

CHAPITRE 6

Cycles thermodynamiques

— ou —

Un pas vers la sorcellerie mécanique de la chaleur

Chapitre 6 – Cycles thermodynamiques

6.1 Conventions de signe	169
6.2 Transformer chaleur et travail	171
6.2.1 Construire des cycles thermodynamiques	171
6.2.2 Produire un travail à partir de chaleur	171
6.2.3 Extraire de la chaleur avec du travail	174
6.3 Rendement des cycles	179
6.3.1 Rendement d'un moteur	179
6.3.2 Rendement d'un réfrigérateur ou d'un climatiseur	180
6.3.3 Rendement d'une pompe à chaleur	182
6.3.4 De la faible performance des machines	183
6.4 Exercices	184

Le chapitre 6 en bref

Lorsqu'on chauffe un fluide comprimé, il fournit plus de travail à la détente qu'on en avait dépensé à la compression. En détendant un fluide, on fait chuter sa température et on peut ainsi absorber de la chaleur d'un corps plus « froid ». Avec ces deux procédés, nous transformons chaleur en travail et inversement.

Introduction

Grâce aux chapitres 4 et 5, nous avons appris à quantifier l'énergie dans des fluides en fonction de leurs propriétés. Nous allons désormais les utiliser dans des machines pour transformer chaleur en travail, et travail en chaleur. Dans ce chapitre 6 (*cycles thermodynamiques*), nous souhaitons formaliser la notion cycle, en répondant à deux questions :

- Comment fonctionnent les moteurs, réfrigérateurs et pompes à chaleur ?
- Comment quantifier leur efficacité ?

6.1 Conventions de signe

Nous commençons par convenir de quelques notations graphiques et de notation, qui sont résumées en figure 6.1.

Nous utilisons de larges flèches blanches pour représenter *le sens physique des transferts*. Nous ne modifions pas notre convention de signe (les transferts sont positifs vers le système et négatifs lorsqu'ils en proviennent), mais seulement la convention graphique pour les orienter, afin de rendre la visualisation des transferts dans les machines plus intuitive.

La somme algébrique du travail reçu \dot{W}_{in} et fourni \dot{W}_{out} par une machine est nommé le *travail net* \dot{W}_{net} . Le travail net peut être positif (reçu par la machine de l'extérieur) ou négatif (fourni par la machine de l'extérieur), selon le type

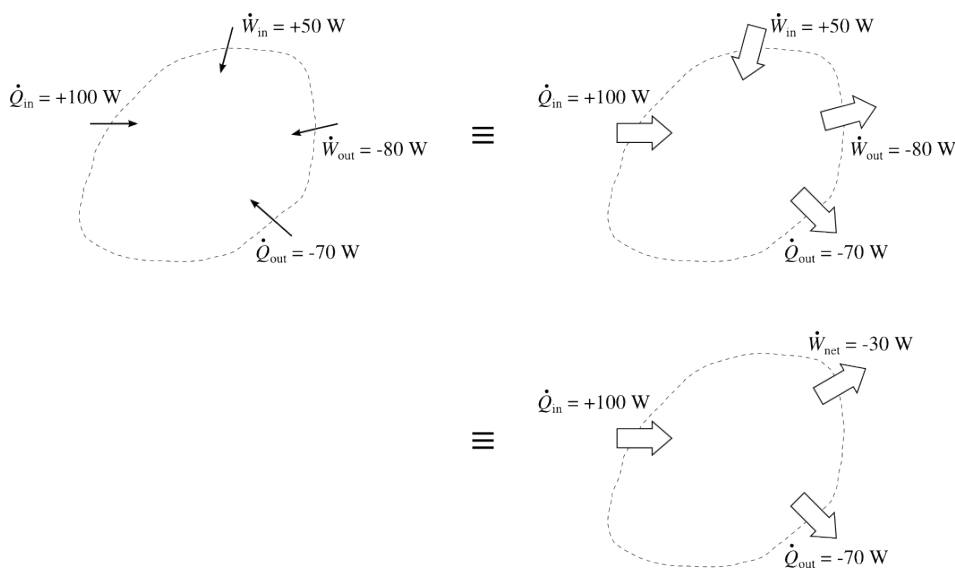


FIGURE 6.1 – Nouvelles conventions graphiques et de notation des transferts énergétiques. Les flèches blanches sont orientées selon le sens physique des transferts ; La somme algébrique de tous les travaux est représentée par un unique transfert nommé *travail net*.

schéma CC-0 o.c.

d'application.

$$\begin{aligned}W_{\text{net}} &\equiv W_{\text{in}} + W_{\text{out}} \\ \dot{W}_{\text{net}} &\equiv \dot{W}_{\text{in}} + \dot{W}_{\text{out}} \\ w_{\text{net}} &\equiv w_{\text{in}} + w_{\text{out}}\end{aligned}\tag{6/1}$$

On définit la *chaleur nette* de la même façon :

$$\begin{aligned}Q_{\text{net}} &\equiv Q_{\text{in}} + Q_{\text{out}} \\ \dot{Q}_{\text{net}} &\equiv \dot{Q}_{\text{in}} + \dot{Q}_{\text{out}} \\ q_{\text{net}} &\equiv q_{\text{in}} + q_{\text{out}}\end{aligned}\tag{6/2}$$

Ainsi, par exemple, un moteur automobile reçoit une chaleur nette positive et produit un travail net négatif.

6.2 Transformer chaleur et travail

6.2.1 Construire des cycles thermodynamiques

Nous souhaitons comparer différentes manières de transformer travail et chaleur. Pour que ces comparaisons soient valables, il faut que nous tenions toujours compte de *toutes* les transformations subies par le fluide jusqu'à ce qu'il soit revenu à son état initial.

Par exemple, il est aisé de refroidir une pièce avec une bouteille d'air comprimé (il suffit de faire travailler le fluide pendant sa détente pour que sa température chute) ; mais si nous voulons refroidir la pièce en continu, alors il nous faut aussi tenir compte de l'énergie nécessaire pour *ramener* l'air dans la bouteille, à sa pression et température initiales, à la fin du processus.

Un second exemple est celui d'un moteur automobile, qui rejette de la chaleur emportée par les gaz d'échappement. Pour tenir compte de cette énergie perdue, nous comptabilisons la chaleur qu'il faudrait prélever aux gaz pour les ramener à la température d'entrée du moteur. Ce refroidissement imaginaire a lieu en dehors du moteur en pratique, mais d'un point de vue thermodynamique, il fait partie intégrante du processus de transformation énergétique.

Ainsi, à chaque fois que nous allons analyser le fonctionnement d'une machine thermique, nous allons prendre soin de poursuivre l'évolution du fluide jusqu'à le ramener à son état initial (même température, même pression, même énergie interne, etc.). Nous disons alors qu'il a parcouru un *cycle thermodynamique* (§2.3).

6.2.2 Produire un travail à partir de chaleur

Commençons par comprimer un fluide : nous augmentons sa pression et réduisons son volume spécifique, ce qui nous demande un certain travail. Après cela, chauffons ce fluide : sa pression et son volume ont tendance à augmenter. En détendant le gaz jusqu'à sa pression initiale, nous allons récupérer un travail plus grand que celui que nous avons investi à l'aller. Pour pouvoir enfin ramener le fluide à son état initial, il faut le refroidir.

Au final, le fluide a dépensé moins de travail au chemin retour qu'il en a reçu à l'aller. Sur un cycle, il aura donc *produit* du travail et absorbé (plus exactement, *transformé*) de la chaleur. C'est le principe de fonctionnement d'un moteur.

Il y a une infinité de cycles possibles pour effectuer cette transformation, mais ils comportent tous au moins quatre transferts énergétiques : une compression, un réchauffement, une détente, et un refroidissement. Nous pouvons séparer ces évolutions dans l'espace, comme représenté en figure 6.2, ou bien dans le temps, comme montré en figure 6.3. En fonction des contraintes technologiques et pratiques, certains de ces transferts peuvent être effectués simultanément.

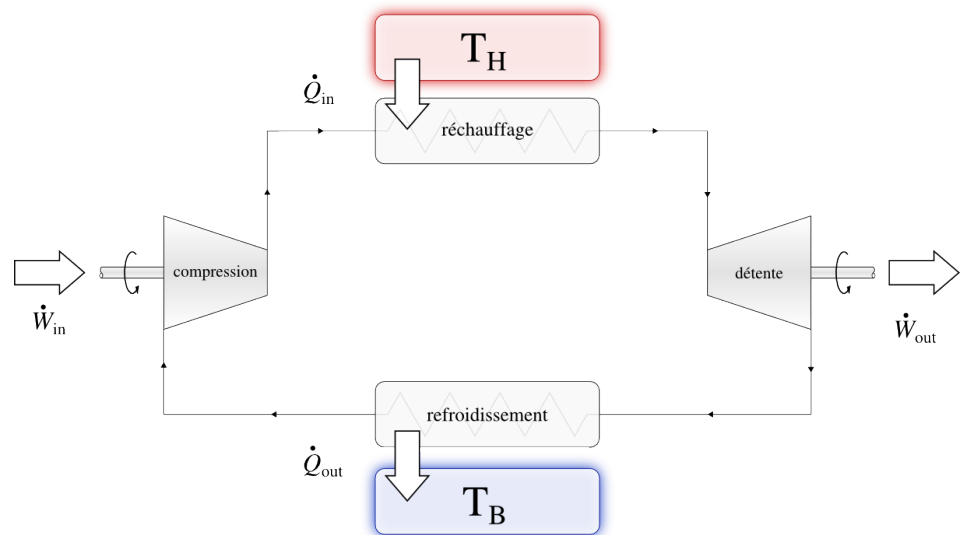


FIGURE 6.2 – Cycle thermodynamique moteur. Le fluide absorbe de la chaleur fournie à haute température T_H . la puissance de compression est plus faible que la puissance à la détente : la puissance nette sous forme de travail $\dot{W}_{net} = \dot{W}_{in} + \dot{W}_{out}$ est négative.

schéma CC-0 o.c.

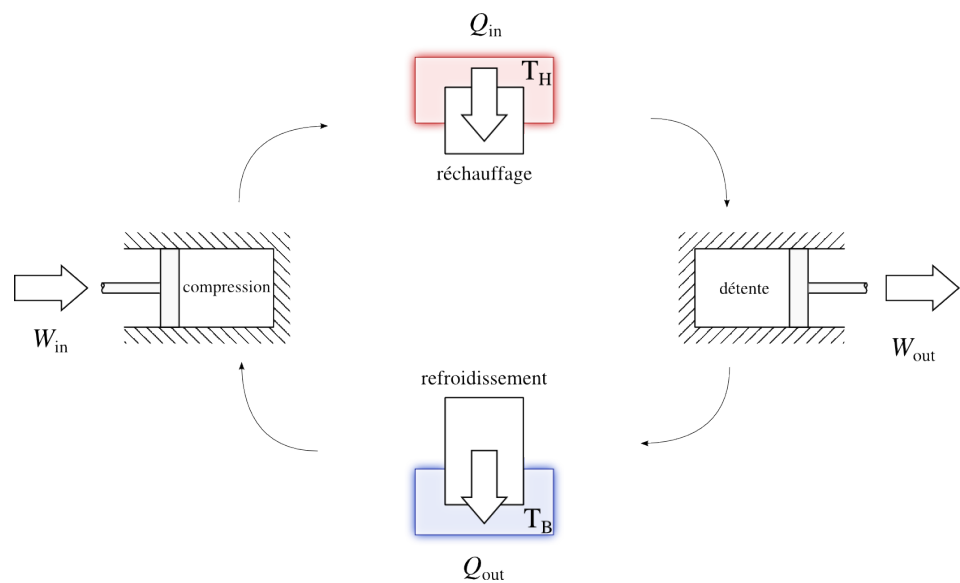


FIGURE 6.3 – Cycle thermodynamique moteur effectué en séparant les étapes dans le temps (plutôt que dans l'espace comme représenté en figure 6.2). Le fluide est réchauffé par une source de chaleur à haute température T_H . Le travail net $W_{net} = W_{in} + W_{out}$ est négatif.

schéma CC-0 o.c.

Il est possible de lier mécaniquement les sections consommant et fournissant de l'énergie sous forme de travail. Dans le cas où le fluide circule en continu, on peut lier le compresseur et la turbine par un même axe, comme représenté en figure 6.4. Dans le cas où les évolutions sont séparées dans le temps, comme dans un moteur à explosion, on peut lier les évolutions en effectuant plusieurs cycles déphasés simultanément (avec plusieurs cylindres) ou en stockant de l'énergie dans un volant d'inertie. On obtient alors directement une puissance \dot{W}_{net} à la sortie du moteur.

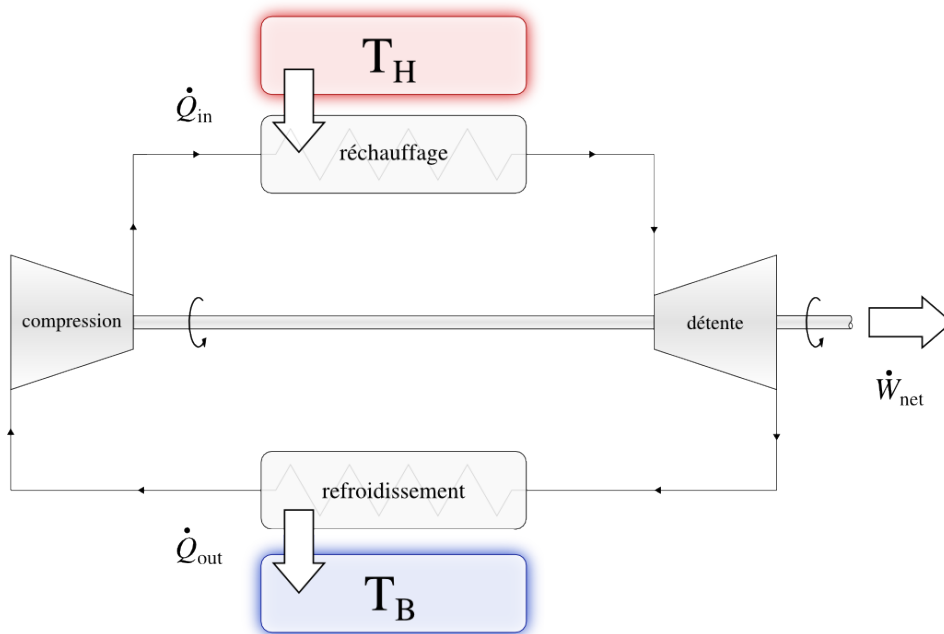


FIGURE 6.4 – Cycle thermodynamique moteur, pour lequel le compresseur et la turbine sont reliés mécaniquement. Comme la turbine fournit une puissance \dot{W}_{out} supérieure à celle consommée par le compresseur (\dot{W}_{in}), elle est capable non seulement de l'entraîner mais de fournir un excédent \dot{W}_{net} vers l'extérieur.

schéma CC-0 o.c.

6.2.3 Extraire de la chaleur avec du travail

Lorsque l'on fournit du travail à un fluide, sa température augmente¹, et il peut ainsi fournir de la chaleur à un corps qui était initialement à plus haute température (« plus chaud ») que lui.

À l'inverse, lorsque l'on détend un fluide, sa température baisse, et il peut ainsi capter de la chaleur à un corps qui était initialement « plus froid » que lui.

En effectuant ces étapes l'une après l'autre, nous obtenons un *cycle de réfrigération* : une machine capable de prélever de la chaleur à basse température et de la rejeter à haute température. Un tel cycle est représenté en figure 6.5 (étapes séparées dans l'espace) et 6.6 (étapes séparées dans le temps).

Un examen attentif de ces deux figures réserve une surprise de taille : il s'agit exactement du même agencement que pour un moteur ! La seule différence porte sur les températures de fonctionnement. La température atteinte pendant la compression doit être **supérieure à la température haute** T_H , et la température atteinte pendant la détente doit être **inférieure à la température basse** T_B . Si ces conditions ne sont pas respectées, alors les transferts de chaleur ne peuvent se faire dans le sens voulu.

Dans un cycle de réfrigération, le fluide a un plus grand volume lorsqu'il est comprimé que lorsqu'il est détendu : ainsi la compression demande plus de

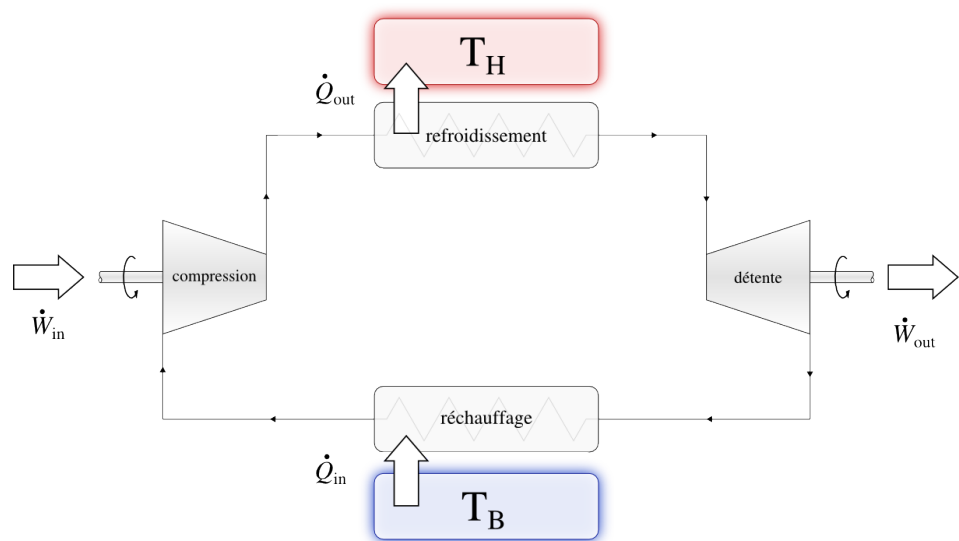


FIGURE 6.5 – Cycle thermodynamique de refroidissement, utilisé dans les réfrigérateurs, climatiseurs, et pompes à chaleur.

Une puissance \dot{Q}_{in} sous forme de chaleur est captée à basse température (le fluide est réchauffé) tandis qu'une puissance \dot{Q}_{out} est rejetée à haute température (le fluide est alors refroidi).

schéma CC-0 o.c.

1. Ce n'est pas strictement vrai pour les liquides/vapeurs qui, comme nous l'avons vu dans le chapitre 5 (*liquides et vapeurs*), connaissent une phase à température constante entre leurs points de saturation – toutefois, ils suivent cette tendance.

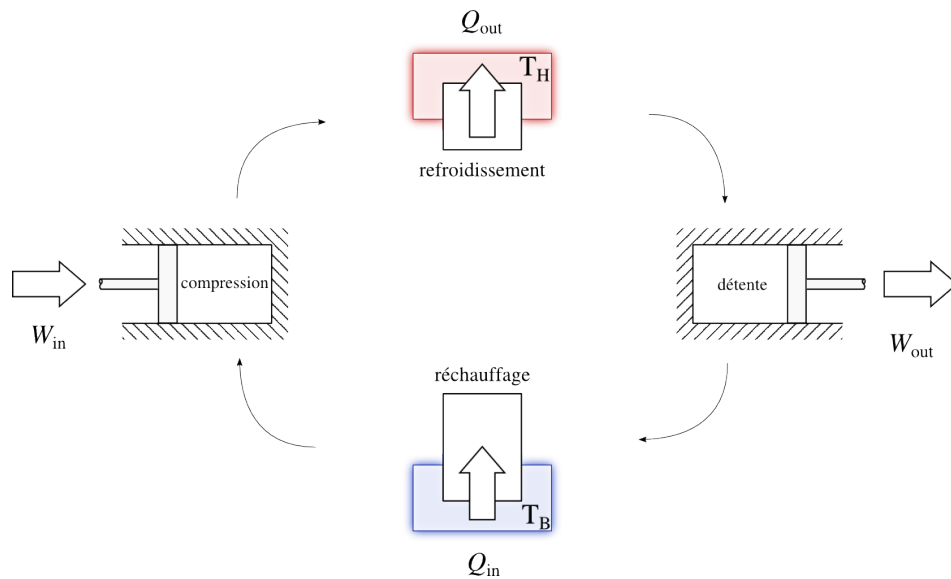


FIGURE 6.6 – Cycle de réfrigération effectué en séparant les étapes dans le temps (plutôt que dans l'espace comme représenté en figure 6.5)

schéma CC-0 o.c.

puissance que la détente. La puissance nette \dot{W}_{net} sous forme de travail est donc positive, c'est-à-dire que la machine doit être alimentée en travail par l'extérieur.

En pratique dans les systèmes de réfrigération, on a souvent recours à une astuce pour faire chuter la température : au lieu d'une turbine, on utilise une simple soupape (parfois appelée *détendeur*). Cet élément sans pièce mobile ne permet pas de dégager de travail (il augmente donc la puissance consommée par la machine), mais il est beaucoup plus simple de fabrication et d'utilisation.

La soupape, en termes thermodynamiques, permet d'effectuer une détente purement irréversible, augmentant le volume et baissant la pression sans extraire de travail. Si l'on utilisait un gaz parfait, cela n'aurait aucun effet sur la température² et donc aucun intérêt ; mais lorsque l'on utilise des liquides/vapeurs, la détente en soupape est un moyen technologiquement simple de faire chuter la température. Cette modification est décrite en figure 6.7.

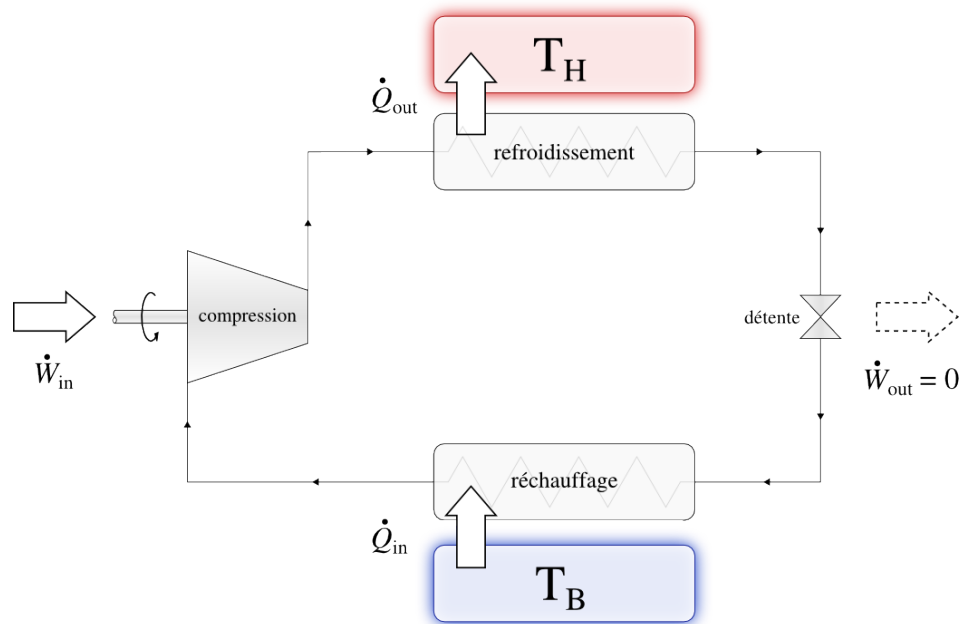


FIGURE 6.7 – Cycle de réfrigération modifié. Lorsque l'on utilise des liquides/vapeurs, il est possible de se dispenser d'extraire du travail lors de la détente. L'utilisation d'une simple soupape suffit pour faire baisser la température du fluide.

schéma CC-0 o.c.

2. Revoir à ce propos les expériences de Joule et Gay-Lussac étudiées en §4.3.2.

Les cycles de réfrigération ont deux grands types d'application :

Les pompes à chaleur appelées aussi *thermopompes* (figure 6.8) sont agencées de façon à rejeter la chaleur vers un corps à haute température, le plus souvent une habitation ;

Les réfrigérateurs et climatiseurs (figure 6.9) sont agencés de façon à extraire de la chaleur d'un corps à basse température, le plus souvent une chambre froide.

Dans ces deux types d'application, il s'agit exactement de la même machine, fonctionnant avec le même cycle. La seule différence concerne l'agencement intérieur/extérieur des composants : une pompe à chaleur n'est ni plus ni moins qu'un réfrigérateur positionné de sorte qu'il « refroidisse l'extérieur ».

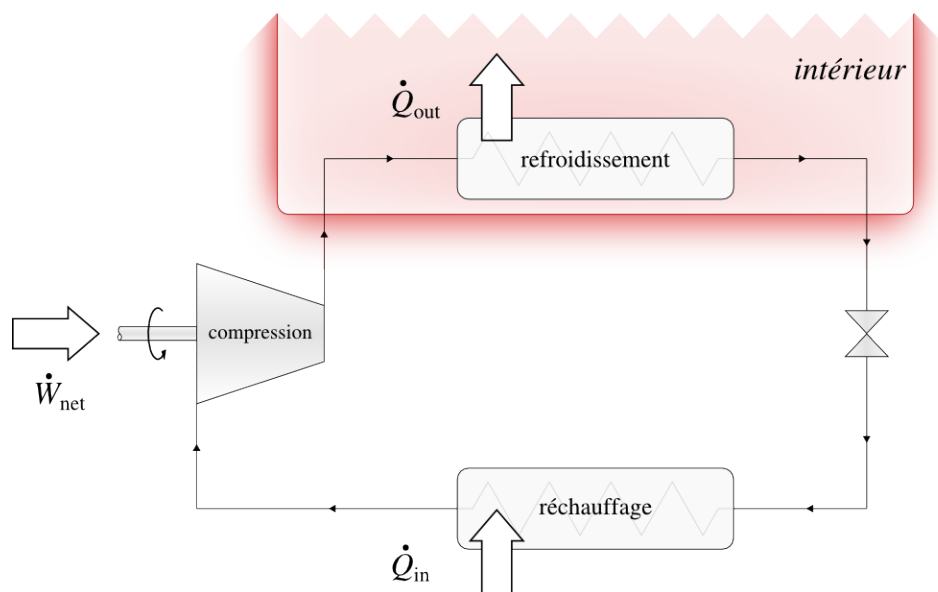


FIGURE 6.8 – Agencement d'une pompe à chaleur. La machine est positionnée de sorte à refouler à l'intérieur (où la température est plus haute) la chaleur prélevée à l'extérieur (où la température est plus basse).

schéma CC-0 o.c.

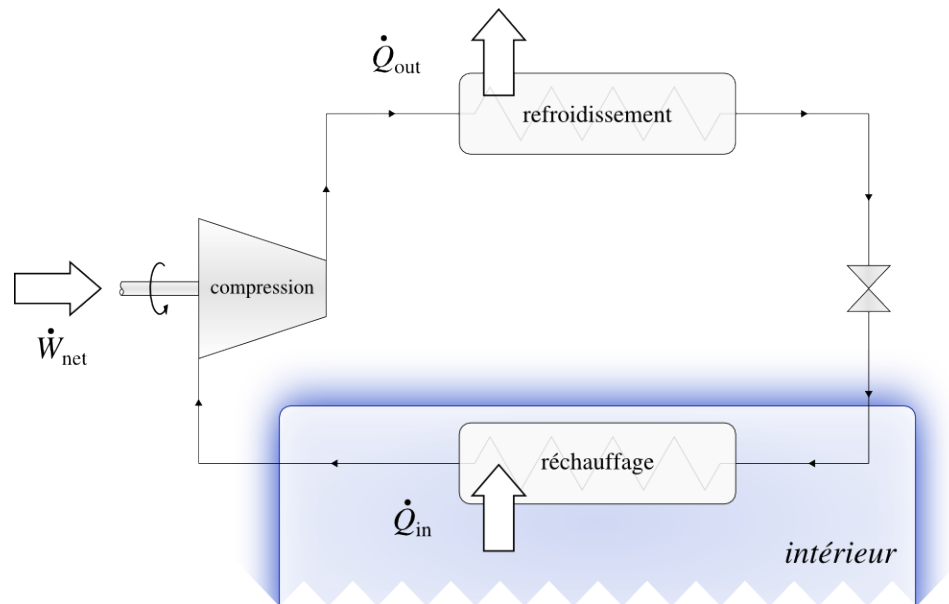


FIGURE 6.9 – Agencement d'un réfrigérateur ou d'un climatiseur. La machine est positionnée de sorte à refouler à l'extérieur (où la température est plus haute) la chaleur prélevée à l'intérieur (où la température est plus basse). Il s'agit exactement de la même machine qu'en figure 6.8.

schéma CC-0 o.c.

La similarité entre climatiseur et pompe à chaleur permet d'effectuer ces deux fonctions avec une seule même machine, que l'on dit alors *inversible* – ou parfois *réversible*, à tort comme nous le verrons au chapitre 7 (*le second principe*). En fonction des besoins, le sens de circulation du fluide est inversé, ce qui provoque l'inversion des transferts de chaleur. Ce type de machine est représenté en figure 6.10.

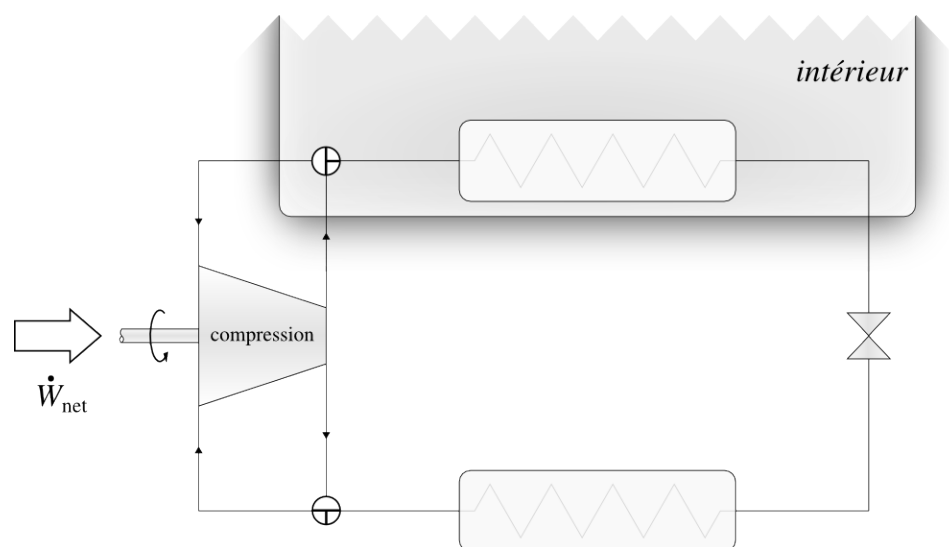


FIGURE 6.10 – Agencement d'un climatiseur inversable. En pivotant des deux vannes de 90° dans le sens anti-horaire, on change la fonction depuis une pompe à chaleur vers un climatiseur.

schéma CC-0 o.c.

6.3 Rendement des cycles

Le *rendement* ou l'*efficacité* η d'une machine thermique compare le transfert ou la transformation utile qu'elle effectue, avec le coût énergétique qu'elle engendre. Nous retiendrons la définition de principe suivante :

$$\eta \equiv \left| \frac{\text{transfert utile}}{\text{dépense énergétique}} \right| \quad (6/3)$$

Par convention le rendement est toujours exprimé sous la forme d'un nombre positif ; ainsi nous utilisons une valeur absolue dans l'équation 6/3. Pour chacun des trois types de machines thermiques, nous allons définir et quantifier ce « transfert utile » et cette « dépense énergétique ».

6.3.1 Rendement d'un moteur

La fonction d'un moteur thermique, comme ceux que l'on trouve à bord des automobiles ou dans les centrales électriques, est de produire du travail, c'est-à-dire une quantité \dot{W}_{net} négative (figure 6.11). La dépense engendrée pour générer ce travail est la chaleur qu'il reçoit, c'est-à-dire la quantité \dot{Q}_{in} (provenant usuellement de la combustion de carburant ou de la fission de noyaux atomiques).

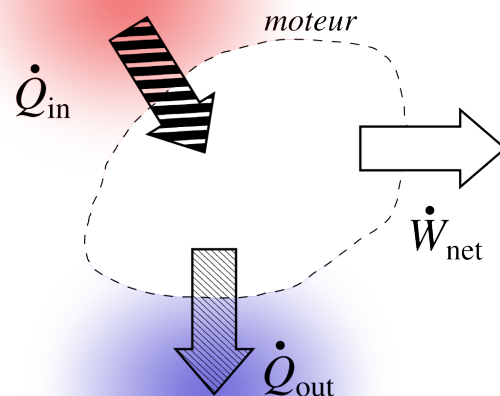


FIGURE 6.11 – Transferts énergétiques associés à un moteur. On souhaite obtenir un grand transfert \dot{W}_{net} (résultat) à partir du transfert \dot{Q}_{in} (coût). Le rejet \dot{Q}_{out} est indésirable.

schéma CC-0 o.c.

D'après la définition 6/3 le rendement η_{moteur} du moteur thermique est donc :

$$\eta_{\text{moteur}} \equiv \left| \frac{\dot{W}_{\text{net}}}{\dot{Q}_{\text{in}}} \right| \quad (6/4)$$

Exemple 6.1

Un moteur automobile reçoit une puissance de 100 kW sous forme de chaleur issue de la combustion d'essence ; il fournit 55 kW sous forme de travail à l'arbre de transmission. Quel est son rendement ?

Le rendement est de $\eta_{\text{moteur}} = \left| \frac{\dot{W}_{\text{net}}}{\dot{Q}_{\text{in}}} \right| = \left| \frac{-55 \cdot 10^3}{+100 \cdot 10^3} \right| = 0,55 = 55 \%$.

☞ Ce moteur effectue un rejet $\dot{Q}_{\text{out}} = -\dot{W}_{\text{net}} - \dot{Q}_{\text{in}} = -(-55 \cdot 10^3) - 100 \cdot 10^3 = -45 \text{ kW}$. Cette chaleur est en majeure partie évacuée par le pot d'échappement.

☞ On se doute bien qu'il faudra toujours fournir au moins autant de chaleur \dot{Q}_{in} que le moteur ne fournit de travail \dot{W}_{net} ; le rendement d'un moteur sera donc toujours nécessairement inférieur à 1.

La puissance nette \dot{W}_{net} sous forme de travail peut être exprimée en fonction des autres transferts énergétiques, et ainsi :

$$\begin{aligned} \dot{W}_{\text{net}} &= \dot{W}_{\text{in}} + \dot{W}_{\text{out}} = -\dot{Q}_{\text{in}} - \dot{Q}_{\text{out}} \\ \eta_{\text{moteur}} &= 1 - \left| \frac{\dot{Q}_{\text{out}}}{\dot{Q}_{\text{in}}} \right| \end{aligned} \quad (6/5)$$

Cette équation 6/5 nous sera fort utile au chapitre prochain (§7.5.1), où nous voudrions lier les transferts de chaleur \dot{Q}_{in} et \dot{Q}_{out} aux températures auxquelles ils sont effectués.

6.3.2 Rendement d'un réfrigérateur ou d'un climatiseur

La fonction d'un réfrigérateur ou d'un climatiseur est d'extraire de la chaleur, c'est-à-dire générer une puissance \dot{Q}_{in} (chaleur extraite chaque seconde du compartiment à refroidir) de signe positif. Ce transfert (figure 6.12) est rendu possible par l'apport au réfrigérateur d'un travail, \dot{W}_{net} , une « dépense » nécessairement positive.

D'après la définition 6/3 le rendement (dit aussi parfois *coefficient of performance*, ou $\text{COP}_{\text{réfrigération}}$) d'un réfrigérateur ou d'un climatiseur est donc :

$$\eta_{\text{réfrigérateur}} = \eta_{\text{climatiseur}} \equiv \left| \frac{\dot{Q}_{\text{in}}}{\dot{W}_{\text{net}}} \right| \quad (6/6)$$

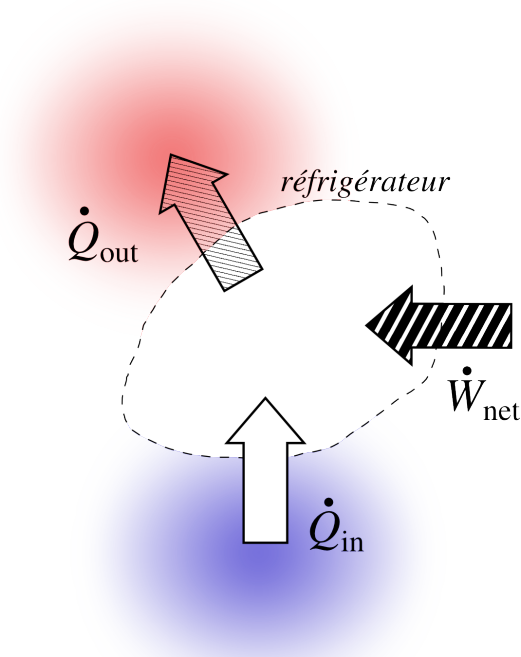


FIGURE 6.12 – Transferts énergétiques associés à un réfrigérateur ou climatiseur. On souhaite obtenir un grand transfert \dot{Q}_{in} (résultat) à partir du transfert \dot{W}_{net} (coût).

schéma CC-0 o.c.

Exemple 6.2

Un réfrigérateur consomme une puissance électrique de 100 W ; il extrait de la chaleur de la chambre froide avec une puissance de 120 W. Quel est son rendement ?

Le rendement est de $\eta_{\text{réfrigérateur}} = \left| \frac{\dot{Q}_{\text{in}}}{\dot{W}_{\text{net}}} \right| = \left| \frac{+120}{+100} \right| = 1,2 = 120 \%$.

☞ Ce réfrigérateur effectue un rejet $\dot{Q}_{\text{out}} = -\dot{W}_{\text{net}} - \dot{Q}_{\text{in}} = -100 - 120 = -220$ W à l'extérieur de la chambre froide (usuellement, dans l'habitation elle-même).

☞ Les réfrigérateurs et climatiseurs domestiques ont souvent un rendement supérieur à 1 mais en fonction des températures demandées, le rendement peut tout à fait y être inférieur.

En prenant garde aux pièges algébriques associés à l'utilisation de valeurs absolues, pour préparer le chapitre prochain nous pouvons exprimer ce rendement en fonction des transferts de chaleur uniquement :

$$\eta_{\text{réfrigérateur}} = \eta_{\text{climatiseur}} = \frac{1}{\left| \frac{\dot{Q}_{\text{out}}}{\dot{Q}_{\text{in}}} \right| - 1} \quad (6/7)$$

6.3.3 Rendement d'une pompe à chaleur

Une pompe à chaleur fonctionne exactement de la même manière qu'un climatiseur. Sa fonction est de générer un transfert \dot{Q}_{out} vers la section « chaude » (usuellement l'intérieur d'une habitation). Ce transfert, représenté en figure 6.13, est rendu possible par l'apport à la thermopompe de \dot{W}_{net} , une « dépense » nécessairement positive.

Le rendement $\eta_{\text{thermopompe}}$ (dit aussi $\text{COP}_{\text{thermopompe}}$) de la thermopompe est donc défini par :

$$\eta_{\text{thermopompe}} \equiv \left| \frac{\dot{Q}_{\text{out}}}{\dot{W}_{\text{net}}} \right| \quad (6/8)$$

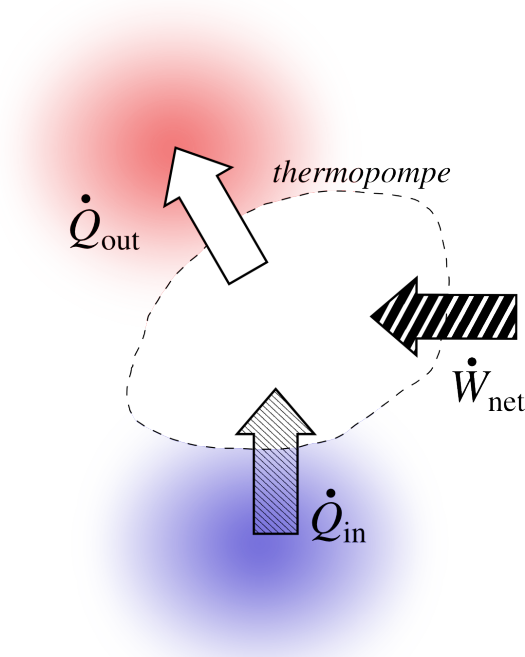


FIGURE 6.13 – Transferts énergétiques associés à une pompe à chaleur. On souhaite obtenir un grand transfert \dot{Q}_{out} (résultat) à partir du transfert \dot{W}_{net} (coût).

schéma CC-0 o.c.

Exemple 6.3

Une pompe à chaleur consomme une puissance électrique de 100 W ; elle chauffe l'intérieur d'une pièce avec une puissance de 350 W. Quel est son rendement ?

Le rendement est de $\eta_{\text{thermopompe}} = \left| \frac{\dot{Q}_{\text{out}}}{\dot{W}_{\text{net}}} \right| = \left| \frac{-350}{+100} \right| = 3,5$.

☞ La pompe à chaleur rejette plus de chaleur qu'elle ne consomme de travail – c'est tout son intérêt. Si le COP était égal ou inférieur à 1, il serait plus économique et bien plus simple d'utiliser un radiateur électrique.

De la même façon que pour les sections précédentes, on peut exprimer ce rendement en fonction des débits de chaleur uniquement :

$$\eta_{\text{thermopompe}} = \frac{1}{1 - \left| \frac{\dot{Q}_{\text{in}}}{\dot{Q}_{\text{out}}} \right|} \quad (6/9)$$

6.3.4 De la faible performance des machines

Dans tous les cas que nous avons étudiés plus haut, pour chaque cycle, nous avons inclus un transfert indésirable. Dans le cycle moteur, une partie de l'énergie est gâchée sous forme de rejet de chaleur (\dot{Q}_{out}). Dans les cycles de réfrigération, on doit apporter du travail (\dot{W}_{in}).

L'étudiant/e en ingénierie s'indignera inévitablement de la place accordée à ces pertes dans ce chapitre – et des timides rendements atteints par les machines décrites en exemple. Pourquoi les rendements calculés dans les exemples sont-ils si faibles, et surtout, comment concevoir des cycles de plus grande efficacité ? Nous aurons soin et à cœur de répondre à ces questions au chapitre 7 (*le second principe*).

« L'on a souvent agité la question de savoir si la puissance motrice de la chaleur est limitée, ou si elle est sans bornes ; si les perfectionnements possibles des machines à feu ont un terme assignable, terme que la nature des choses empêche de dépasser par quelque moyen que ce soit, ou si au contraire ces perfectionnements sont susceptibles d'une extension indéfinie. »

Sadi Carnot, 1824 [2]