

Thermodynamique industrielle

1. Approche globale

On appelle **machine thermique** un dispositif fonctionnant en cycles dans lequel un fluide échange de l'énergie par transfert thermique et par travail.

L'étude globale est une étude de type « système fermé » : elle consiste à appliquer les principes de la thermodynamique à la totalité du fluide contenu dans la machine.

Cas d'une machine à piston : la transformation considérée est un cycle complet du fluide contenu dans la chambre de combustion. Comme il s'agit d'un cycle, l'état final du fluide est identique à son état initial et les variations des fonctions d'état sont nulles.

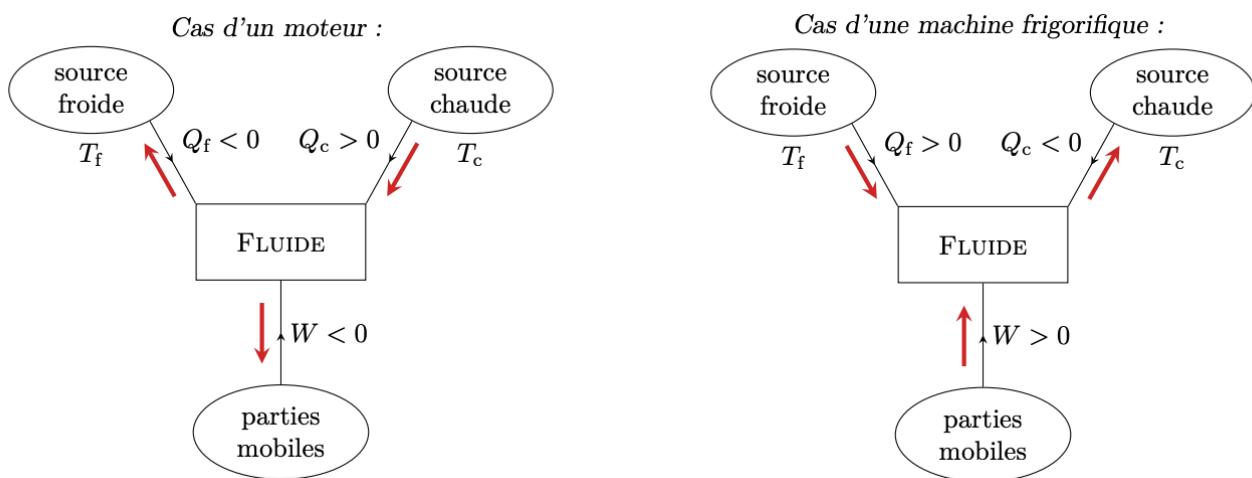
Cas d'une machine à écoulement : on ne considère que le cas du régime permanent, si bien que les variations des fonctions d'état sont nulles, quelle que soit la transformation considérée (finie ou infinitésimale).

1.1. Sens des échanges d'énergie dans une machine ditherme

Une machine est dite **ditherme** si elle n'échange de transfert thermique qu'avec deux sources de chaleur au cours du cycle.

Intérêt : en pratique, l'une des sources de chaleur est très souvent directement l'environnement (atmosphère, fleuve ou eau de mer...) : il n'y a donc qu'une seule source à « fabriquer », ce qui simplifie la conception de la machine.

Diagramme des échanges : notations type machine à pistons ; dans le cas d'une machine à écoulement en régime permanent, des considérations identiques sont valables pour les puissances mécanique P_m et thermiques P_c et P_f .



On note que le sens des échanges d'énergie est le même dans toute machine frigorifique, qu'il s'agisse d'un réfrigérateur ou d'une pompe à chaleur ... MAIS

- un réfrigérateur a pour but de refroidir la source froide (son compartiment interne) ;
- une pompe à chaleur a pour but de réchauffer la source chaude (l'intérieur du bâtiment).

Le principe de fonctionnement est donc le même, mais la technologie diffère ... et la définition de l'efficacité aussi.

1.2. Performances

De façon très générale, la performance d'une machine thermique est décrite par un nombre sans dimension :

$$\text{performance} = \frac{\text{énergie intéressante récupérée}}{\text{énergie coûteuse dépensée}}$$

Les performances caractérisent l'ensemble du cycle, et s'expriment en fonction des énergies/puissances fournies au sein des étapes/composants élémentaires.

Le transfert thermique échangé avec le milieu naturel extérieur est toujours considéré gratuit, les deux énergies qui interviennent dans le calcul des performances sont donc le travail indiqué et l'autre transfert thermique.

1.2.1. Rendement d'un moteur

Le **rendement d'un moteur** est défini par :

$$\eta = -\frac{W}{Q_c} = -\frac{\mathcal{P}_m}{\mathcal{P}_c}$$

Il est compris entre 0 et 1 et est borné par le **rendement de Carnot** :

$$\eta_C = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

Méthode pour établir le rendement de Carnot :

$$1^{\text{er}} \text{ principe : } \Delta U = Q_c + Q_f + W = 0$$

$$2^{\text{nd}} \text{ principe : } \Delta S = \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} + S_{\text{créée}} = 0$$

$$\text{Expression générale du rendement : } \eta = -\frac{W}{Q_c} = \left(1 - \frac{T_f}{T_c}\right) - T_f \frac{S_{\text{créée}}}{Q_c}$$

Comme $S_{\text{créée}} \geq 0$, alors le rendement est limité : $\eta \leq \eta_C$.

Interprétation physique :

$$|W| = \eta Q_c \text{ et } |Q_f| = (1 - \eta)Q_c$$

si le rendement η diminue, alors pour une même énergie coûteuse Q_c le travail fourni W diminue et l'énergie cédée Q_f à la source froide augmente.

La création d'entropie traduit une « mauvaise » utilisation de l'énergie coûteuse.

On parle alors parfois de dégradation d'énergie : au lieu d'être récupérée sous forme de travail, elle est dissipée dans l'environnement par transfert thermique.

1.2.2. Efficacité ou coefficient de performance d'une machine frigorifique

Cas d'une machine réfrigérante

L'**efficacité ou coefficient de performance frigorifique** (*COP* froid) d'une machine frigorifique (réfrigérateur, climatiseur...) est définie par :

$$e = \frac{Q_f}{W} = \frac{\mathcal{P}_f}{\mathcal{P}_m}$$

Elle est généralement supérieure à 1, et bornée par l'efficacité de Carnot :

$$e_C = \frac{T_f}{T_c - T_f}$$

Cas d'une pompe à chaleur

L'**efficacité ou coefficient de performance** (*COP*) d'une pompe à machine est définie par :

$$e = -\frac{Q_c}{W} = -\frac{\mathcal{P}_c}{\mathcal{P}_m}$$

Elle est généralement supérieure à 1, et bornée par l'efficacité de Carnot :

$$e_C = \frac{T_c}{T_c - T_f}$$

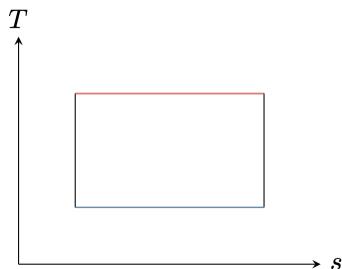
On retiendra l'expression de l'efficacité de Carnot sous la forme :

$$e_C = \frac{\text{température intéressante}}{\text{différence de température entre sources}}$$

1.2.3. Cycle de Carnot

Le cycle qui donne le meilleur rendement est appelé **cycle de Carnot**. Il est totalement réversible, donc sans jamais aucune inhomogénéité puisque ce sont les sources d'irréversibilité.

- Pour les étapes au contact des sources : si la température du fluide est différente de celle de la source, il y a inhomogénéité de température : ce sont forcément des isotherme.
- Pour les étapes intermédiaires : ce sont évidemment des adiabatiques (pas de contact avec les source), dans lesquelles un travail permet de modifier la température sans transfert thermique, et comme elles sont réversibles par hypothèse, ce sont des isentropiques.



Le cycle de Carnot est composé :

- de deux isothermes réversibles aux températures des sources ;
- de deux adiabatiques réversibles.

Le cycle de Carnot est complètement réversible, le second principe autorise donc qu'il soit parcouru dans les deux sens : c'est le même pour un moteur ou un récepteur thermique. Seul change le sens de parcours du cycle, et bien sûr les échanges d'énergie auxquels on s'intéresse.

2. Principes de la thermodynamique pour un fluide en écoulement

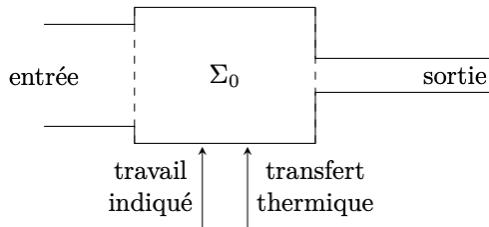
2.1. Du système ouvert à un système fermé

Considérons un fluide en écoulement stationnaire dans une conduite. Cette conduite amène le fluide dans un composant de la machine, où il reçoit depuis l'extérieur de l'énergie mécanique (travail indiqué) et un transfert thermique.

Le but est de procéder à un bilan d'énergie pour le fluide contenu dans le composant, délimité par une **surface de contrôle**, c'est-à-dire une surface fictive qui sert à isoler par la pensée le système étudié Σ_0 .

Difficulté :

Σ_0 est un système ouvert, son énergie peut donc varier non seulement sous l'effet des échanges de travail et de chaleur, mais aussi parce qu'il échange de la matière.



Les principes de la thermodynamique sous leur forme « usuelle » ne s'appliquent qu'à des systèmes fermés.

Il y a donc nécessité de les reformuler pour notre système ouvert, en se ramenant à un système fermé entre deux instants proches t et $t + dt$.

Construction du système fermé

Le but est d'isoler par la pensée un système fermé, c'est-à-dire qui contienne les mêmes particules fluides à l'instant t et $t + dt$, et qui englobe tout le système ouvert Σ_0 à chaque instant : il faut donc voir un peu plus grand.

- À l'instant t :

$$\Sigma_f(t) = \Sigma_0 + \delta\Sigma_e$$

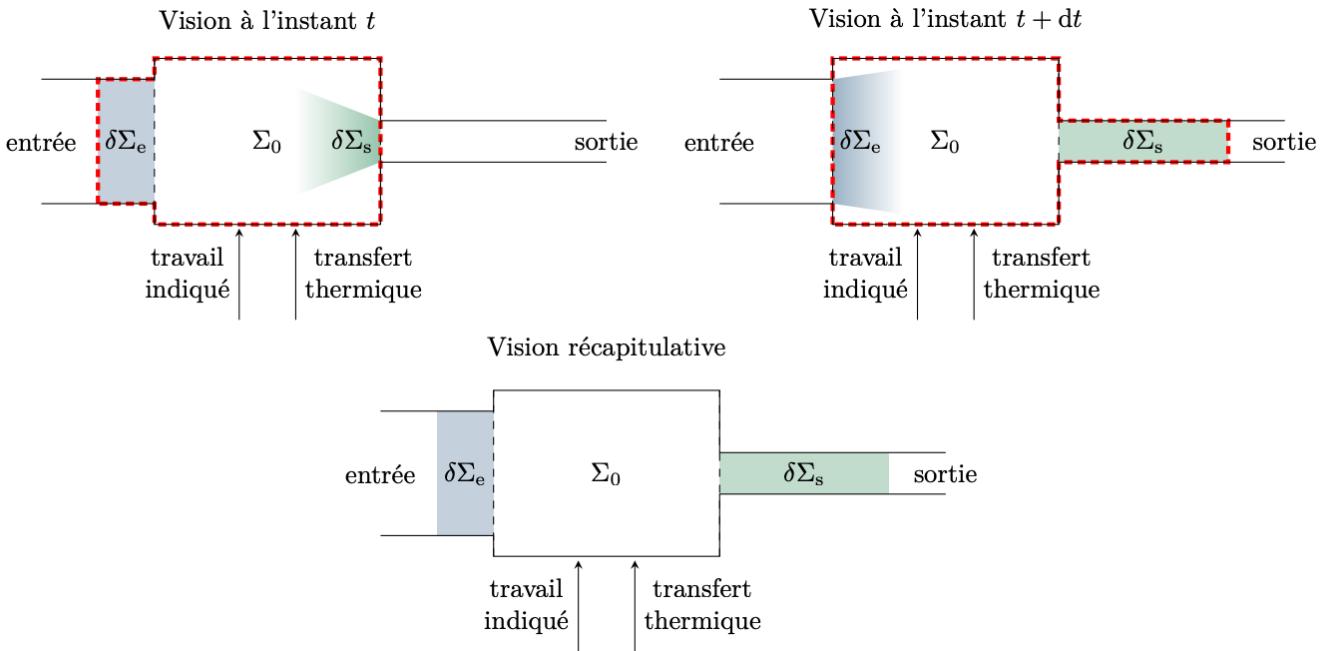
avec $\delta\Sigma_e$ la portion infinitésimale de fluide qui va rentrer dans le composant entre t et $t + dt$.

- À l'instant $t + dt$:

$$\Sigma_f(t + dt) = \Sigma_0 + \delta\Sigma_s$$

avec $\delta\Sigma_s$ la portion infinitésimale de fluide qui est sortie du composant entre t et $t + dt$.

Ce système est bien fermé (il contient les mêmes particules fluides à t et $t + dt$), et reçoit travail et transfert thermique à l'intérieur du composant étudié.



Bilan de masse

$$m_0(t + dt) = m_0(t) + \delta m_e - \delta m_s$$

d'où $\delta m_e = \delta m_s$ car $m_0 = \text{constante}$ par hypothèse de stationnarité.

Les systèmes $\delta\Sigma_e$ et $\delta\Sigma_s$ ont même masse, appelée **masse traversant**.

Physiquement la masse traversant δm est reliée au débit massique : c'est la masse qui traverse la section d'entrée et/ou de sortie pendant dt , donc par définition :

$$\delta m = D_m dt$$

2.2. Bilan d'énergie : premier principe pour le système ouvert

Idée physique : procéder au bilan d'énergie totale (énergie mécanique et énergie interne) de Σ_f entre t et $t + dt$, c'est-à-dire exprimer sa variation d'énergie de deux façons différentes,

- d'une part à l'aide de la constitution du système : $\delta\Sigma_e$ et $\delta\Sigma_s$ n'ont pas la même énergie ;
- d'autre part en appliquant le premier principe à Σ_f , c'est-à-dire avec les énergies échangées avec l'extérieur dans le composant étudié.

Notations : On note $E_f = U_f + E_{c,f} + E_{pp,f}$ l'énergie totale de Σ_f . Pour exprimer l'énergie potentielle de pesanteur, on suppose l'axe z vertical vers le haut.

2.2.1. À partir de la constitution du système

Entre t et $t + dt$, l'énergie totale E_f varie de :

$$\begin{aligned}
 dE_f &= E_f(t + dt) - E_f(t) \\
 &= [E_0(t + dt) + \delta E_s] - [E_0(t) + \delta E_e] \\
 &= \left[E_0(t + dt) + \delta m u_s + \frac{1}{2} \delta m v_s^2 + \delta m g z_s \right] - \left[E_0(t + dt) + \delta m u_e + \frac{1}{2} \delta m v_e^2 + \delta m g z_e \right] \\
 &= \delta m \left[(u_s + \frac{1}{2} v_s^2 + g z_s) - (u_e + \frac{1}{2} v_e^2 + g z_e) \right]
 \end{aligned}$$

2.2.2. En appliquant le 1er principe

Transfert thermique

Le fluide reçoit un transfert thermique δQ .

Travail indiqué

Si le composant étudié contient des parties mobiles, alors le fluide peut les mettre en mouvement ou réciproquement : cela se fait par échange de travail indiqué δW_i .

On appelle travail indiqué le travail algébriquement fourni au fluide par les pièces mobiles d'une machine. Il peut être positif ou négatif.

Exemples : le travail indiqué est positif pour une pompe et négatif pour une turbine.

Travail de transvasement

Si le fluide avance ... c'est qu'il est poussé par des forces, qui ne peuvent être que des forces de pression. On distingue les forces de pression d'admission, côté entrée et qui sont dans le sens de l'écoulement, des forces de pression de refoulement, côté sortie et qui s'opposent à l'écoulement.

Comme la pression est a priori différente sur les sections d'entrée et de sortie, il faut décomposer :

- sur la face d'entrée : la pression d'admission est motrice et son travail est positif :

$$\delta W_{p,e} = \mathcal{P}_{p,e} dt = + P_e S_e v_e dt = + P_e D_{V,e} dt = + P_e \frac{D_m}{\rho_e} dt$$

- sur la face de sortie : la pression de refoulement est résistante, donc son travail est négatif, et on a :

$$\delta W_{p,s} = \mathcal{P}_{p,s} dt = - P_s S_s v_s dt = - P_s D_{V,s} dt = - P_s \frac{D_m}{\rho_s} dt$$

La somme $\delta W_{trans} = \delta W_{p,e} + \delta W_{p,s}$ est appelé **travail de transvasement**, c'est lui qui assure l'écoulement du fluide au travers de la machine.

2.2.3. 1er principe industriel (1er principe pour un système ouvert)

$$dE_f = \delta Q + \delta W_i + \delta W_{trans}$$

$$\delta m \left[\left(u_s + \frac{1}{2} v_s^2 + g z_s \right) - \left(u_e + \frac{1}{2} v_e^2 + g z_e \right) \right] = \delta Q + \delta W_i + P_e \frac{D_m}{\rho_e} dt - P_s \frac{D_m}{\rho_s} dt$$

que l'on peut aussi réécrire en remplaçant $D_m dt = \delta m$:

$$\delta m \left[\left(u_s + \frac{1}{2} v_s^2 + g z_s \right) - \left(u_e + \frac{1}{2} v_e^2 + g z_e \right) \right] = \delta Q + \delta W_i + \frac{P_e}{\rho_e} \delta m - \frac{P_s}{\rho_s} \delta m$$

$$\delta m \left[\left(u_s + \frac{P_s}{\rho_s} + \frac{1}{2} v_s^2 + g z_s \right) - \left(u_e + \frac{P_e}{\rho_e} + \frac{1}{2} v_e^2 + g z_e \right) \right] = \delta Q + \delta W_i$$

Par définition l'enthalpie s'exprime par $H = U + PV$ et si on divise par m on obtient l'enthalpie massique, soit $h = u + P/\rho$.

$$\delta m \left[\left(h_s + \frac{1}{2} v_s^2 + g z_s \right) - \left(h_e + \frac{1}{2} v_e^2 + g z_e \right) \right] = \delta Q + \delta W_i$$

Écriture « par unité de masse traversant » : en énergies massiques

On divise la relation précédente par δm , dont on rappelle qu'il s'agit de la masse qui entre, égale à la masse qui sort, de Σ_0 pendant dt .

Écriture massique du 1^{er} principe :

$$\left(h_s + \frac{1}{2} v_s^2 + g z_s \right) - \left(h_e + \frac{1}{2} v_e^2 + g z_e \right) = q + w_i$$

avec q le **transfert thermique massique** (en $J \cdot kg^{-1}$) reçu par le fluide et w_i le **travail indiqué massique**.

Remarque :

Le terme « massique » est à comprendre comme « par unité de masse traversante », et pas « par unité de masse du système ouvert » : la masse par laquelle on divise est $\delta m \neq m_0$.

Le transfert thermique massique correspond au transfert thermique que reçoit 1 kg de fluide entre son entrée et sa sortie du volume de contrôle Σ_0 .

Écriture « par unité de temps » : en puissance

On divise cette fois la relation par dt .

Écriture en puissance du premier principe :

$$D_m \left[\left(h_s + \frac{1}{2} v_s^2 + g z_s \right) - \left(h_e + \frac{1}{2} v_e^2 + g z_e \right) \right] = \mathcal{P}_{th} + \mathcal{P}_i$$

avec \mathcal{P}_{th} la **puissance thermique** (en W) reçue par le fluide et \mathcal{P}_i la **puissance indiquée**.

2.3. Bilan d'entropie : second principe pour le système ouvert

2.3.1. 2nd principe par unité de masse traversant (en entropies massique)

$$s_s - s_e = s_{éch} + s_{créée} = \frac{q}{T_{ext}} + s_{créée}$$

avec $s_{éch}$ l'entropie massique échangée au sein de Σ_0 et $s_{créée}$ l'entropie massique créée.

2.3.2. 2nd principe par unité de temps

$$D_m (s_s - s_e) = \frac{\delta S_{éch}}{dt} + \frac{\delta S_{créée}}{dt} = \frac{\mathcal{P}_{th}}{T_{ext}} + \frac{\delta S_{créée}}{dt}$$

Les causes de création d'entropie au sein d'un écoulement sont les causes classiques d'irréversibilité : inhomogénéités (principalement de température) et frottements de toute sorte, notamment la viscosité.

3. Quelques composants des installations industrielles

3.1. Détendeur

3.2. Compresseur, pompe et turbine

3.3. Tuyère

3.4. Échangeur thermique

3.5. Mélangeur

- 3.6. Séparateur
 - 3.7. Récapitulatif
- 4. Exemple : Pompe à chaleur air-eau, cycle de Joule inverse
 - 4.1. Structure de l'installation
 - 4.2. Étude du cycle en diagramme des frigoristes
 - 4.3. Coefficient de performance
 - 4.4. Réalisation technologique du cycle : surchauffe et sous-refroidissement
 - 5. Exemple : Centrale nucléaire REP, cycle de Rankine
 - 5.1. Structure d'une centrale nucléaire REP
 - 5.2. Étude du cycle en diagramme entropique
 - 5.3. Rendement
 - 5.4. Réalisation technologique du cycle