur spécifique à pression constante C_p

$$C_p = \left(\frac{\delta q}{\delta T} \right)_p \rightarrow \text{Pression constante}$$

Comme la **pression est constante** donc $\delta q = dh$

h est une **variable d'état**

C_p et C_v sont des **variables d'état** $h = h(T, P)$.

$$C_p = \left(\frac{\delta q}{\delta T} \right)_p \Rightarrow C_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$$

$$\begin{aligned} \delta q &= \delta u + \delta w \Leftrightarrow \delta q = \underbrace{\delta u + P \cdot dv}_{=dh} \\ &\Leftrightarrow \delta q = dh \end{aligned}$$

IV.6 Relations approchées pour les solides et les liquides

À cause de la faible compressibilité des solides et des liquides : $v = f_T(P) = cte$

Aussi à cause de la faible dilatation thermique des solides et des liquides : $v = f_P(T) = cte$

On admet que : $C_p = C_v = C$

IV.6.a Énergie interne

$$C_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v = \frac{du}{dT} \Leftrightarrow du = C_v \cdot dT \Leftrightarrow du = C \cdot dT$$

IV.6.b Enthalpie

$$h = u + P \cdot v \Leftrightarrow dh = du + \underbrace{P \cdot dv}_{=0} + v \cdot dP$$

Pour les solides et les liquides qui sont considérés comme incompressibles (la variation du volume est infinitésimale) la variation du volume est nul ($dv=0$)

$$dh = \underbrace{du}_{=C \cdot dT} + v \cdot dP \Leftrightarrow dh = C \cdot dT + v \cdot dP$$

Pour les évolutions à **pression constante (P=cte)**

$$h = u + P \cdot v \Leftrightarrow h = u + P \cdot v$$

$$dh = du = C \cdot dT$$

$$dH = dU = m \cdot C \cdot dT$$

IV.7 Énergie interne enthalpie et chaleur spécifique des gaz parfaits

Ce sont tous les gaz qui obéissent à la loi $P \cdot v = R \cdot T$ les expériences de Guy Lussac et de Joule ont mis en évidence que pour les gaz parfait l'énergie interne ne dépend que de la température $u=u(T)$ (*dépend uniquement de la température*)

IV.7.a Énergie interne des gaz parfaits

$$C_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v = \frac{du}{dT}$$

$$du = C_v \cdot dT \quad \text{et} \quad dU = m \cdot C_v \cdot dT \quad \text{ces équations ne sont valables que dans le cas des gaz parfaits}$$

$$u_2 - u_1 = \int_1^2 C_v \cdot dT = C_v (T_2 - T_1)$$

IV.7.b Enthalpie des gaz parfait

$$h = u + P \cdot v \quad \text{Avec : } P \cdot v = R \cdot T$$

$$= u + R \cdot T$$

Comme $u=u(T)$; donc l'enthalpie des gaz parfaits ne dépend que de la température soit $h=h(T)$.

$$C_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p = \frac{dh}{dT}$$

$$dh = C_p \cdot dT \quad \text{et} \quad dH = m \cdot C_p \cdot dT \quad \text{ces équations ne sont valables que dans le cas des gaz parfaits}$$

$$h_2 - h_1 = \int_1^2 C_p \cdot dT = C_p (T_2 - T_1)$$

Avec :

$$C_p - C_v = R$$

IV.7.c Chaleur spécifique des gaz parfaits

Puisque l'énergie interne et l'enthalpie des gaz parfaits ne dépend que de la température, les chaleurs spécifique (les chaleurs massique) à volume constant et à pression constante ne dépend que de la température :

$$C_v = C_v(T) \text{ et } C_p = C_p(T)$$

IV.8 L'équation du premier principe rapporté au temps pour les systèmes

fermés (Le premier principe sous la forme d'une équation rapportée au temps)

Souvent en thermodynamique on s'intéresse d'une part au taux instantané avec lequel l'énergie traverse les limites du système sous forme de chaleur et du travail et d'autre part sous la forme du taux avec lequel l'énergie d'un système change.

Considérons un intervalle de temps, avec lequel une certaine quantité de chaleur δQ et un certain travail δW sont échangés avec le milieu extérieur et supposons aussi que pendant cet intervalle l'énergie du système change de δE .

$$\delta Q = \Delta E + \delta W \quad (\delta Q \text{ est une variable d'état})$$

Division cette expression par Δt (quand : $\Delta t \rightarrow 0$) :

$$\frac{\delta Q}{\Delta t} = \frac{\Delta E}{\Delta t} + \frac{\delta W}{\Delta t}$$

Avec :

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\delta Q}{\Delta t} = \dot{Q}$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{dE}{dt}$$

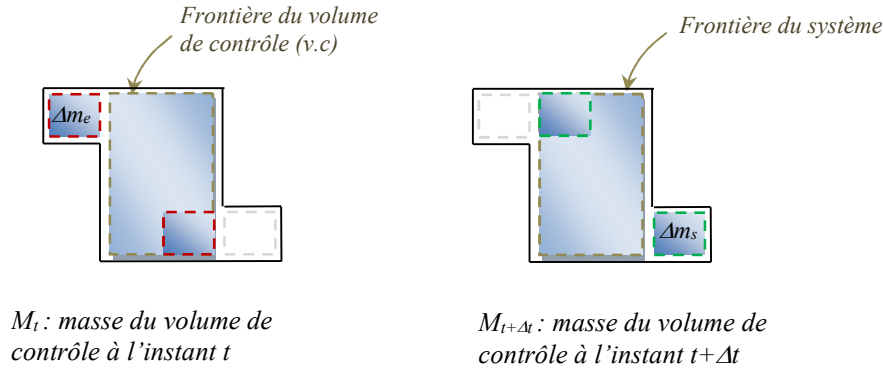
$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\delta W}{\Delta t} = \dot{W}$$

$$\Leftrightarrow \dot{Q} = \frac{dE}{dt} + \dot{W}$$

IV.9 Équation de la conservation de la masse pour les systèmes ouverts volume

de contrôle (le premier principe de la conservation de la masse)

$$\left(\begin{array}{c} \text{La masse entrante dans} \\ \text{le volume de contrôle} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{la masse sortante du} \\ \text{volume de contrôle} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{l'accumulation de la masse à} \\ \text{l'intérieur du volume de contrôle} \end{array} \right)$$



Principe de la conservation de la masse appliquée au volume de contrôle :

$$\Delta m_e - \Delta m_s = m_{t+\Delta t} - m_t$$

Devisons par Δt :

$$\frac{\Delta m_e}{\Delta t} - \frac{\Delta m_s}{\Delta t} = \frac{m_{t+\Delta t} - m_t}{\Delta t}$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta m_e}{\Delta t} = \dot{m}_e$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta m_s}{\Delta t} = \dot{m}_s$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{m_{t+\Delta t} - m_t}{\Delta t} = \frac{dm_{v.c.}}{dt}$$

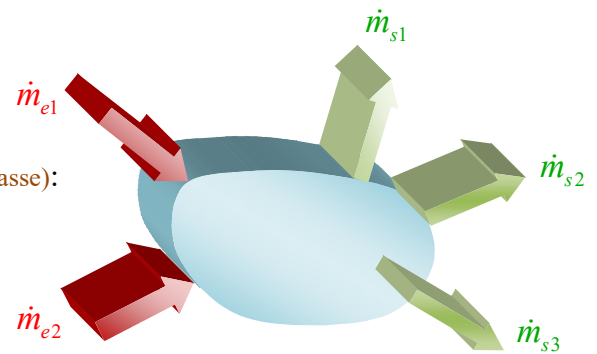
$$\dot{m}_e - \dot{m}_s = \frac{dm_{v.c.}}{dt}$$

e : entrée
 s : sortie
 $v.c.$: volume de contrôle

Dans le cas de plusieurs écoulements (conservation de la masse):

$$\sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s = \frac{dm_{v.c.}}{dt}$$

$$(\dot{m}_{e1} + \dot{m}_{e2}) - (\dot{m}_{s1} + \dot{m}_{s2}) = \frac{dm_{v.c.}}{dt}$$



Remarque :

Expression du débit en fonction des variables d'état

$$m = \int \rho \cdot \vec{V} \cdot d\vec{A}$$

$\vec{V}$: Vecteur vitesse

$$m = \rho \cdot V \cdot A$$

V : vitesse de l'écoulement

A : Section

$V \cdot A$: Débit

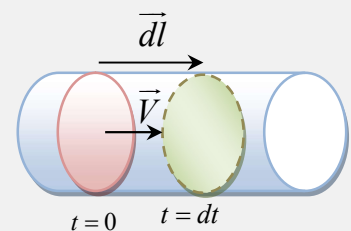
Rappel du débit :

$$Q = \frac{dV}{dt} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

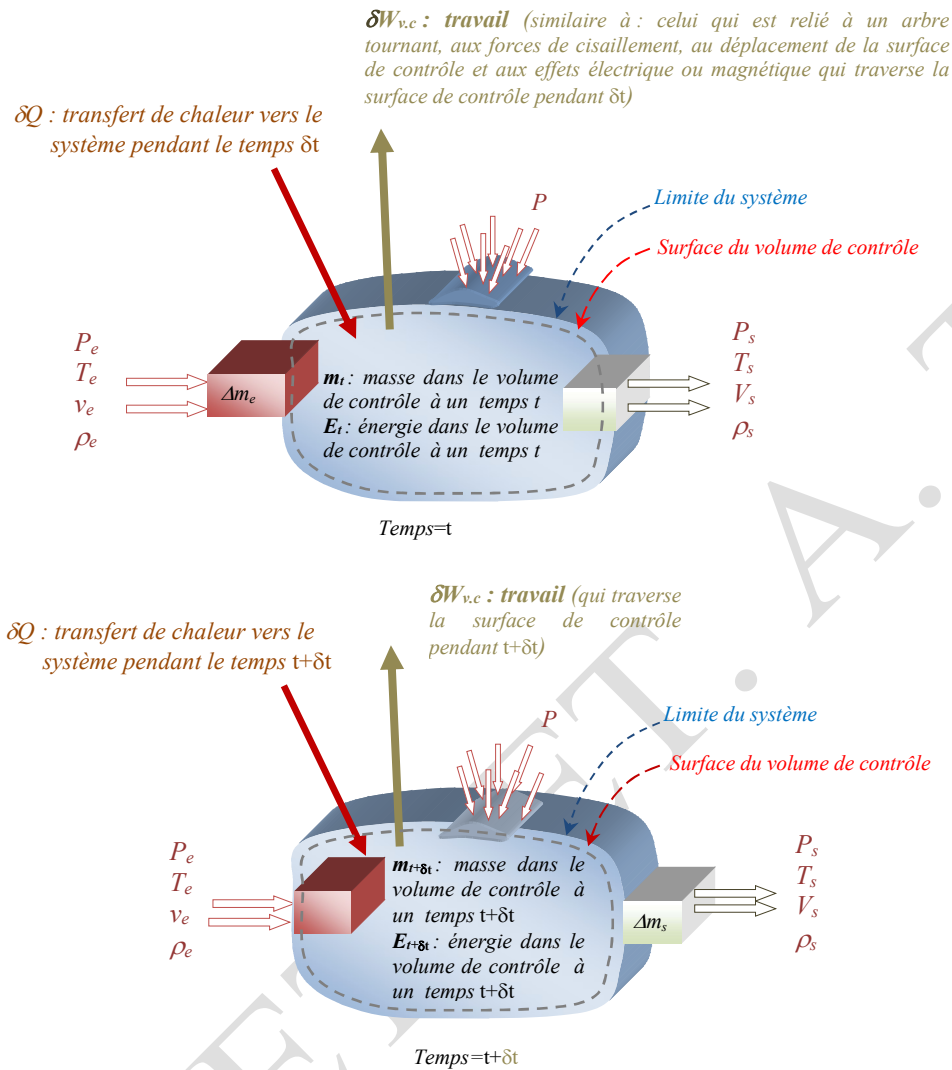
$$Q = \frac{A \cdot dl}{dt} \text{ avec : } dl = V \cdot dt$$

$$Q = \frac{\text{surface}}{A} \cdot \frac{\text{vitesse}}{\vec{V}} \cdot \frac{dt}{dt}$$

$$Q = A \cdot V$$



IV.9.a Le premier principe pour les systèmes ouverts (volume de contrôle)



Appliquons le premier principe au système entre l'instant t à l'état (1) et à l'instant $t + \Delta t$

$$\delta Q = E_2 - E_1 + W_{1-2}$$

E_1 : Énergie du système (dans les frontières) à l'instant t .

$$E_1 = E_t + e_e \cdot \Delta m_e$$

E_2 : Énergie du système à $t + \Delta t$

$$E_2 = E_{t+\Delta t} + e_s \cdot \Delta m_s$$

$$\text{Énergie massique: } e = \frac{E}{m}$$

D'où :

$$E_2 - E_1 = (E_{t+\Delta t} - E_t) + (e_s \cdot \Delta m_s - e_e \cdot \Delta m_e)$$

L'expression $(e_s \cdot \Delta m_s - e_e \cdot \Delta m_e)$ représente le débit net d'énergie qui traverse la surface de contrôle pendant δt .

$W_{l-2} = \delta W_{v-c} + \text{travail nécessaire pour introduire } \Delta m_e \text{ à l'intérieur du v.c} + \text{travail nécessaire pour}$
extraire Δm_s du v.c.

$$\delta W_e = -P_e A \Delta x$$

$$= -P_e \Delta V_e$$

On a :

$$p = \frac{F}{A}$$

$$W = F \cdot dx = P \cdot A \cdot dx$$

$\delta W_e = -P_e \Delta m_e v_e$ (le travail nécessaire pour introduire Δm_e à l'intérieur du volume du contrôle)
(du travail est reçu par le système $\delta W_e < 0$)

$\delta W_s = P_s \Delta m_s v_s$ (le travail nécessaire pour extraire Δm_s à l'intérieur du volume du contrôle)
(du travail est reçu par le système $\delta W_e > 0$)

$$W_{l-2} = \delta W_{v-c} + P_s \Delta m_s v_s - P_e \Delta m_e v_e$$

$$\begin{aligned} \delta Q &= E_{t+\Delta t} - E_t + e_s \cdot \Delta m_s - e_e \cdot \Delta m_e + P_s \Delta m_s v_s - P_e \Delta m_e v_e + \delta W_{v-c} \\ &= E_{t+\Delta t} - E_t + \Delta m_s (e_s + P_s v_s) - \Delta m_e (e_e + P_e v_e) + \delta W_{v-c} \\ &= E_{t+\Delta t} - E_t + \Delta m_s \left(u_s + \frac{1}{2} v_s^2 + g Z_s + P_s v_s \right) - \Delta m_e \left(u_e + \frac{1}{2} v_e^2 + g Z_e + P_e v_e \right) + \delta W_{v-c} \end{aligned}$$

$$\text{Avec : } h = u + P \cdot v$$

D'où :

$$\delta Q = E_{t+\Delta t} - E_t + \Delta m_s \left(h_s + \frac{1}{2} v_s^2 + g Z_s \right) - \Delta m_e \left(h_e + \frac{1}{2} v_e^2 + g Z_e \right) + \delta W_{v-c}$$

Pour déterminer cette expression dans le temps on la divise par Δt et on calcule sa limite quand Δt tend vers 0 ($\Delta t \rightarrow 0$) :

$$\delta Q = +\Delta m_s \left(h_s + \frac{1}{2} v_s^2 + g Z_s \right) - \Delta m_e \left(h_e + \frac{1}{2} v_e^2 + g Z_e \right) + \delta W_{v-c}$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{E_{t+\Delta t} - E_t}{\Delta t} = \frac{dE_{v-c}}{dt}$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta m_s}{\Delta t} = \dot{m}_s$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\delta W_{v-c}}{\Delta t} = \dot{W}_{v-c}$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\delta Q_{v-c}}{\Delta t} = \dot{Q}_{v-c}$$

$$\dot{Q}_{v-c} + \dot{m}_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + g Z_e \right) = \frac{dE_{v-c}}{dt} + \dot{m}_s \left(h_s + \frac{v_s^2}{2} + g Z_s \right) + \dot{W}_{v-c}$$

Pour plusieurs écoulements entrant et plusieurs écoulements sortant :

$$\dot{Q}_{v-c} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + g Z_e \right) = \frac{dE_{v-c}}{dt} + \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{v_s^2}{2} + g Z_s \right) + \dot{W}_{v-c}$$

$$\left(\begin{array}{c} \text{le taux} \\ \text{de chaleur} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{le débit de l'énergie} \\ \text{entrant dans le} \\ \text{volume de contrôle} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{la variation de l'énergie} \\ \text{du volume de contrôle} \\ \text{par unité de temps} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{le débit d'énergie} \\ \text{sortant du volume} \\ \text{de contrôle} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{le travail} \\ \text{du volume} \\ \text{de contrôle} \end{array} \right)$$

Ou bien,

Cette expression indique que le taux de chaleur et le débit de l'énergie entrant dans le volume de contrôle sont égaux à la variation de l'énergie du volume de contrôle par unité de temps et le débit d'énergie sortant du volume de contrôle et le travail du volume de contrôle

Remarque 1 :

$$\frac{dE_{v-c}}{dt} : \text{représente l'énergie du système entre } t \text{ et } \Delta t$$

Dans le cas de la *conservation de la masse* on a : $\sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s = \frac{dm_{v-c}}{dt}$

Remarque 2 :

S'il n'y a aucun écoulement entrant et aucun écoulement sortant, l'équation s'écrit comme suit :

$$\dot{Q}_{v-c} = \frac{dE_{v-c}}{dt} + \dot{W}_{v-c}$$

C'est l'équation du premier principe pour les systèmes fermée par unité de temps.

IV.10 le premier principe pour les écoulements en régime permanent (EPR)

Hypothèses :

- 1) les taux avec lesquels la chaleur et le travail traverse, la surface de contrôle sont constante ($\dot{Q}_{v-c} = cte$ et $\dot{W}_{v-c} = cte$),
 - les vitesses et les états des écoulements traversant la surface de contrôle sont constante,
 - les débits entrants sont égaux aux débits sortants,
 - les propriétés et les états à l'intérieur du volume de contrôle ne varient pas dans le temps,

Équation de la conservation de la masse pour les **(ERP)** :

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s$$

Équation du premier principe pour les **ERP**:

$$\dot{Q}_{v-c} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + g Z_e \right) = \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{v_s^2}{2} + g Z_s \right) + \dot{W}_{v-c} + \frac{dE_{v-c}}{dt}$$

$\frac{dE_{v-c}}{dt}$: L'énergie du système entre t et Δt

$$\dot{Q}_{v-c} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + g Z_e \right) = \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{v_s^2}{2} + g Z_s \right) + \dot{W}_{v-c}$$

IV.10.1 Les centrales énergétiques

Les besoins énergétiques de nos jours ne cesse d'augmenter et nécessite une meilleure maîtrise de sa : production, distribution et consommation. Ce qui nous insiste aussi à maîtriser l'outil de production dans le but d'augmenter son rendement et réduire ses coûts de productions. Certaines machines de centrale énergétique se caractérisent par une **combustion continue** interne ou externe et d'autre **sans combustion** (éoliennes) :

- Les centrales nucléaires (*réaction de fission nucléaire (externe)*).
- Les centrales hydrauliques (*à eau sans combustion*).
- Les centrales éoliennes (*sans combustion*).
- Les centrales solaires hybrides (*sans combustion externe /combustion continue interne*).
- Les centrales thermiques (*combustion continue externe*).
- Les centrales au gaz (*combustion continue interne*).
- Une centrale thermique à cycle combiné à gaz

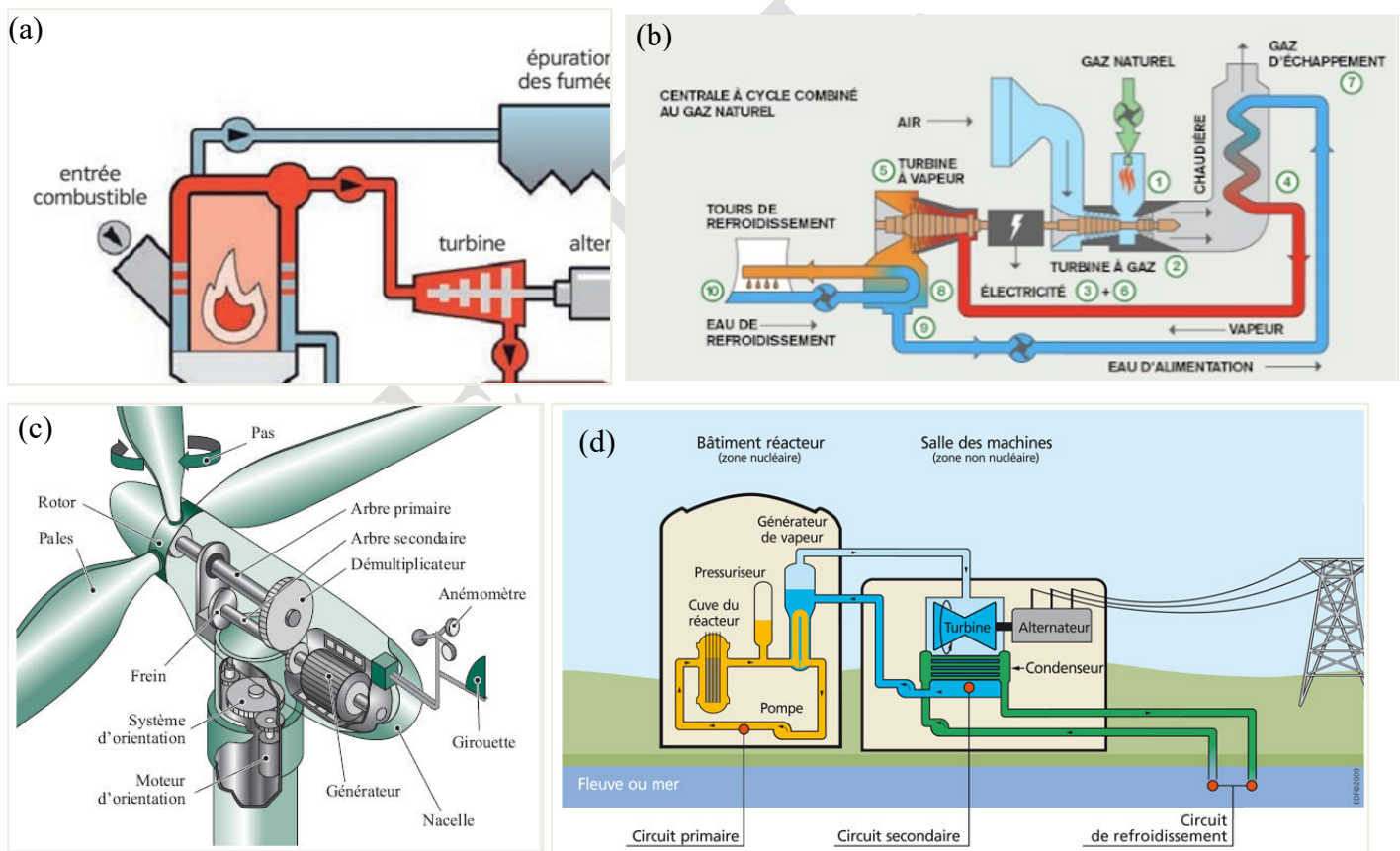


Fig. IV.1 Centrales : (a) à vapeur (b) à cycle combiné au gaz naturel (c) éoliennes (d) nucléaires

IV.10.2 Moteur à combustion continue interne et externe

- Turbine à gaz

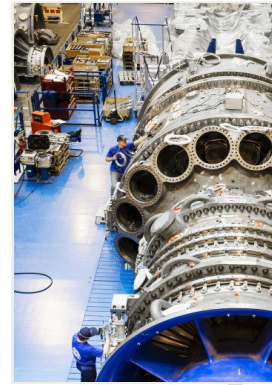
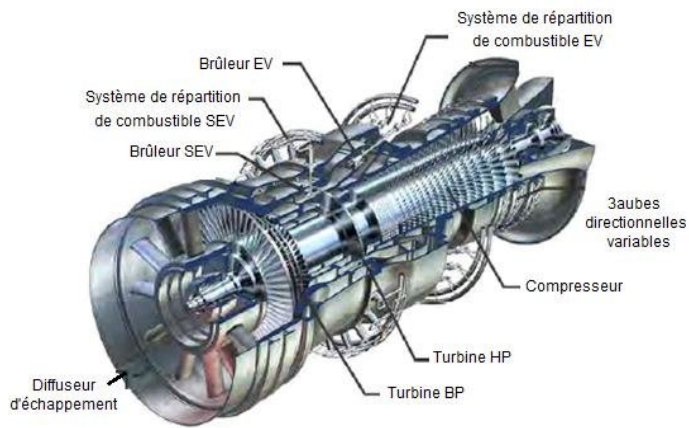


Figure IV.2 Turbine à gaz (*Alstom GT-26 288 MW*)

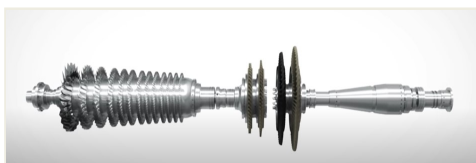
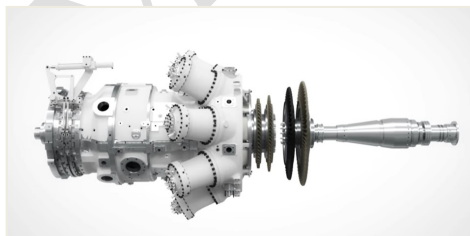
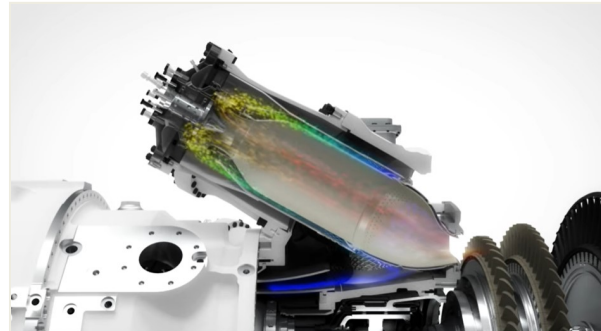
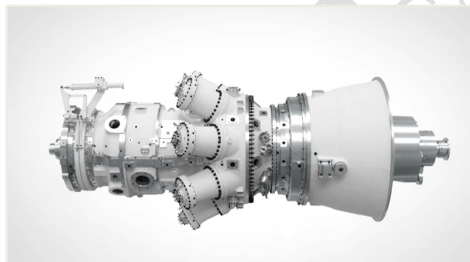
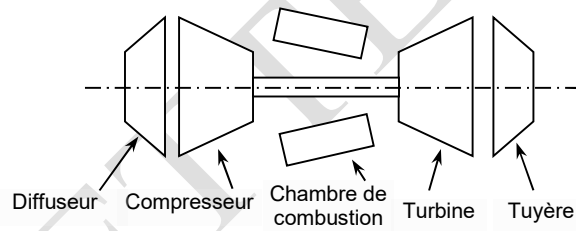
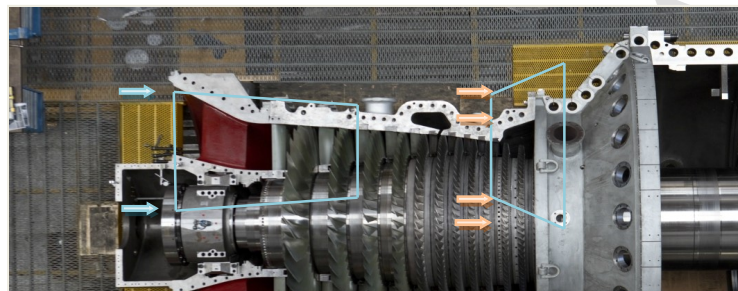


Figure IV.3 Turbine à gaz (*Siemens SGT-750*)

- Moteur à réaction (turboréacteurs)

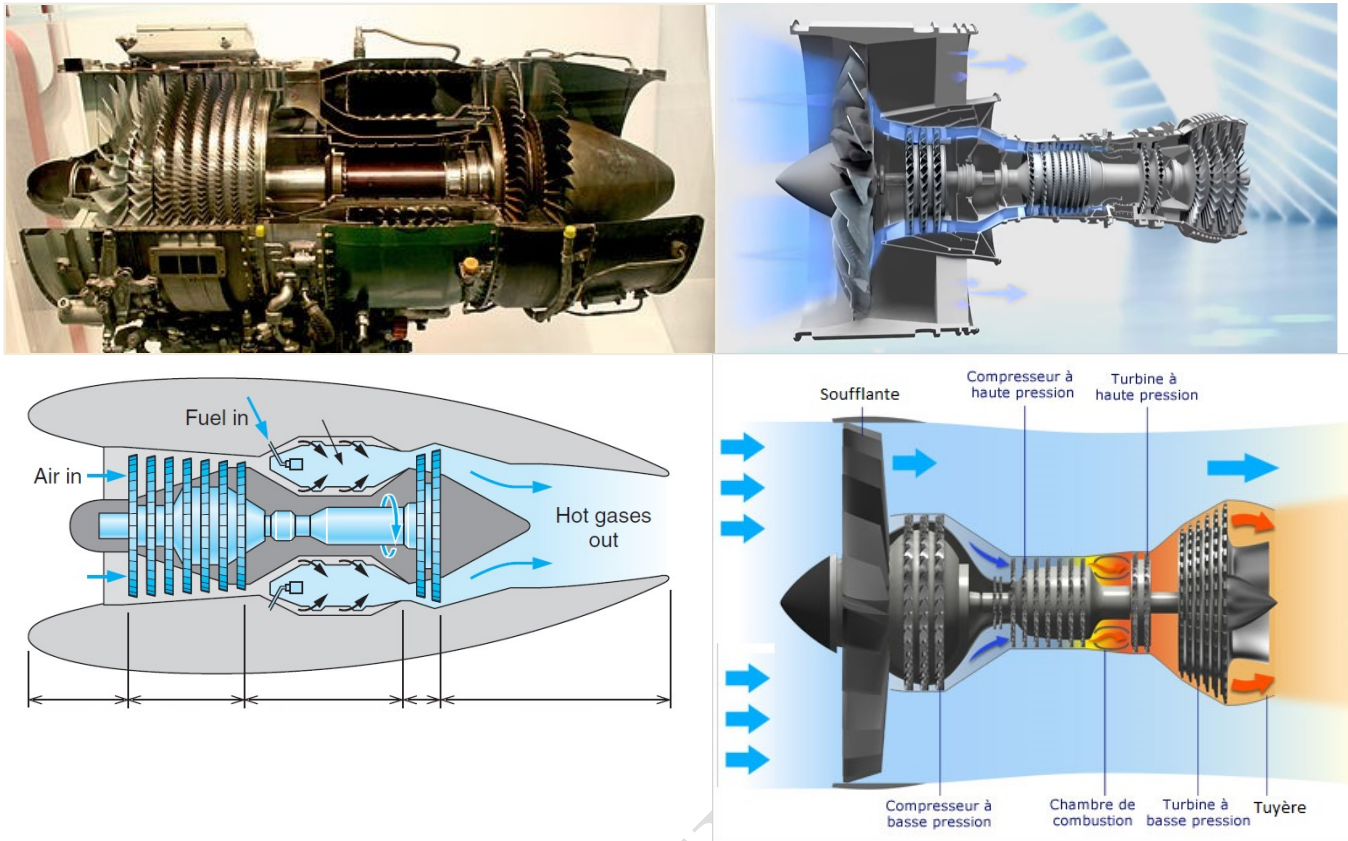


Figure IV.4 Moteur à réaction (turboréacteurs)

- Moteur à combustion continue externe (Turbine à vapeur)

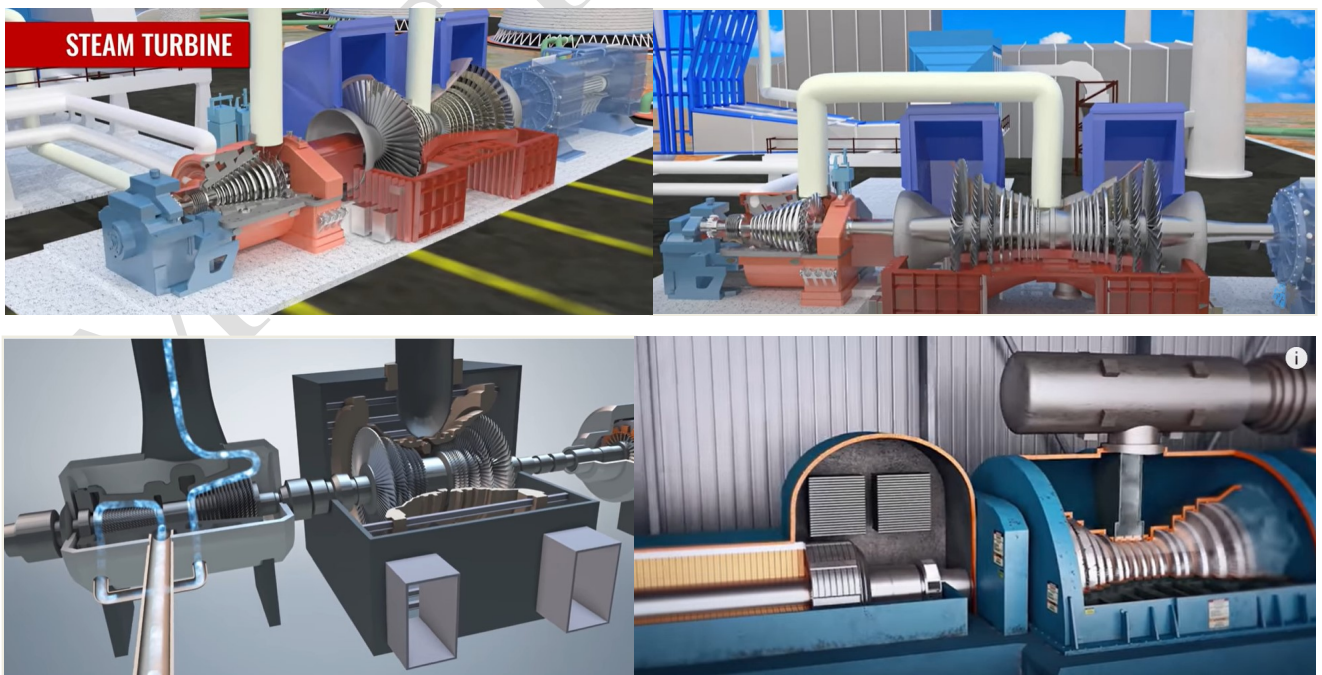


Figure IV.5 Turbine à vapeur



Figure IV.6 Aubes de turbine

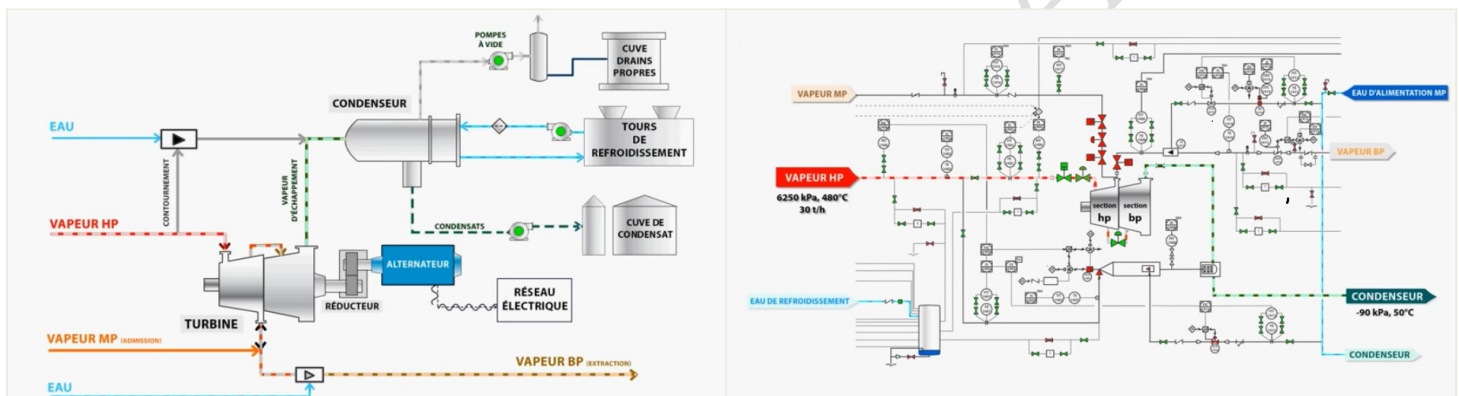


Fig. IV.7 l'interface de commande d'une centrale à vapeur (pupitre de commande)

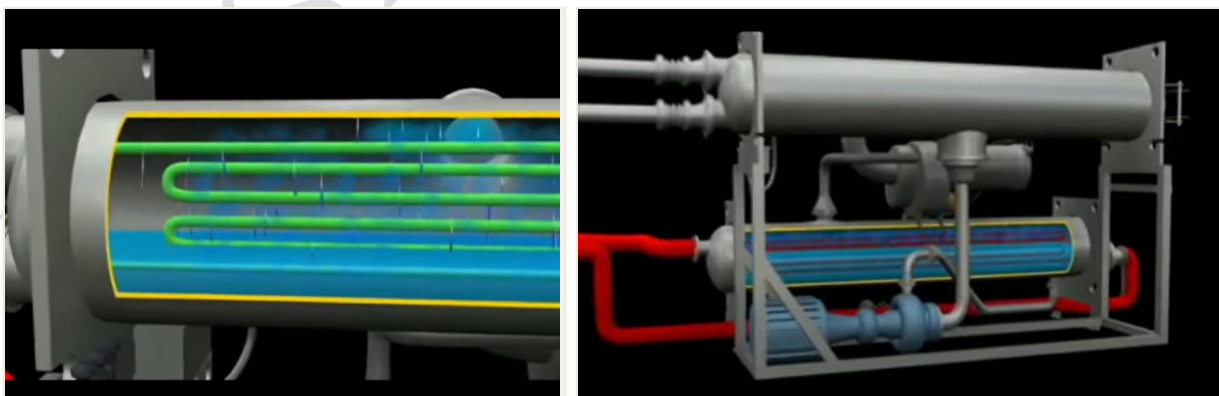


Figure IV.8 Condenseur

IV.10.3 les éléments constituant les installations de productions énergétiques

V.10.3.a Machines motrices ($\dot{W} > 0$)

Ce sont des machines conçues pour produire du travail ($\dot{W} > 0$)

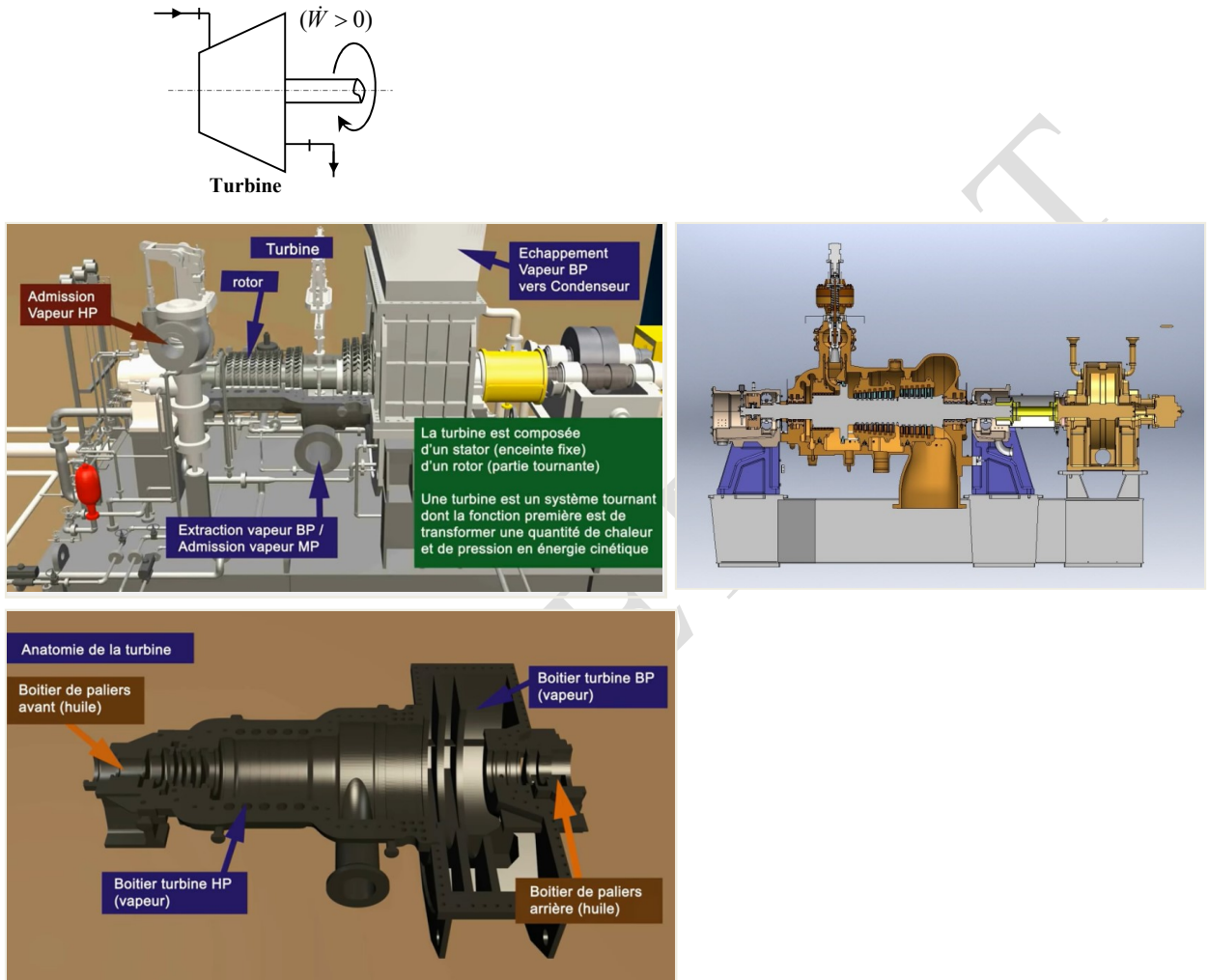
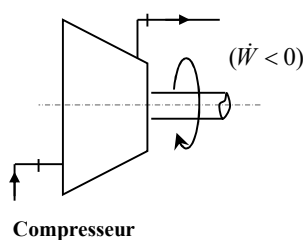


Figure IV.9 Turbine à vapeur

IV.10.3.b Machines réceptrices ($\dot{W} < 0$)

Ces machines doivent recevoir du travail ($\dot{W} < 0$), pour atteindre leurs objectifs, tel que : les pompes, les compresseurs et les ventilateurs, etc.

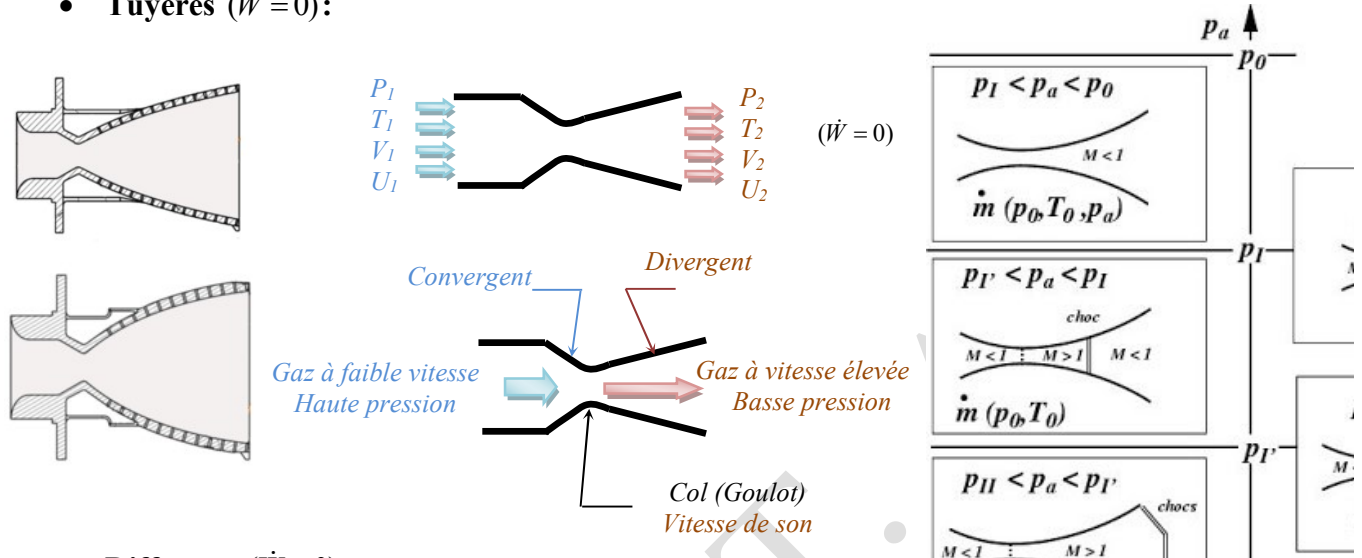
Les **pompes** sont utilisées pour augmenter la pression d'un fluide à l'état **liquide**, par contre les **compresseurs** sont utilisés pour augmenter la pression d'un fluide à l'état **gazeux**



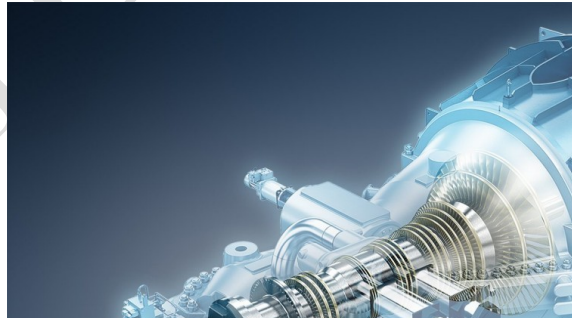
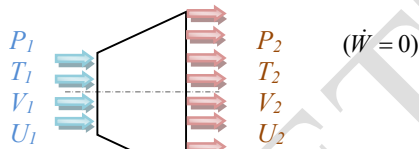
IV.10.3.c Tuyères et diffuseur ($\dot{W} = 0$)

Ce sont des dispositifs pour modifier les propriétés de l'écoulement du fluide

- Tuyères ($\dot{W} = 0$):



- Diffuseur ($\dot{W} = 0$):

IV.10.3.d Echangeur de chaleur ($\dot{W} = 0$)

Un échangeur de chaleur est un système qui permet le transfert de chaleur d'un fluide chaud à un fluide froid à travers une paroi sans contact direct entre deux fluides (radiateur d'automobile évaporateur de climatiseur etc.)

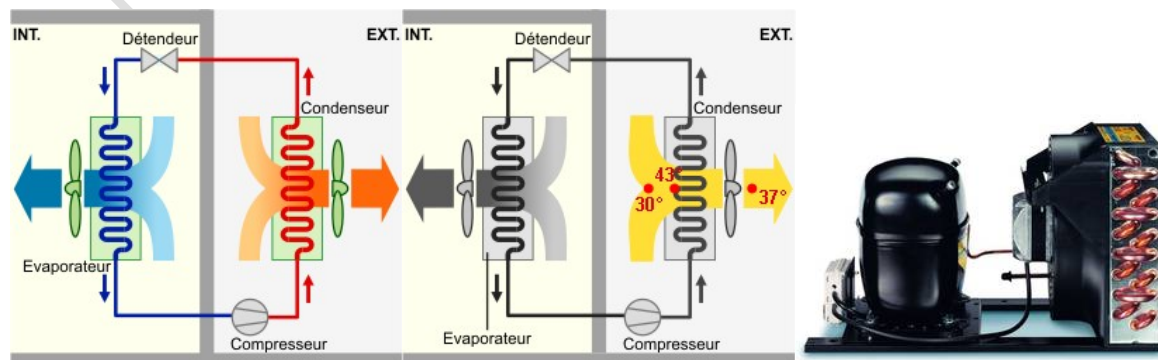
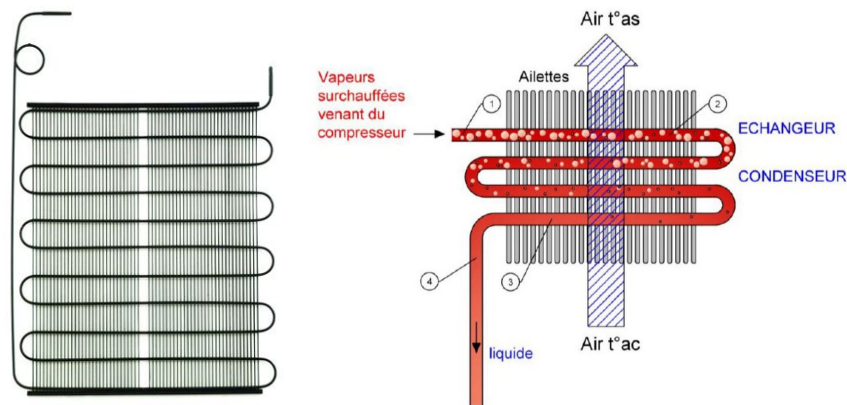
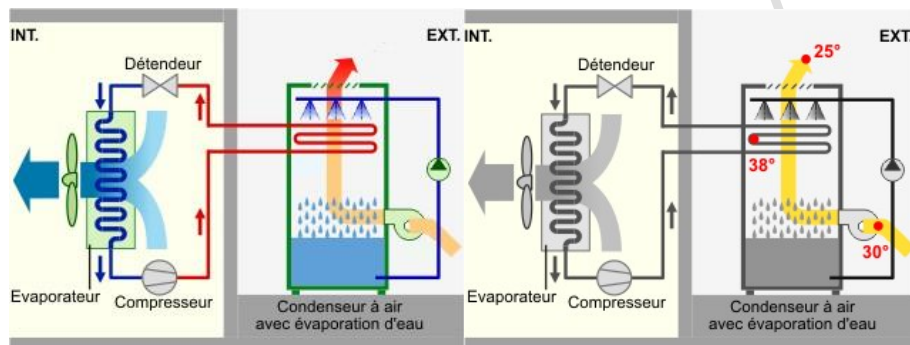
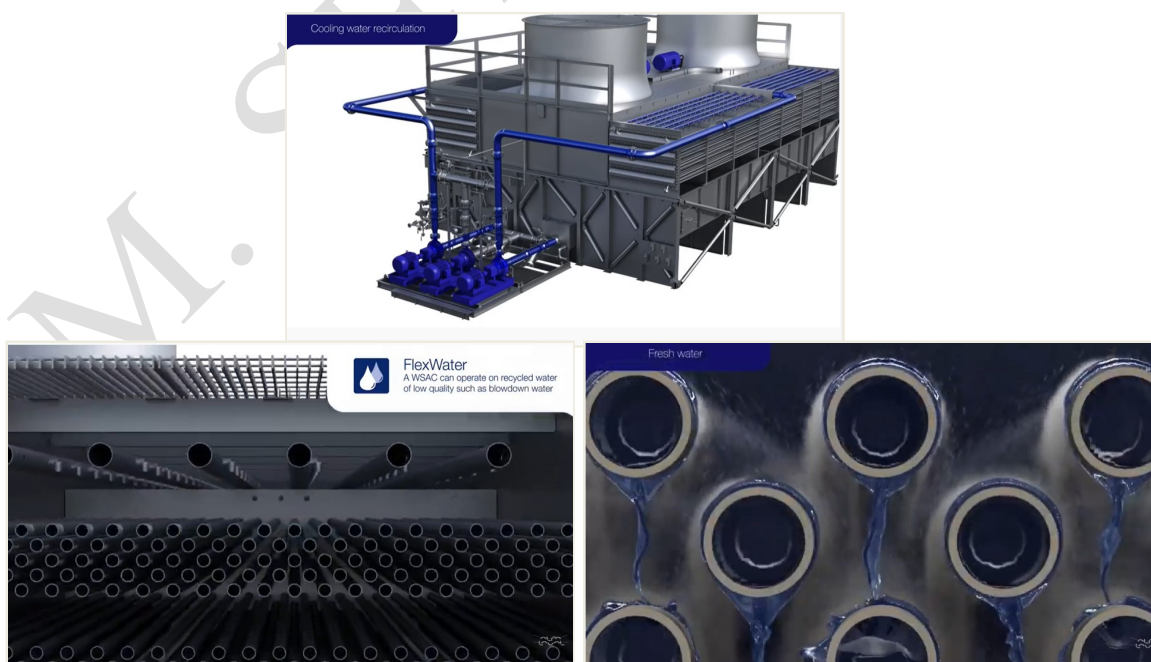


Figure IV.10 Condenseur (a) refroidissement à l'air (convection forcée)**Figure IV.11** Condenseur (b) refroidissement à l'air libre (convection naturelle)**Figure IV.12** Condenseur tubulaire (c) refroidissement avec liquide de refroidissement (eau, glaciolle).**Figure IV.13** Condenseur multitubulaire (c) refroidissement avec liquide de refroidissement

(liquid anticorrosion, antigel à basse température).

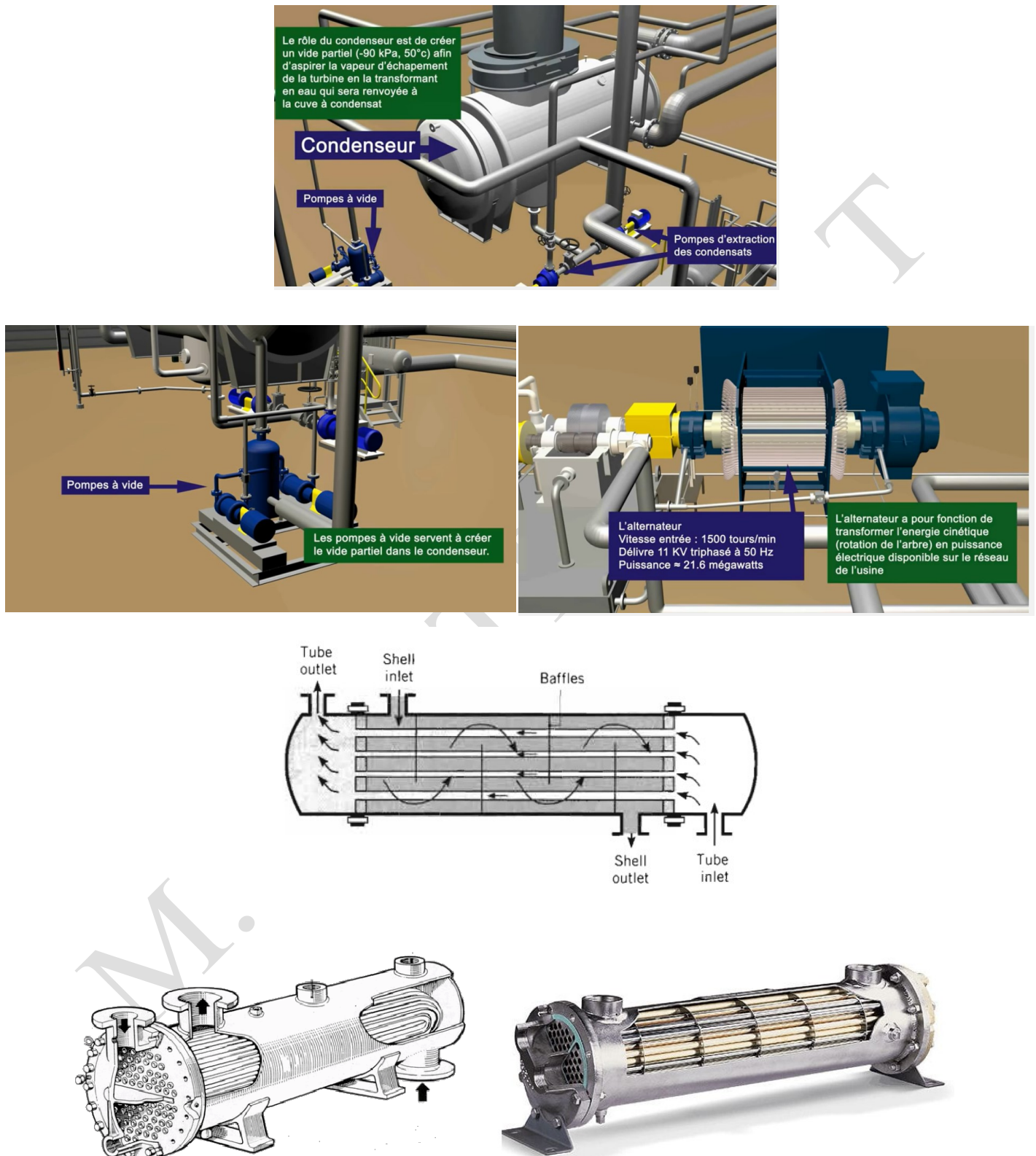
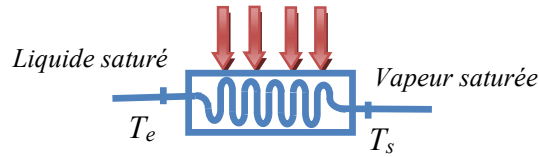


Figure IV.14 Condenseur tubulaire (c) refroidissement avec liquide de refroidissement (liquid anticorrosion, antigel à basse température).

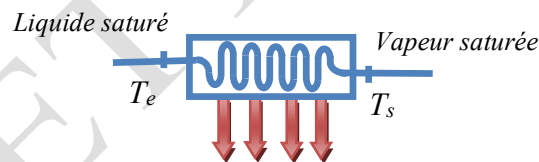
- **Évaporateur** ($\dot{W} = 0$)

La principale fonction de l'évaporateur est d'absorber la chaleur.



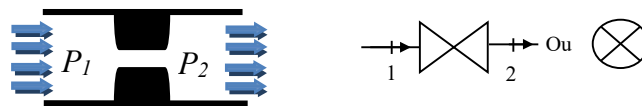
- **Condenseur** ($\dot{W} = 0$)

Un **condenseur** est (un échangeur) un appareil dont la fonction principale est de liquéfier ou de condenser (transformation) un gaz ou une vapeur surchauffée en liquide. C'est-à-dire Il qui permet le refroidissement de l'air ou de l'eau à travers un élément intermédiaire, dans le cas des systèmes frigorifique, il permet l'évacuation de la quantité de chaleur prélevé (extraite) de l'évaporateur ou du travail du compresseur, qui sont contenues dans les vapeurs du fluide frigorigène, (dans le cas des installations énergétiques liquide caloporteur).



IV.10.3.e Valves de détente ($\dot{W} = 0$)

Les valves de détente (soupape) ont pour but de réduire la pression ($P_2 < P_1$)



L'écoulement à travers les valves de détentes est supposée adiabatique.

IV.10.3.f Conduites ($\dot{W} = 0$)

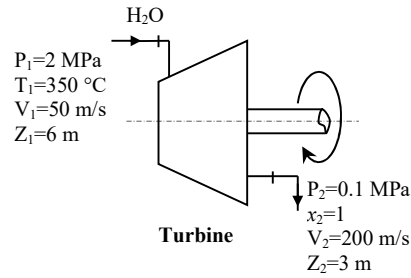
Le but est de faire cheminer (transporter, déplacer) un fluide d'un endroit à un autre

IV.10.4 Exemples

V.10.4.a Turbines

La puissance d'une turbine à vapeur est de 655,7 kW (watts) la chaleur cédée par la turbine est de 8,5 kW. Les données à l'entrée et à la sortie de la turbine sont mentionnées sur la figure.

- calculer le débit massique à travers la turbine.

**Solution :**

- **V.C (Volume de contrôle) $\equiv$ Turbine.**
- **Hypothèses :**
 - ERP (Écoulement régime permanent).
 - Conservation de la masse : $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$

Le système cède de l'énergie $\Rightarrow$	$\begin{cases} \dot{W} > 0 \\ \dot{Q} < 0 \end{cases}$
Le système reçoit de l'énergie $\Rightarrow$	$\begin{cases} \dot{W} < 0 \\ \dot{Q} > 0 \end{cases}$

- **Premier principe :**

$$\dot{Q} + \dot{m}_1 \left(h_1 + \frac{v_1^2}{2} + g Z_1 \right) = \dot{m}_2 \left(h_2 + \frac{v_2^2}{2} + g Z_2 \right) + \dot{W} \Leftrightarrow \dot{Q} + \dot{m} \left(h_1 + \frac{v_1^2}{2} + g Z_1 \right) = \dot{m} \left(h_2 + \frac{v_2^2}{2} + g Z_2 \right) + \dot{W}$$

$$\Leftrightarrow \dot{m} = \frac{\dot{Q} - \dot{W}}{h_2 - h_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(Z_2 - Z_1)}$$

Etat 1 :

$$\begin{cases} P_1 = 2 \text{ MPa} \\ T_1 = 350^\circ \text{C} \end{cases} \Leftrightarrow \text{Vapeur surchauffée} \Rightarrow h_1 = 3137 \text{ kJ/kg}$$

Etat 2 :

$$\begin{cases} P_2 = 0.1 \text{ MPa} \\ T_2 = 99.63^\circ \text{C} \end{cases} \Leftrightarrow \text{Vapeur surchauffée} \Rightarrow h_2 = h_{g(0.1 \text{ MPa})} = 2675.5 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q} - \dot{W}}{h_2 - h_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(Z_2 - Z_1)} = \frac{((-8.5) - (+655.7))10^3}{(2675.5 - 3137)10^3 + \frac{200^2 - 50^2}{2} + 9.81(3 - 6)} = \frac{-664200}{-442779.43} = 1.5 \text{ kg/s}$$

Remarque :

Recalculons le débit, en négligeant ΔEc , ΔEp et $\dot{Q}$:

$$\dot{m} = \frac{-\dot{W}}{h_2 - h_1} = \frac{\dot{W}}{h_1 - h_2} = \frac{655.7}{461.5} = 1.42 \text{ kg/s}$$

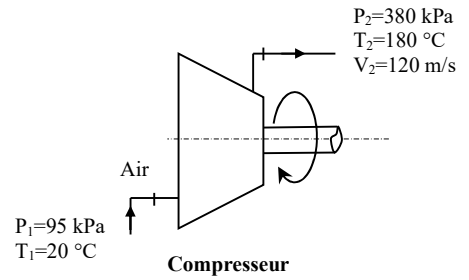
L'erreur relative commise est de

$$\frac{\Delta \dot{m}}{\dot{m}} = \frac{1.42 - 1.5}{1.5} = 0.0533 = 5.33\%$$

D'où, dans le cas des turbines et des compresseurs on néglige généralement ΔEc , ΔEp et $\dot{Q}$.

V.10.4.b Compresseur

Un compresseur adiabatique d'une turbine à gaz reçoit de l'air à faible vitesse du milieu ambiant à 95 kPa et 20 °C, à la sortie du compresseur la pression est de 380 kPa et la température est de 180 °C, tandis que la vitesse est de 120 m/s. La puissance d'entrée du compresseur est de 3 MW. Déterminer le débit massique de l'air. Suppose l'air gaz parfait



$$C_p = 1.0035 \frac{kJ}{kg.K}$$

Solution :

- **V.C (Volume de contrôle) ≡ Compresseur.**

- **Hypothèses :**

- ERP (Écoulement régime permanent).
- Conservation de la masse : $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$
- Adiabatique $\Rightarrow \dot{Q} = 0$
- $v_1 = 0$
- $\Delta Ep = 0$

- **Premier principe :**

$$\dot{Q} + \underbrace{\dot{m}_1}_{=\dot{m}} \left(h_1 + \frac{v_1^2}{2} + \underbrace{g Z_1}_{=0} \right) = \underbrace{\dot{m}_2}_{=\dot{m}} \left(h_2 + \frac{v_2^2}{2} + \underbrace{g Z_2}_{=0} \right) + \dot{W} \Leftrightarrow \dot{m} h_1 = \dot{m} \left(h_2 + \frac{v_2^2}{2} \right) + \dot{W}$$

$$\Leftrightarrow \dot{m} = \frac{\dot{W}}{h_1 - h_2 - \frac{v_2^2}{2}}$$

$$h_1 - h_2 = c_p (T_1 - T_2) = 1.0035 \cdot 10^3 (20 - 180) = 160.21 \text{ J/kg}$$

D'où :

$$\dot{m} = \frac{\dot{W}}{c_p (T_1 - T_2) - \frac{v_2^2}{2}} = \frac{-3 \cdot 10^6}{1.0035 \cdot 10^3 (20 - 180) - \frac{120^2}{2}} = \frac{-3 \cdot 10^6}{-160.21 - \frac{120^2}{2}} = 17.88 \text{ kg/s}$$

Observation :

Calculons le débit en négligeant la vitesse à la sortie :

$$\dot{m} = \frac{-3 \cdot 10^6}{1.0035 \cdot 10^3 (20 - 180)} = 18.68 \text{ kg/s}$$

$$\frac{\Delta \dot{m}}{\dot{m}} = \frac{18.68 - 17.88}{17.88} = 0.0447$$

$$= 4.47\% \approx 4.5\%$$

V.10.4.c Tuyère

De la vapeur d'eau à 0.6 MPa, et à 200 °C entre dans une tuyère isolé thermiquement à une vitesse de 50 m/s, elle en sort à une pression de 0,15 MPa et à une vitesse de 600 m/s.

Dans le cas où à l'entrée c'est de la vapeur surchauffée :

- calculer la température finale dans le cas où à la sortie de la tuyère est un mélange liquide vapeur.
- calculer le titre du mélange liquide vapeur (liq-vap).

Solution :

- V.C (Volume de contrôle) $\equiv$ Tuyère.

- Hypothèses :

- ERP (Écoulement régime permanent).
- Conservation de la masse : $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$
- Adiabatique $\Rightarrow \dot{Q} = 0$
- $\Delta E_p = 0$



- Premier principe :

$$\dot{Q} + \dot{m}_1 \left(h_1 + \frac{v_1^2}{2} + g Z_1 \right) = \dot{m}_2 \left(h_2 + \frac{v_2^2}{2} + g Z_2 \right) + \dot{W} \Leftrightarrow h_1 + \frac{v_1^2}{2} = h_2 + \frac{v_2^2}{2}$$

$$\Leftrightarrow h_2 = h_1 + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2}$$

Etat 1 :

$$\begin{cases} P_1 = 0.6 \text{ MPa} \\ T_1 = 200^\circ \text{C} \end{cases} \Rightarrow \text{Vapeur surchauffée} \Rightarrow h_1 = 2850.1 \text{ kJ / kg}$$

$$h_2 = 2850.1 + \frac{50^2 - 600^2}{2 \cdot 10^3}$$

$$h_2 = 2671.35 \text{ kJ / kg}$$

Etat 2 :

$$\begin{cases} P_2 = 0.15 \text{ MPa} \\ h_2 = 2671.4 \text{ kJ / kg} \end{cases} \Rightarrow \text{Mélange liquide - vapeur} \Rightarrow h_2 = 2850.1 \text{ kJ / kg}$$

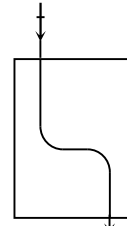
$$\text{Avec : } P = 0.15 \text{ MPa} \Rightarrow \begin{cases} h_f = 467.11 \text{ kJ / kg} \\ h_g = 2693.6 \text{ kJ / kg} \\ h_{fg} = 2226.5 \text{ kJ / kg} \end{cases}$$

$$h_f < h_2 < h_g \Rightarrow \text{État 2 : mélange liq-vap} \Rightarrow x_2 = \frac{h_2 - h_f}{h_{fg}} = 0.99 \Leftrightarrow x_2 = 0.99$$

V.10.4.d Condenseur

De la vapeur à 100 kPa entre dans un condenseur sous forme d'une vapeur saturée à une vitesse de 50 m/s et sort sous forme de liquide saturé à la même pression et à une vitesse de 15 m/s. Le point de sortie de la vapeur est saturé à 2 mètres plus bas que le point d'entrée.

$P_1 = 100 \text{ kPa}$
 V_{ap-sat}
 $V_1 = 50 \text{ m/s}$
 $Z_1 = 2 \text{ m}$



$P_2 = 100 \text{ kPa}$
 $Liq-sat$
 $V_2 = 15 \text{ m/s}$

- Calculer par kg d'eau la quantité de chaleur échangée en cours de cette évolution.

Solution :

- **V.C (Volume de contrôle)** $\equiv$ conduite du condenseur.
- **Hypothèses :**
 - ERP (Écoulement régime permanent).
 - Conservation de la masse : $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$
- **Premier principe :**

$$\dot{Q} + \dot{m}_1 \left(h_1 + \frac{v_1^2}{2} + g Z_1 \right) = \dot{m}_2 \left(h_2 + \frac{v_2^2}{2} + g Z_2 \right) + \dot{W}_{\text{ex}} \Leftrightarrow \dot{Q} = \dot{m}_2 \left(h_2 - h_1 + \frac{v_2^2}{2} - \frac{v_1^2}{2} + g Z_2 - g Z_1 \right)$$

$$\Leftrightarrow q = (h_2 - h_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g (Z_2 - Z_1) \text{ Avec : } q = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}}$$

#	Temp	Pressure	Specific Volume	Internal Energy	Specific Enthalpy	Specific Entropy	Quality	Phase
	C	MPa	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg/K		
1	99.62	0.1	0.001043	417.3	417.4	1.303	0	Saturated Liquid
2	99.62	0.1	1.694	2506	2675	7.359	1	Saturated Vapor

Etat 1 :

$$\begin{cases} P_1 = 100 \text{ kPa} \\ \text{vap-sat} \end{cases} \Rightarrow h_1 = h_{g(100 \text{ kPa})} = 2675.5 \text{ kJ/kg}$$

Etat 2 :

$$\begin{cases} P_2 = 100 \text{ kPa} \\ \text{liq-sat} \end{cases} \Rightarrow h_2 = h_{f(100 \text{ kPa})} = 417.46 \text{ kJ/kg}$$

$$\begin{aligned} \text{Le système cède de l'énergie} &\Leftrightarrow \begin{cases} W > 0 \\ Q < 0 \end{cases} \\ \text{Le système reçoit de l'énergie} &\Leftrightarrow \begin{cases} W < 0 \\ Q > 0 \end{cases} \end{aligned}$$

$$q = (h_2 - h_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g (Z_2 - Z_1) \Leftrightarrow q = (417.46 - 2675.5)10^3 + \frac{15^2 - 50^2}{2} + 9.81 (0 - 2 \cdot 10^{-3})$$

$$\Leftrightarrow q = -2259177.5 \text{ J} = -2259.1775 \text{ kJ/kg}$$

En général lors de l'analyse énergétique des échangeurs de chaleur on néglige l'énergie cinétique ΔE_c et l'énergie potentielle ΔE_p .

Dans cet exemple si on néglige l'énergie cinétique ΔEc et l'énergie potentielle ΔEp on trouve :

$$q = (h_2 - h_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g (Z_2 - Z_1) \Leftrightarrow q = 417.46 - 2675.5$$

$$\Leftrightarrow q = -2258.04 \text{ kJ / kg}$$

$$\frac{\Delta q}{q} = \frac{2258.04 - 2259.17}{2259.17} = 5.0018 \cdot 10^{-4} \% \\ \approx 0.05 \%$$

Soit une erreur relative de 0.05% .

V.10.4.e Evolution de valves (soupape) de détente (Evolution d'étranglement) :

L'évolution d'étranglement a lieu lorsqu'un fluide subit une chute de pression ($p \searrow$) en passant à travers une restriction ou rétrécissement (changement brusque de section).

Un certain nombre de prothèse sont adoptés pour étudier les évolutions d'étranglement.

• Hypothèses :

- ERP (Écoulement régime permanent),
- écoulement adiabatique $\Rightarrow \dot{Q} = 0$, où l'espace est restreint et l'écoulement est assez rapide pour qu'il ne puisse pas y avoir d'échange de chaleur,
- on considère la variation d'énergie cinétique négligeable $\Delta Ec = 0$,
- on considère la variation d'énergie potentielle négligeable $\Delta Ep = 0$,
- conservation de la masse : $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$.

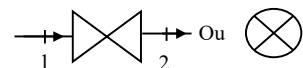
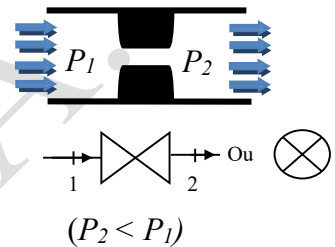
$$\underbrace{\dot{Q}}_{=0} + \dot{m}_1 \left(h_1 + \underbrace{\frac{v_1^2}{2}}_{=0} + \underbrace{g Z_1}_{=0} \right) = \dot{m}_2 \left(h_2 + \underbrace{\frac{v_2^2}{2}}_{=0} + \underbrace{g Z_2}_{=0} \right) + \underbrace{\dot{W}}_{=0} \Leftrightarrow h_2 = h_1$$

D'où: $h_2 = h_1$

Exercice

Une valve de détente est utilisée dans un cycle de réfrigération, où l'ammoniac entre dans la valve à une pression de 1,5 MPa et à une température de 32 °C, il en sort à une pression de 268 kPa

- trouver le titre à la sortie de la valve.



$$P_1 = 1.5 \text{ MPa}$$

$$P_2 = 268 \text{ kPa}$$

$$T_1 = 32^\circ \text{C}$$

Solution :

- **V.C (Volume de contrôle)** $\equiv$ valves de détente (soupape).
- **Hypothèses :**
 - ERP (Écoulement régime permanent)
 - conservation de la masse : $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$
 - 1^{er} principe $h_2 = h_1$

Etat 1 :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1 = 1.5 \text{ MPa} \\ T_1 = 32^\circ\text{C} \end{array} \right\} \Rightarrow \text{liq} - \text{com} \text{ (Liquide comprimé)}$$

$$\text{donc : } h_1 = h_{f(32^\circ\text{C})} = 332.6 \text{ kJ/kg}$$

Etat 2 :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_2 = 268 \text{ kPa} \\ h_2 = 332.6 \text{ kJ/kg} \end{array} \right. \text{ des tables de l'ammoniaque saturé à } P_2 = 268 \text{ kPa} \text{ on a : } \left\{ \begin{array}{l} h_f = 126.0 \text{ kJ/kg} \\ h_g = 1429.5 \text{ kJ/kg} \\ h_{fg} = 1303.5 \text{ kJ/kg} \end{array} \right.$$

$\Rightarrow$ Mélange liquide vapeur

$$x_2 = \frac{h_2 - h_{f2}}{h_{fg2}} = 0.1585 = 15.85\%$$

TABLE 4.1
Typical Steady-Flow Devices

Device	Purpose	Given	Assumption
Aftercooler	Cool a flow after a compressor	$w = 0$	$P = \text{constant}$
Boiler	Bring substance to a vapor state	$w = 0$	$P = \text{constant}$
Combustor	Burn fuel; acts like heat transfer in	$w = 0$	$P = \text{constant}$
Compressor	Bring a substance to higher pressure	$w \text{ in}$	$q = 0$
Condenser	Take q out to bring substance to liquid state	$w = 0$	$P = \text{constant}$
Deaerator	Remove gases dissolved in liquids	$w = 0$	$P = \text{constant}$
Dehumidifier	Remove water from air		$P = \text{constant}$
Desuperheater	Add liquid water to superheated vapor steam to make it saturated vapor	$w = 0$	$P = \text{constant}$
Diffuser	Convert KE energy to higher P	$w = 0$	$q = 0$
Economizer	Low- T , low- P heat exchanger	$w = 0$	$P = \text{constant}$
Evaporator	Bring a substance to vapor state	$w = 0$	$P = \text{constant}$
Expander	Similar to a turbine, but may have a q		
Fan/blower	Move a substance, typically air	$w \text{ in, KE up}$	$P = C, q = 0$
Feedwater heater	Heat liquid water with another flow	$w = 0$	$P = \text{constant}$
Flash evaporator	Generate vapor by expansion (throttling)	$w = 0$	$q = 0$
Heat engine	Convert part of heat into work	$q \text{ in, } w \text{ out}$	
Heat exchanger	Transfer heat from one medium to another	$w = 0$	$P = \text{constant}$
Heat pump	Move a Q from T_{low} to T_{high} ; requires a work input, refrigerator	$w \text{ in}$	
Heater	Heat a substance	$w = 0$	$P = \text{constant}$
Humidifier	Add water to air–water mixture	$w = 0$	$P = \text{constant}$
Intercooler	Heat exchanger between compressor stages	$w = 0$	$P = \text{constant}$
Mixing chamber	Mix two or more flows	$w = 0$	$q = 0$
Nozzle	Create KE; P drops	$w = 0$	$q = 0$
	Measure flow rate		
Pump	Same as compressor, but handles liquid	$w \text{ in, } P \text{ up}$	$q = 0$
Reactor	Allow a reaction between two or more substances	$w = 0$	$q = 0, P = C$
Regenerator	Usually a heat exchanger to recover energy	$w = 0$	$P = \text{constant}$
Steam generator	Same as a boiler; heat liquid water to superheated vapor	$w = 0$	$P = \text{constant}$
Supercharger	A compressor driven by engine shaft work to drive air into an automotive engine	$w \text{ in}$	
Superheater	A heat exchanger that brings T up over T_{sat}	$w = 0$	$P = \text{constant}$
Throttle	Same as a valve		
Turbine	Create shaft work from high P flow	$w \text{ out}$	$q = 0$
Turbocharger	A compressor driven by an exhaust flow turbine to charge air into an engine	$\dot{W}_{\text{turbine}} = -\dot{W}_C$	
Valve	Control flow by restriction; P drops	$w = 0$	$q = 0$

