

# Machines thermiques

## I. Les machines dithermes

 **Définition :**  
On distingue deux types de machines thermiques :

- les machines **réceptrices** dont font partie les réfrigérateurs et les pompes à chaleur (ou PAC). Le principe de ces machines est de convertir de l'énergie d'origine mécanique en transfert thermique.
- les **moteurs** dont le but est la conversion d'énergie thermique en travail mécanique.

### 1 - Principe de fonctionnement

#### a) Les machines dithermes

On étudie dans ce chapitre les machines dithermes, c'est-à-dire fonctionnant avec deux thermostats de températures différentes. Ces machines contiennent un fluide qui peut échanger de l'énergie par transfert thermique avec ces sources de températures et un travail mécanique avec l'extérieur. On appellera source chaude, le thermostat de température  $T_C$  et source froide, le thermostat de température  $T_F$  (avec bien évidemment  $T_C > T_F$ ).

Dans un réfrigérateur ou un climatiseur, la source froide est l'air de l'espace à réfrigérer et la source chaude est composé de l'air extérieur. Dans les machines réceptrices, un compresseur, souvent électrique, va apporter en plus un travail mécanique au fluide caloporteur.

Dans un moteur à essence, la combustion des gaz va jouer le rôle de source chaude et l'air extérieur celui de la source froide. Le déplacement du piston permet d'obtenir un travail mécanique à l'issu des ces échanges thermiques.

#### b) Représentation

Par convention, on représente le fluide de la machine par un cercle, les sources par des rectangles.

Au cours du fonctionnement de la machine, le fluide échange de l'énergie sous



FIGURE 1.1 – Machine réceptrices usuelles : réfrigérateur, climatisation, pompe à chaleur



FIGURE 1.2 – Moteur à essence usuel pour tondeuse à gazon ou de paquebot.

forme de travail des forces de pression noté  $W$  ou de transfert thermique avec la source chaude notée  $Q_C$  et avec la source froide notée  $Q_F$ . Par convention, tous ces échanges thermiques sont orientés vers le fluide de la machine.

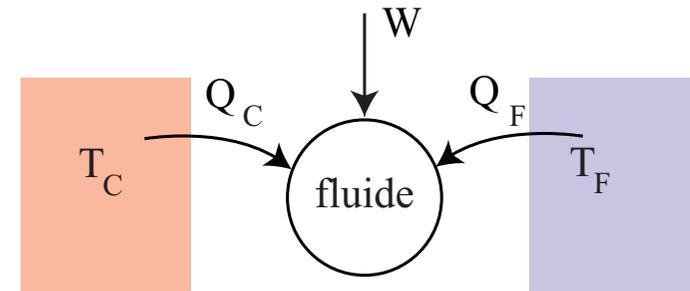


FIGURE 1.3 – Représentation symbolique d'une machine thermique ditherme

La diffusion thermique naturelle impose un transfert d'énergie spontanée de la source chaude vers la source froide. En fonctionnement récepteur, la machine thermique utilise un travail (en général par un compresseur) pour aller à l'encontre des échanges naturels d'énergie. Elle prélève de l'énergie à la source froide pour la relarguer à la source chaude.

#### Propriété :

En fonctionnement récepteur, la machine thermique utilise le travail ( $W > 0$ ) pour aller à l'encontre de la diffusion thermique ( $Q_C < 0$  et  $Q_F > 0$ ).

En fonctionnement moteur, la machine convertit le transfert thermique « naturel » en travail mécanique. Le fluide de la machine reçoit de l'énergie de la source chaude, en convertit une partie en travail mécanique et relargue l'énergie restante à la source froide.

#### Propriété :

Pour une machine motrice, les échanges d'énergie correspondent au transfert thermique « naturel » ( $Q_C > 0$  et  $Q_F < 0$ ) pour fournir un travail ( $W < 0$ ).

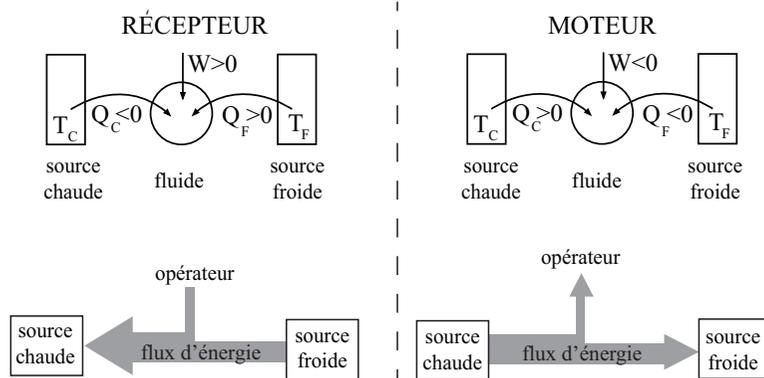


FIGURE 1.4 – Illustration des transferts d'énergie dans une machine thermique

## 2 - Efficacité et rendement

### a) Expression

Le rendement ou l'efficacité des machines thermiques correspondent à une valeur définie positive qui compare l'énergie utile (par exemple le travail mécanique d'un moteur) à l'énergie dépensée (par exemple le chauffage par la source chaude).

#### ▲ Définition :

On définit un **rendement** pour un moteur comme étant le rapport de la quantité d'énergie récupérée sous forme de travail par celle dépensée en chauffage  $Q_C$  :

$$\eta_{\text{moteur}} = \frac{-W}{Q_C}$$

#### ▲ Définition :

L'**efficacité** pour les machines réfrigérantes (noté  $e_F$ ) et les machines chauffantes de type pompe à chaleur (noté  $e_C$ ) est le rapport entre le transfert thermique utile  $Q_F$  (respectivement  $Q_C$ ) et le travail mécanique noté  $W$ .

$$e_F = \frac{Q_F}{W} \quad \text{et} \quad e_C = \frac{-Q_C}{W}$$

Le changement de dénomination pour les deux types de machines, motrice et réceptrice, s'explique par le fait que le rendement d'un moteur n'excède jamais 1 (soit 100%) tandis que les efficacités sont généralement de quelques unités. Pour un moteur à essence, le rendement est de l'ordre de 0,3 c'est à dire que seuls 30% de l'énergie de combustion est transformé en travail mécanique, le reste étant relargué à la source froide. Pour un réfrigérateur, une efficacité de 3 signifie que l'on transporte 3 fois plus d'énergie de la source froide vers la source chaude que l'on consomme d'énergie électrique.

#### 📌 Remarque 1 :

Au lieu des termes efficacité et rendement, on trouve également dans les notices industrielles le terme « coefficient de performance », désigné par C.O.P.

#### 🍃 Exemple 1

On dépose une masse  $m = 100$  g d'eau liquide à  $\theta_1 = 20^\circ\text{C}$  dans un congélateur dont la température intérieure est de  $\theta_2 = -20^\circ\text{C}$ .

- 1 - Pour un congélateur usuel d'efficacité  $e_F = 3$ , déterminer l'énergie consommée.
- 2 - Si le congélateur consomme une puissance électrique de 250 W, déterminer le temps nécessaire à la transformation. Commenter.

Données :



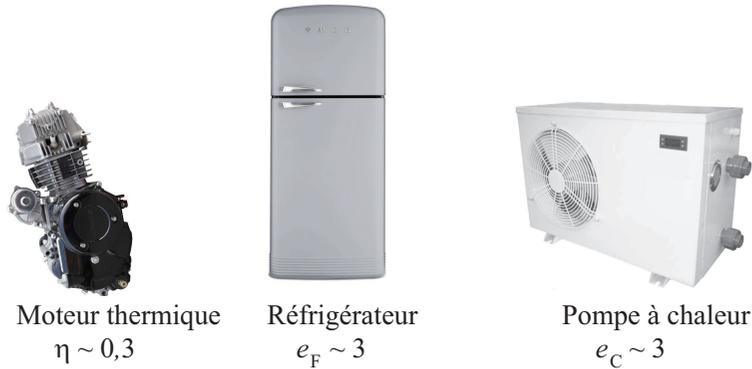
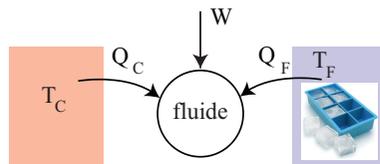


FIGURE 1.5 – Rendement et efficacité des machines usuelles

- capacité thermique de l'eau liquide :  $c_{liq} = 4,18 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$
- capacité thermique de l'eau - glace :  $c_{gl} = 2,06 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$
- enthalpie massique fusion de la glace :  $l_F = 330 \text{ kJ.kg}^{-1}$

1 - Le bac à glaçon est placé à la source froide.



Pour un refroidissement de l'eau, une solidification, puis un abaissement de la température, l'énergie extraite de l'eau est

$$Q_F = mc_{liq}(\theta_1 - \theta_{fus}) + ml_F + mc_{gl}(\theta_{fus} - \theta_2)$$

Avec les données on obtient :

$$Q_F \approx 45,0 \text{ kJ}$$

On remarquera que la quasi-totalité de l'énergie est utilisée pour le changement d'état ! Par définition de l'efficacité :

$$e_F = \frac{Q_F}{W}$$

On en déduit que l'énergie consommée vaut :

$$W = \frac{Q_F}{e_F} \approx 15,0 \text{ kJ}$$

2 - Pour une puissance  $\mathcal{P} = 250 \text{ W}$ , le temps nécessaire vérifie :

$$W = \mathcal{P} \times \Delta t \quad \text{soit} \quad \Delta t \frac{W}{\mathcal{P}} = 60 \text{ s}$$

En réalité, le temps est évidemment beaucoup plus long car les transferts thermiques entre le fluide et le bac sont lents.

### b) Théorème de Carnot

En 1811, Sadi Carnot, polytechnicien français démontre que les efficacités et rendement des machines dithermes ne peuvent dépasser une certaine valeur maximale, obtenue lorsque le cycle du fluide est constitué de transformations réversibles (au sens thermodynamique c'est à dire  $\mathcal{S}_{créée} = 0$ ).

En considérant que le fluide de la machine thermique effectue un cycle, l'application du premier principe au fluide permet d'écrire

$$\Delta U_{cycle} = W + Q_C + Q_F$$

L'énergie interne étant une fonction d'état  $\Delta U_{cycle} = 0$ , on en déduit que

$$W = -Q_C - Q_F$$

Le second principe appliqué au fluide donne :

$$\Delta \mathcal{S}_{cycle} = \mathcal{S}_{ech} + \mathcal{S}_{créée}$$

Par définition  $\mathcal{S}_{ech} = \frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F}$ . Sur un cycle, l'entropie étant une fonction d'état  $\Delta \mathcal{S}_{cycle} = 0$ . Comme  $\mathcal{S}_{créée} \geq 0$ , on en déduit l'inégalité de Clausius :

$$\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0$$

L'égalité est obtenue pour un cycle réversible. Il est possible de faire apparaître une valeur maximale du rendement ou de l'efficacité en fonction des températures. Par exemple pour un moteur, le rendement est donné par



FIGURE 1.6 – Sadi Carnot (1813)

$$\eta = -\frac{W}{Q_C}$$

En remplaçant l'expression du travail, on obtient :

$$\eta = \frac{Q_C + Q_F}{Q_C} = 1 + \frac{Q_F}{Q_C}$$

Faisons apparaître le rendement dans l'inégalité de Clausius

$$\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0 \quad \text{soit} \quad = \frac{Q_F}{Q_C} \leq -\frac{T_F}{T_C}$$

On en déduit que

$$\eta \leq 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

Ainsi quels que soient les choix de construction du moteur, le rendement ne pourra excéder la valeur  $1 - T_F/T_C$ .

### Remarque 2 :

Le calcul de l'efficacité maximale pour les machines réceptrices est identique, il est toutefois préférable de faire les calculs pour un cycle réversible afin d'éviter les problèmes dus aux inégalités et aux signes des transferts thermiques.

### Propriété :

L'efficacité ou le rendement maximal d'une machine ditherme est obtenue pour un cycle réversible, la valeur vaut alors :

$$\eta_{\text{moteur}}^{\text{max}} = \frac{T_C - T_F}{T_C}, \quad e_{\text{clim}}^{\text{max}} = \frac{T_F}{T_C - T_F}, \quad e_{\text{chauff}}^{\text{max}} = \frac{T_C}{T_C - T_F}$$

### Remarque 3 :

Le fonctionnement de certaines pompe à chaleur est dit « réversible ». Ce terme du langage courant n'est pas thermodynamique et indique simplement que la machine peut être utilisée en tant que chauffage ou climatisation.

Un moteur fonctionnant sur la base d'un cycle réversible a été inventé par Stirling au début du XIX<sup>e</sup> siècle. Ce type de moteur est dit à combustion externe ou « à air chaud » puisque l'air est maintenu dans deux pistons et chauffé par une source extérieure. On les oppose aux moteurs à combustion interne comme les moteurs à essence où l'énergie est apportée par l'explosion à l'intérieur du piston. Le moteur Stirling a été abandonné pendant plus d'un siècle en raison de sa puissance trop faible. Il refait son apparition au XXI<sup>e</sup> siècle où la présence de nouveaux matériau pourrait permettre son utilisation. Un projet de centrale électrique solaire où la source chaude est obtenue par concentration des rayons du soleil a vu le jour sans succès malgré un budget de 200 millions de dollars (projet Tessler Solar aux USA cf. fig.1.7).

La NASA tente également un projet de centrale nucléaire alimentant la source chaude d'un moteur stirling. Le but étant d'obtenir une source électrique pour les futurs spationautes en direction de Mars (cf. fig ??). Le générateur est développé en laboratoire depuis 2017, évidemment les risques d'une explosion du lanceur sur Terre doivent être minimisés pour éviter une catastrophe écologique...

## II. Machine en fonctionnement

### 1 - Transformation d'un gaz parfait

#### a) Les transformations dans le diagramme $P = f(V)$

La construction d'un cycle nécessite d'avoir en tête les différentes transformations possibles d'un gaz parfait dans le diagramme de Clapeyron

- Une transformation **isobare** s'effectue à  $P = C^{\text{te}}$ .



FIGURE 1.7 – Projet Tessera Solar, abandonné en 2010. Production théorique de 850 MW



FIGURE 1.8 – Kilopower project, Nasa, générateur électrique nucléaire de type Stirling, 2017

- Une transformation **isochore** s'effectue à  $V = C^{te}$ .
- Une transformation **isotherme** d'un gaz parfait implique la relation :  $P = nRT/V = C^{te}/V$ . La courbe reliant les deux états est donc une branche d'hyperbole
- Une transformation **adiabatique réversible** (ou isentropique) suit la loi de Laplace. La pente de la courbe reliant les deux états est plus importante qu'une transformation isotherme puisque  $\gamma > 1$  :

$$PV^\gamma = C^{te} \text{ soit } P = C^{te}/V^\gamma.$$

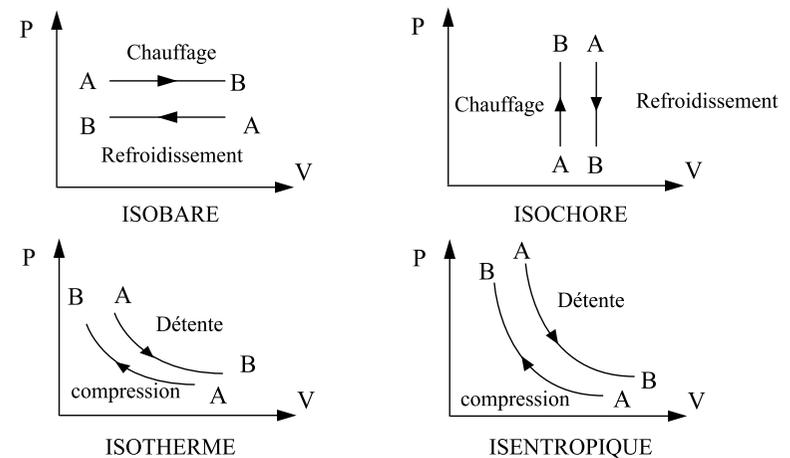


FIGURE 1.9 – Les différentes transformations

On rappelle que le gaz ne subit pas de transfert thermique seulement lors des transformations adiabatiques. Lors des transformations isothermes, isobares ou isochore, le transfert thermique  $Q$  existe et doit être calculé.



**Propriété :**

Le cycle de Carnot permet d'obtenir une efficacité maximale avec deux isothermes et de deux adiabatiques réversibles. Il s'agit d'un cycle réversible (cf. fig.1.10).

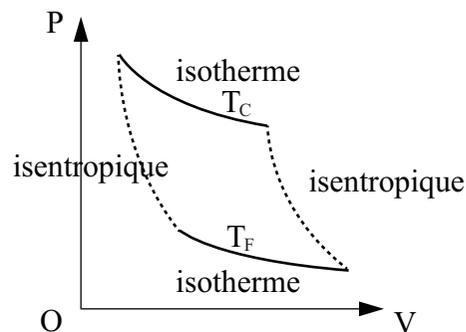


FIGURE 1.10 – Cycle de Carnot

### b) Sens de parcours

Pour décrire le principe de fonctionnement d'une machine, on considère que le fluide subit un cycle, c'est à dire une suite de transformations le ramenant à son état initial. Si cela est vérifié dans la plupart des réfrigérateurs et pompe à chaleur où le fluide est maintenue dans une canalisation, pour un moteur à combustion interne, l'air est expulsé par le pot d'échappement. On considèrera néanmoins que le fluide du moteur suit un cycle en considérant que l'air expulsé est thermodynamiquement équivalent à l'air aspiré.

On représente alors l'état du fluide dans le diagramme de Clapeyron (P,V) ou parfois (P,v) avec v le volume massique.

Le sens de parcours du cycle renseigne directement sur le type de machine étudié<sup>1</sup>. En effet, le travail des forces de pression défini par  $W = - \int_{cycle} PdV$  correspond à l'aire définie par le cycle. Le sens de parcours horaire donne une valeur positive de  $\int_{cycle} PdV$  et donc un travail négatif.

#### Propriété :

L'aire d'un cycle d'une machine thermique dans le diagramme (P,V) correspond au travail des forces de pression.

1. Des étudiants utilisent d'ailleurs l'astuce mémotechnique suivante : TRIGO-FRIGO pour ce rappeler qu'un cycle d'une machine réfrigérante est parcourue dans le sens trigonométrique

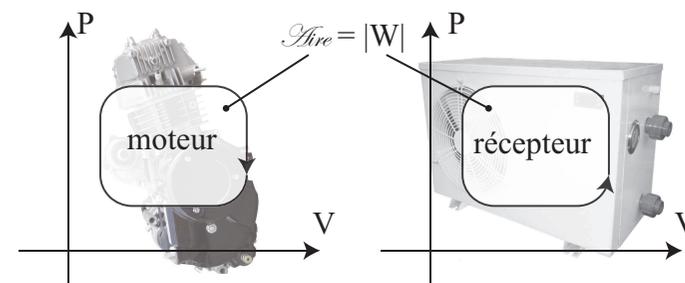


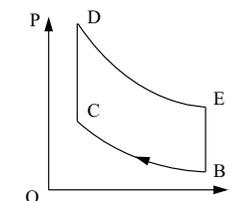
FIGURE 1.11 – Cycles moteur et récepteur

### c) Le moteur à essence

#### Exemple 2

*D'après Centrale 04, CCP 10*

Le cycle d'un moteur à explosion peut s'écrire de manière idéalisée par le cycle de Beau de Rochas ci-contre, comprenant deux transformations isochores et deux adiabatiques réversibles pour un gaz parfait. On notera  $\alpha = V_B/V_C$ , la quantité de chaleur due à l'explosion est reçue au cours de la transformation CD



- 1 - Le diagramme représentant le cycle thermodynamique renseigne-t-il sur le caractère moteur de la machine étudiée ?
- 2 - Préciser les relations liant P à V pour les transformations BC et DE du cycle.
- 3 - Définir le rendement  $\eta$  du cycle en fonction des quantités de chaleur reçues par le système au cours des transformations  $Q_{CD}$  et  $Q_{EB}$ . Établir l'égalité :  $\eta = 1 - \alpha^{1-\gamma}$ .
- 4 - Calculer  $\eta$  pour un moteur à essence de taux de compression  $\alpha = 10$ . On suppose que  $\gamma = 1,4$  pour le mélange air-essence.

1 - Le diagramme est parcouru dans le sens horaire, il s'agit donc bien d'un cycle moteur.

2 - La loi de Laplace s'applique pour les transformations adiabatiques réversibles BC et DE :

$$P_B V_B^\gamma = P_C V_C^\gamma \text{ et } P_D V_D^\gamma = P_E V_E^\gamma$$

soit

$$P_B \alpha^\gamma = P_C \text{ et } P_D = P_E \alpha^\gamma$$

car  $V_C = V_D$  et  $V_B = V_E$ .

3 - Le rendement d'un cycle moteur est donné par

$$\eta = -W/Q_C$$

où  $Q_C$  est le transfert thermique avec la source chaude et  $W$  le travail total.

Les phases DE et BC étant adiabatiques, on peut identifier le transfert avec la source chaude (explosion) et la source froide

$$Q_C = Q_{CD} \text{ et } Q_F = Q_{EB}$$

De plus, le premier principe sur un cycle du fluide permet d'écrire

$$\Delta U = 0 = W + Q_C + Q_F \text{ soit } W = -Q_C - Q_F$$

En injectant ces résultats dans l'expression du rendement, il vient :

$$\eta = 1 + \frac{Q_F}{Q_C}$$

Appliquons le premier principe aux transformations isochores EB et CD. Le travail lors d'une transformation isochore étant nul, il vient

$$\begin{cases} \Delta U_{EB} = W_{EB} + Q_{EB} = Q_{EB} \\ \Delta U_{CD} = W_{CD} + Q_{CD} = Q_{CD} \end{cases} \text{ soit } \begin{cases} Q_{EB} = C_V(T_B - T_E) \\ Q_{CD} = C_V(T_D - T_C) \end{cases}$$

En injectant ces résultats dans l'expression du rendement, il vient :

$$\eta = 1 + \frac{T_B - T_E}{T_D - T_C}$$

En utilisant la loi des gaz parfaits on obtient

$$\eta = 1 + \frac{(P_B - P_E)V_B}{(P_D - P_C)V_C}$$

En remplaçant les pressions par les valeurs obtenues à la question précédente, nous obtenons :

$$\eta = 1 + \frac{(P_B - P_E)}{(P_E \alpha^\gamma - P_B \alpha^\gamma)} \alpha$$

Nous pouvons conclure que

$$\eta = 1 - \alpha^{1-\gamma}$$

4 - Avec les données proposées par l'énoncé, on obtient :

$$\eta = 0,60$$

**Remarque 4 :**

Les rendements des moteurs électriques avoisinent les 100% mais pour un même volume, la quantité d'énergie embarquée dans les batteries est beaucoup faible que l'essence. La densité d'énergie de l'essence est de  $45 \text{ MJ.kg}^{-1}$  contre à peine  $1 \text{ MJ.kg}^{-1}$  pour les batteries Li-ion.



Le rendement d'un moteur à explosion étant une fonction croissante du taux de compression  $\alpha$ , le moteur à essence possède un rendement plus faible que son homologue à diesel. Des nouveaux moteurs à taux de compression variable (VCR) sont en cours d'études. Les moteurs MCE-5 VCRi testés sur banc moteur en janvier 2009 développent un couple de 420 Nm à 1 500 tr/min et une puissance maximale de 217 ch pour une cylindrée de seulement 1 484 cm<sup>3</sup>. Cette puissance est celle d'un moteur à allumage commandé classique 6 cylindres en V d'une cylindrée de 3 L tandis que le couple du MCE-5 est supérieur de 40% à ce même V6

FIGURE 1.12 – Moteur MCE-5

**2 - Limite des transformations idéales**

Les transformations isobares et isochores sont irréversibles. il existe toutefois des astuces expérimentales pour récupérer cette énergie -> système double flux.

A REDIGER AUTREMENT DIAG MIXTE DIESEL MODERNE?? SCHEMA POUR EXPLIQUER MIEUX

Pour les moteurs, il s'agit bien évidemment d'un rendement du cycle idéalisé. En pratique, le cycle est déformé à chaque point anguleux en raison de la course du piston.

Le diagramme réel d'un moteur à essence a une forme qui s'écarte sensiblement de celle du diagramme théorique étudié en classe. Tout d'abord, le travail (ici exagéré) nécessaire à l'admission et à l'échappement des gaz est non nul (partie basse de la courbe en « 8 »). En effet, l'ouverture et la fermeture des soupapes sont légèrement décalées par rapport à la position

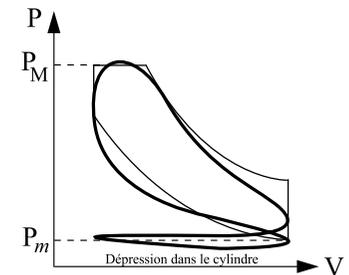


FIGURE 1.13 – Diagramme mixte et diagramme réel

haute du piston : lorsque, à la fin de l'échappement, le piston se trouve au point mort supérieur, la pression dans le cylindre est plus élevée que la pression atmosphérique. Si la soupape d'admission s'ouvrait à cet instant, les gaz frais à la pression atmosphérique, ne pourraient pas pénétrer immédiatement dans le cylindre. Pour cette raison, on ouvre la soupape d'admission avec un certain retard pour qu'il y ait une dépression.

Enfin, aussi bien la compression de l'air que la détente des gaz de combustion ne sont pas parfaitement adiabatiques : des échanges thermiques ont lieu pendant la compression (les parois du cylindre cèdent de la chaleur à l'air) et pendant la détente (une partie de la chaleur des gaz de combustion est transmise aux parois).

### 3 - Évolution temporelle

Si les sources ne sont pas des thermostats, c'est à dire lorsque leur capacité thermique n'est pas infinie, alors les températures des sources peuvent varier. Ceci influe sur l'efficacité de la machine, de façon immédiate pour les cycles réversibles. Le temps d'un cycle d'une machine thermique est en général beaucoup plus court que l'évolution temporelle des sources, par exemple, pour un moteur à explosion, la durée d'un cycle est de l'ordre de 50 ms tandis que la mise en température du moteur prend plusieurs minutes. Ainsi, un cycle d'une machine thermique est considéré comme une transformation infinitésimale au regard de l'évolution temporelle des sources températures. On remplace donc les échanges d'énergie par des échanges infinitésimaux notés  $\delta Q_C$ ,  $\delta Q_F$  et  $\delta W$ . Les écritures du premier principe et du second principe au fluide sur un cycle deviennent :

$$\begin{cases} dU_{cycle} = \delta W + \delta Q_C + \delta Q_F = 0 \\ dS_{cycle} = \delta S_{ech} + \delta S_{créée} = 0 \end{cases}$$

La température des sources étant variables, il est possible d'appliquer également le premier principe à ces sources. En supposant qu'il s'agit de phase indilatable et incompressible et tenant compte de l'orientation des échanges d'énergie, on obtient :

$$dU_C = -\delta Q_C \quad \text{et} \quad dU_F = -\delta Q_F$$

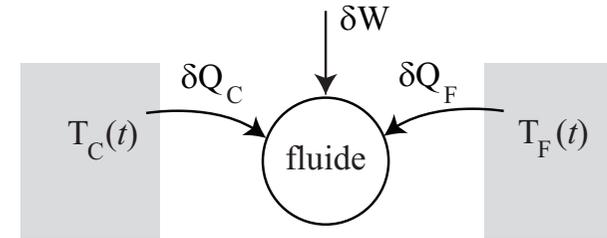


FIGURE 1.14 – Représentation d'une machine pour un cycle considéré comme une transformation infinitésimale

#### Exemple 3

Un moteur de Stirling fonctionne grâce à une masse  $m_1 = 100$  g d'eau chaude à la température  $\theta_C(t = 0) = 60^\circ\text{C}$ . Ce moteur fonctionne de manière réversible entre la source d'eau chaude et l'air extérieur de température constante  $\theta_F = 20^\circ\text{C}$ .

- 1 - Déterminer un critère d'arrêt pour le moteur.
- 2 - Déterminer le travail maximal récupérable par cette machine.

Données :  $c_{liq} = 4,18 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$

*D'après Oral CCP 15*



1 - En fonctionnement, le moteur prélève de l'énergie à la source chaude et la relargue à la source froide. La température  $\theta_C$  diminue et le moteur s'arrête lorsque la température de la source chaude est égale à la température de la source froide.

2 - Le rendement de ce moteur est défini par :

$$\eta = -\frac{\delta W}{\delta Q_C}$$

L'application du premier principe infinitésimal à la source chaude donne :

$$m_1 c dT_C = -\delta Q_C = \delta W / \eta$$

Notons  $T$  les températures en Kelvin, pour pouvoir exprimer le rendement. Pour

un fonctionnement réversible, le théorème de Carnot impose un rendement de  $\eta = (T_C - T_F)/T_C$ , il vient :

$$\delta W = m_1 c \frac{T_C - T_F}{T_C} dT_C$$

Pour obtenir le travail, intégrons en  $T_C^0$  et  $T_F$  :

$$W = m_1 c \int_{T_C^0}^{T_F} \left(1 - \frac{T_F}{T_C}\right) dT_C$$

On obtient donc

$$W = m_1 c \left(T_F - T_C^0 - \ln \frac{T_F}{T_C^0}\right)$$

Avec les valeurs numériques, on obtient un travail de

$$W = -12.5 \text{ kJ}$$

On peut alors définir un rendement moyen lors du fonctionnement. L'énergie utilisée est :

$$Q_C = m_1 c_{liq} (\theta_F - \theta_C(t=0)) = 16,7 \text{ kJ}$$

Le rendement moyen vaut donc :

$$\eta = \frac{-W}{Q_C} = 0,75$$