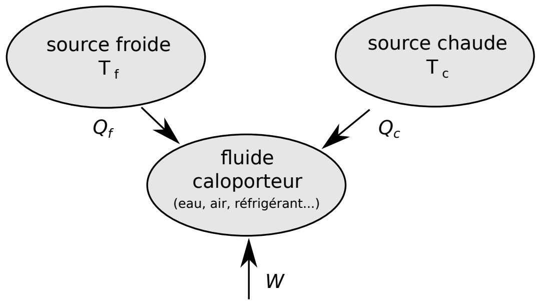
Partie II : Thermodynamique et mécanique des fluides
Rappels de 1re année

Machines thermiques

I Retour sur les machines thermiques

I.1 Les machines thermiques dithermes

Une classe importante de machines thermiques sont les *machines dithermes*, qui fonctionnent entre deux sources de chaleur : une froide et une chaude.



Dans une telle machine, un fluide caloporteur circule et effectue des cycles. Il reçoit pendant chaque cycle un travail W, un transfert thermique Q_f de la part de la source froide, et Q_c de la part de la source chaude.

L'entropie et l'énergie interne du fluide sont des fonctions d'état. Comme à chaque cycle le fluide revient dans le même état, U et S n'ont pas changé.

$\rightarrow$ On a $\Delta U = 0$ et $\Delta S = 0$ pour un cycle.

Le premier et le second principe appliqués au système fermé {tout le fluide dans la machine} lors d'un cycle indiquent donc :

$$\boxed{0 = \Delta U = W + Q_f + Q_c, \qquad 0 = \Delta S = S_e + S_c.}$$

On suppose en général que les sources de chaleur agissent comme des thermostats : leur température est constante, et on a donc $S_e = \dfrac{Q_f}{T_f} + \dfrac{Q_c}{T_c}$. De plus, $S_c \geq 0$. Les deux principes s'écrivent donc aussi :

$$\boxed{W + Q_f + Q_c = 0, \qquad \frac{Q_f}{T_f} + \frac{Q_c}{T_c} = -S_c \leq 0.}$$

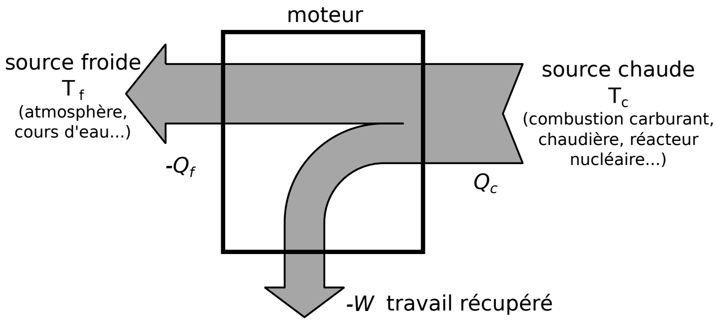
Remarque : En toute rigueur, c'est à l'ensemble de la machine thermique qu'on applique les principes, et pas seulement à l'ensemble du fluide. Ceci permet de ne pas considérer les éventuels transferts qui ont lieu au sein de la machine (cf moteur de Stirling avec régénérateur par exemple).

Remarque : Considérons une machine monotherme (une seule source de chaleur à T_0 qui fournit un transfert Q_0).
$\rightsquigarrow_1$ Montrer qu'elle ne peut pas être motrice.
Même raisonnement $W + Q_0 = 0$ et $\dfrac{Q_0}{T_0} = S_e = -S_c \leq 0$. On en déduit $W = -Q_0 \geq 0$.

Ceci montre qu'il n'existe pas de machine thermique motrice (où on aurait $W < 0$) monotherme. Il faut au minimum deux sources, une de température élevée pour fournir l'énergie thermique, et une de température plus basse qui récupère une partie de l'énergie thermique (celle qui n'a pas été convertie en travail).

I.2 Moteur, réfrigérateur, pompe à chaleur

a – Machine thermique motrice

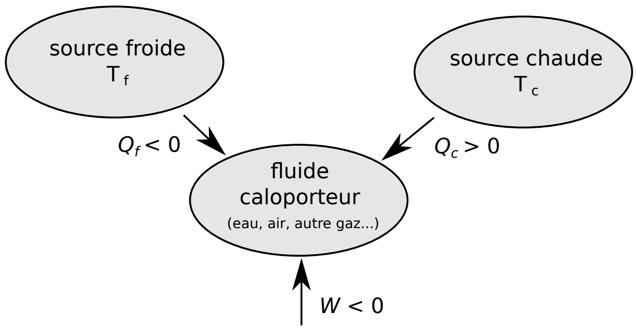


Objectif : Produire un travail afin de faire tourner un arbre moteur.

La source d'énergie est une source chaude :

- la combustion d'un mélange air-carburant pour les moteurs à explosion ou les turboréacteurs,
- la chaleur produite par une chaudière alimentée par combustion de matériaux fossiles (gaz, charbon) ou nucléaires.

Le schéma général est donc celui dessiné à droite.



b – Machine thermique réceptrice : réfrigérateur ou pompe à chaleur

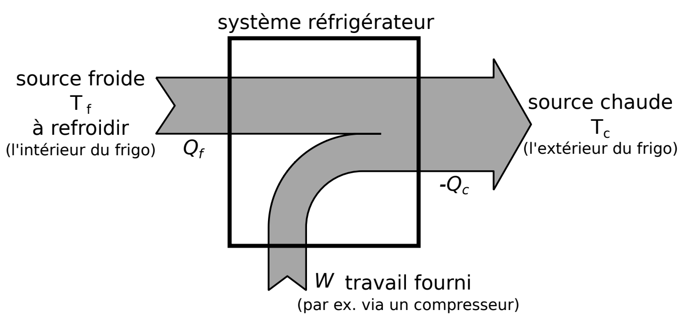
Objectif : forcer le transfert de l'énergie thermique dans le sens "non spontané", c'est-à-dire le faire aller de la source froide vers la source chaude.

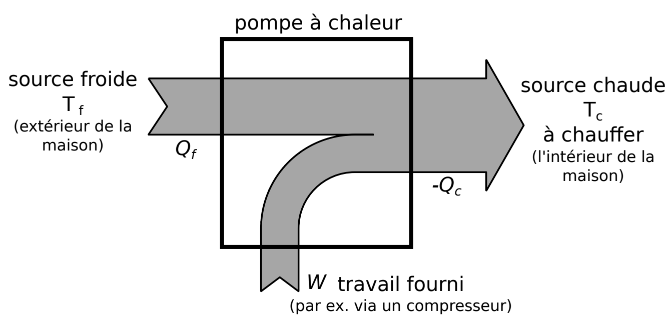
Ceci requiert une **source d'énergie** : **le fluide reçoit un travail positif.**
Ceci se fait en général via un compresseur. Le compresseur reçoit un travail électrique $W_{\text{élec}}$ et le transfert au fluide sous la forme d'un travail $W_{\text{reçu par fluide}}$.
Il le fait avec un certain rendement $\eta_{\text{comp}} = W_{\text{reçu par fluide}}/W_{\text{élec}}$.

Le schéma général est donc celui dessiné ci-dessous. On notera que que le sens des échanges thermiques est le même pour réfrigérateur ou pompe à chaleur. Mais :

- Un réfrigérateur est optimisé pour refroidir la source froide (son compartiment interne).
- Une pompe à chaleur est optimisée pour réchauffer la source chaude (la pièce à chauffer).

La définition des rendements n'est donc pas la même.





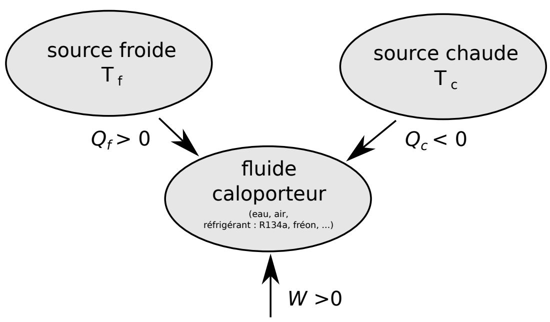


Tableau récapitulatif

(il faut savoir redémontrer l'expression des rendements ou efficacités dans chacun des trois cas)

	Moteur	Réfrigérateur	Pompe à chaleur
Grandeur utile	$-W$	Q_f	$-Q_c$
Grandeur coûteuse	Q_c	W	W
Rendement ou efficacité	$\eta = \dfrac{-W}{Q_c}$ soit $\eta = \dfrac{Q_c + Q_f}{Q_c}$	$e = \dfrac{Q_f}{W}$ soit $e = \dfrac{Q_f}{-Q_c - Q_f}$	$e = \dfrac{-Q_c}{W}$ soit $e = \dfrac{Q_c}{Q_c + Q_f}$
Expression dans le cas réversible car 2nd ppe $\Rightarrow \frac{Q_f}{Q_c} = -\frac{T_f}{T_c}$	$\eta = 1 - \dfrac{T_f}{T_c} \leq 1$	$e = \dfrac{T_f}{T_c - T_f} \in [0, +\infty[$	$e = \dfrac{T_c}{T_c - T_f} > 1$
Ordres de grandeur réels	<u>Moteur de voiture :</u> $\eta = \frac{-W_{\text{arbre moteur}}}{Q_c} \sim 0.3$ Puissance : $P \sim 100\,\text{kW}$. <u>Moteur de train :</u> Puissance : $P \sim 1\,\text{MW}$. <u>Turbine pour production d'électricité :</u> $\eta = \frac{-W_{\text{arbre turbine}}}{Q_c} \sim 0.4$ Puissance : $P \sim 100\,\text{kW}$ à $300\,\text{MW}$.	Réfrigérateur domestique : $e \sim 1.5$ $P_{\text{elec}} \sim 200\,\text{W}$, donc $\dot{Q}_f = e \times P_{\text{elec}} \sim 300\,\text{W}$	Pompe à chaleur domestique : $e = \frac{-Q_c}{W_{\text{elec}}} \sim 3$

L'efficacité est aussi appelée coefficient de performance (COP).

I.3 Sens de parcours du cycle

Nous redémontrerons en cours que, dans les diagrammes p-v, p-V, T-s :

- Pour un moteur $\rightarrow$ sens horaire .
- Pour une machine réceptrice (réfrigérateur ou pompe à chaleur) $\rightarrow$ sens antihoraire.

I.4 Création d'entropie et incidence sur le rendement ou l'efficacité

L'expression du rendement dans le cas réversible est le rendement maximal que l'on peut atteindre.

$\rightsquigarrow_2$ Démontrer la proposition ci-dessus dans le cas d'un moteur.
On utilise à nouveau $W + Q_f + Q_c = 0$ et $\dfrac{Q_f}{T_f} + \dfrac{Q_c}{T_c} = -S_c$.
Après quelques manipulations on arrive à

$$\eta = \frac{-W}{Q_c} = 1 - \frac{T_f}{T_c} - \frac{T_f}{Q_c} S_c$$

$$\boxed{\eta = \eta_{\text{réversible}} - \frac{T_f}{Q_c} S_c.}$$

Comme $S_c \geq 0$, et pour un moteur $Q_c > 0$, ce rendement est toujours inférieur à celui du cas réversible, et d'autant plus que la création d'entropie sur un cycle est grande.

Remarque : On peut montrer de la même façon que pour un réfrigérateur : $e = \dfrac{T_f}{T_c - T_f + T_f T_c S_c / Q_f} < e_{\text{réversible}}$,
et que pour une pompe à chaleur : $e = \dfrac{T_c}{T_c - T_f + T_f T_c S_c / |Q_c|} < e_{\text{réversible}}$.

$\rightarrow$ Ces démonstrations montrent que la création d'entropie au cours d'un cycle est équivalente à une baisse de rendement ou d'efficacité.

On peut donc affirmer la suite d'équivalences suivante :

Création d'entropie.

$\Leftrightarrow$

Baisse de rendement ou d'efficacité.

$\Leftrightarrow$

De l'énergie disponible a été mal utilisée.
On parle de **dégradation** de l'énergie, ou de **dissipation** de l'énergie : l'énergie passe d'une forme exploitable (c'est-à-dire qui pourrait produire un travail) à une forme où elle ne l'est plus ou moins. Elle a été dissipée.

Attention, l'énergie ne disparaît pas : le 1$^{\text{er}}$ principe stipule la conservation de l'énergie. Mais le 2$^{\text{nd}}$ permet de chiffrer sa dissipation en donnant les outils pour calculer S_c, et donc la baisse de rendement.

Exemples d'irréversibilités :

- **Frottements :** Les frottements sont en fait la dégradation d'une énergie mécanique 100% récupérable, qui est transférée sous forme thermique vers le milieu ambiant. Cette énergie ne peut plus être exploitée.

- **Inhomogénéités de température :** Un transfert thermique d'une zone à $T_1 > T_2$ directement vers une zone à T_2 dégrade l'énergie.

  En effet, on aurait pu faire fonctionner un moteur entre ces deux sources pour en extraire du travail. Si on laisse le transfert se faire directement, il y a gâchis d'énergie, donc baisse de rendement et création d'entropie.

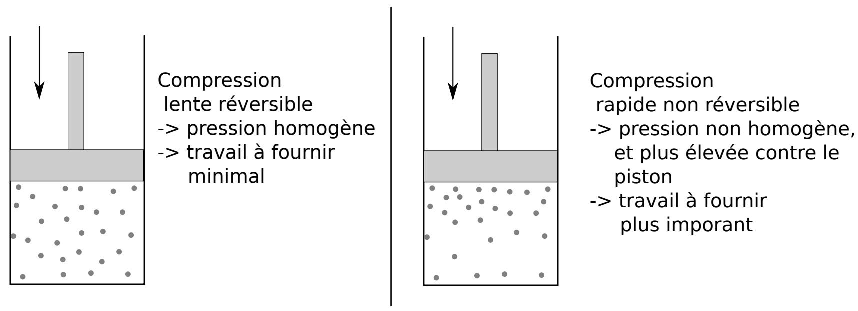
  Cas particulier : pour être réversibles, les transferts thermiques entre le fluide et les sources (chaude ou froide) doivent donc être tels que $T_{\text{fluide}} = T_{\text{ext}}$, avec T_{ext} la température de la source. On retrouve un résultat déjà énoncé : $T = T_{\text{ext}}$ pour une évolution réversible.

  En pratique, un transfert thermique avec $T_{\text{fluide}} = T_{\text{ext}}$ est infiniment lent. Il y a donc des différences de températures dans les machines réelles.

- **Inhomogénéités de pression :** La présence d'une différence de pression entre deux zones peut permettre de mettre en mouvement des parties mobiles et donc de récupérer du travail. Si on laisse cette différence de pression s'uniformiser sans l'exploiter, alors il y a gâchis d'énergie, baisse de rendement et création d'entropie.

  En pratique, il y a inhomogénéité de pression lorsque la transformation est brusque. Une transformation trop rapide est donc synonyme d'énergie mal exploitée, de baisse de rendement et de création d'entropie.

  Exemple de l'incidence d'une compression rapide et de la pression non homogène :



  On voit qu'il faut fournir plus de travail pour comprimer. Ce travail ne sert pas à faire tourner l'axe moteur, il y a donc baisse de rendement (et donc création d'entropie).

  De même lors de la détente : une détente trop rapide implique une dépression au niveau du piston, donc le gaz "pousse moins" sur le piston et le travail récupéré est moindre. Il y a donc baisse de rendement (et donc création d'entropie).

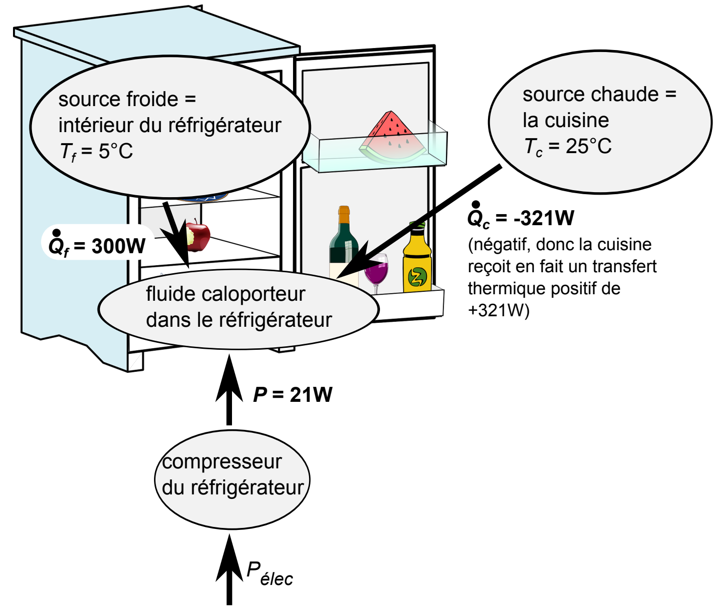
  Notons qu'on retrouve un résultat déjà énoncé : $p = p_{\text{ext}}$ pour une évolution réversible.

Illustration sur le réfrigérateur : On considère un réfrigérateur, d'efficacité réversible $e_{\text{rév}} = \dfrac{T_f}{T_c - T_f} = 14$. Pour fonctionner normalement, il doit extraire 300 J du compartiment froid par seconde, soit donc 300 W.

$\rightsquigarrow_3$ Compléter les schémas ci-dessous avec les valeurs des puissances $\dot{Q}_c$ et P.

Fonctionnement réversible, S_c=0 - $e_{rév}$ = 14

Le réfrigérateur réversible ne dégrade pas inutilement le travail électrique fourni en transfert thermique vers la cuisine. **Ce travail est utilisé au mieux pour atteindre l'objectif** : refroidir l'intérieur du réfrigérateur.



Fonctionnement réel, avec S_c>0 - $e_{réel}$ = 1.5

Il faut fournir **plus de puissance électrique** pour le même objectif (extraire 300W de l'intérieur du réfrigérateur).
Pourquoi ? Car une partie de la puissance électrique est inutilement dégradée en transfert thermique vers la cuisine.

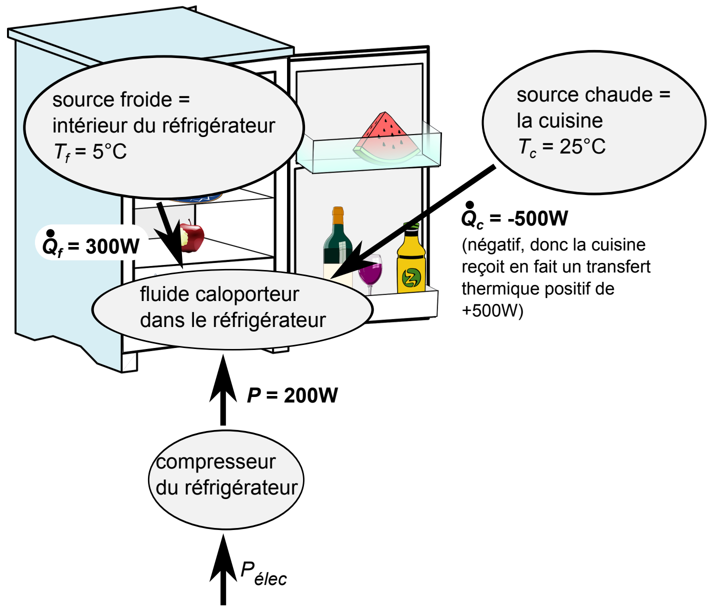
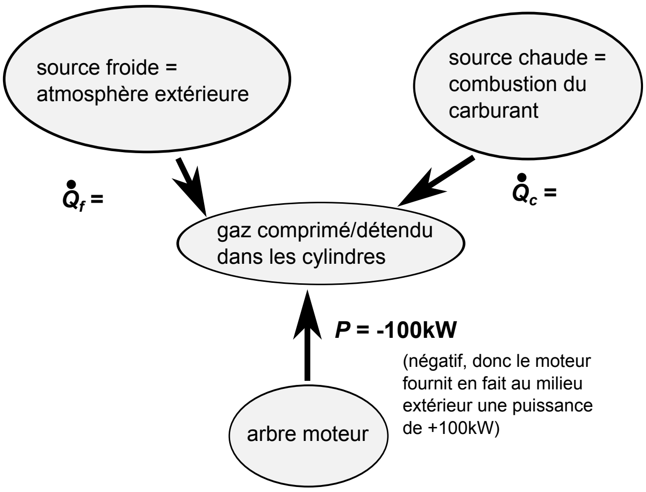


Illustration sur le moteur :
On considère un moteur de voiture, de rendement réversible $\eta_{\text{rév}} = 0.6$ (voir DM), et qui doit fournir à l'arbre moteur une puissance typique de 100 kW. Le rendement réel est plutôt $\eta_{\text{réel}} = 0.3$.

$\rightsquigarrow_4$ Compléter les schémas ci-dessous avec les valeurs des puissances thermiques.

Fonctionnement réversible, S_c=0 - rendement = 0.6

Le moteur réversible ne dégrade pas inutilement la puissance thermique fournie.
Elle est utilisée au mieux pour atteindre l'objectif : produire un travail.



Fonctionnement réel, avec S_c>0 - rendement = 0.3

Il faut fournir **plus de puissance thermique** pour le même objectif (produire 100kW sur l'arbre moteur).
Pourquoi ? Car une partie de la puissance thermique est dégradée inutilement en transfert thermique vers l'atmosphère au lieu de produire du
travail.

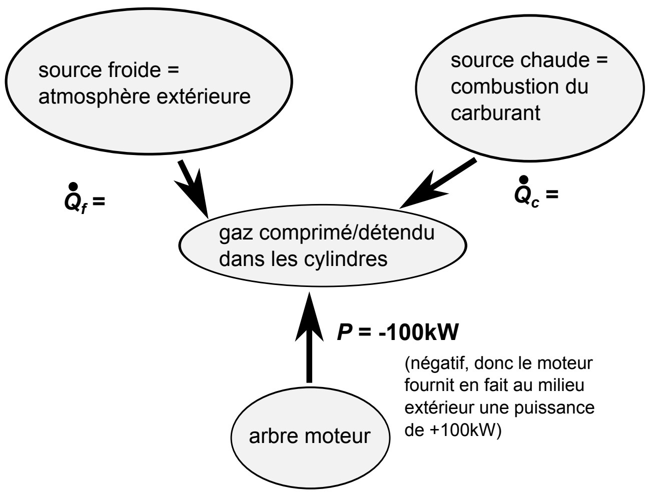


Illustration sur la pompe à chaleur :

L'objectif est de fournir une puissance thermique $\dot{Q}_c = 5\,\mathrm{kW}$ à l'intérieur de la maison (qui est la source chaude, à $T_c = 20°\mathrm{C}$).

Il faut pour cela fournir une puissance P à la pompe (puissance qui vient du réseau électrique).

La source froide est l'extérieur de la maison, à $T_f = 0\,°\mathrm{C}$.

$\rightsquigarrow_5$ Répondre aux questions ci-dessous, et reporter les réponses sur un schéma similaire à celui du réfrigérateur ou du moteur.

- Pompe à chaleur réversible : calculer son efficacité, en déduire la puissance P consommée par l'utilisateur et la puissance thermique $\dot{Q}_f$ reçue depuis l'extérieur de la maison.

- Pompe à chaleur réelle avec irréversibilités : la puissance fournie n'est pas exploitée de façon optimale pour atteindre l'objectif. L'efficacité est plutôt de l'ordre de 3. En déduire alors les valeur de la puissance consommée et de $\dot{Q}_f$.