

CHAPITRE 6

Cycles thermodynamiques

— ou —

Concis de sorcellerie mécano-thermique

Chapitre 6 – Cycles thermodynamiques

6.1	Conventions de signe	167
6.2	Transformer chaleur et travail	170
6.2.1	Construire des cycles thermodynamiques	170
6.2.2	Produire un travail à partir de chaleur	170
6.2.3	Extraire de la chaleur avec du travail	173
6.3	Rendement des cycles	176
6.3.1	Rendement d'un moteur	176
6.3.2	Rendement d'un réfrigérateur ou d'un climatiseur	177
6.3.3	Rendement d'une pompe à chaleur	179
6.3.4	De la faible performance des machines	180
6.4	Exercices	181

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 méthodes, on transforme chaleur en travail et inversement.

Introduction

Grâce aux chapitres 4 et 5, nous avons appris à quantifier les propriétés des fluides en fonction de leur état. Nous pouvons désormais les utiliser dans des cycles dans lesquels nous transformons chaleur en travail. Ce chapitre 6 (*cycles thermodynamiques*) se propose d'étudier cette notion de cycle, en répondant à deux questions :

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

6.1 Conventions de signe

Il nous faut, hélas, une fois de plus convenir de quelques notations graphiques et de signe avant de s'attaquer au corps du sujet.

Dans ce chapitre, nous étudierons tant des machines thermiques à l'intérieur desquelles une quantité fixe de fluide est captive (mieux étudiées à l'aide d'un système fermé, *cf.* le chapitre 2), que des machines à l'intérieur desquelles le fluide circule en continu (mieux étudiées à l'aide d'un système ouvert, *cf.* le chapitre 3).

Nos conventions graphiques pour représenter ces machines sont décrites en figures 6.1 et 6.2.

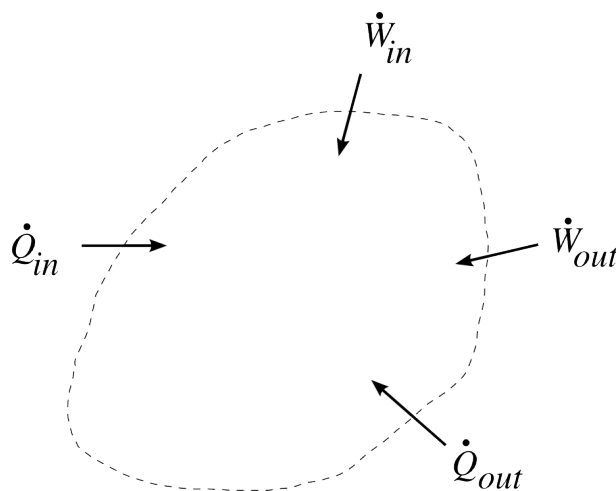


FIGURE 6.1 – Convention graphique utilisée jusqu'à présent. La quantité de masse à l'intérieur de la machine est fixe, et elle fonctionne de façon continue. Nous avons $\dot{W}_{in} + \dot{W}_{out} + \dot{Q}_{in} + \dot{Q}_{out} = 0$

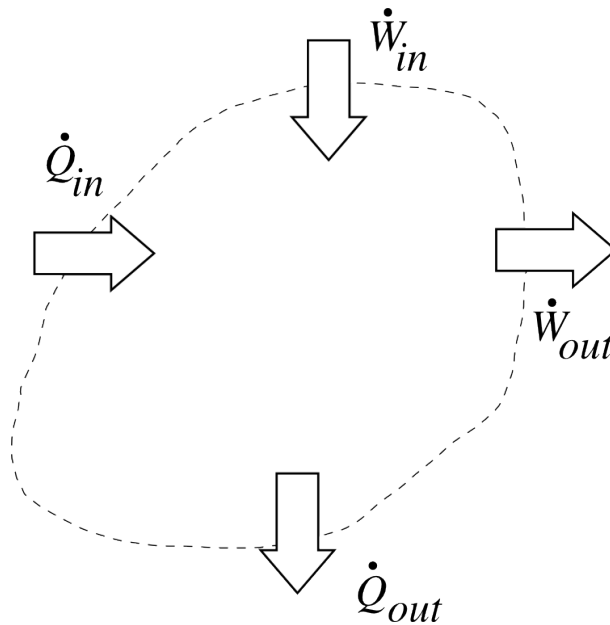


FIGURE 6.2 – Nouvelle convention graphique. **Les larges flèches blanches indiquent le sens physique des transferts.**

Par exemple, \dot{W}_{out} étant négatif (car sortant), il est représenté par une large flèche sortante. Cette convention est plus intuitive pour décrire le fonctionnement des machines, mais également moins commode pour quantifier mathématiquement les transferts.

La somme du travail reçu et fourni par une machine est nommé le *travail net*¹. Le concept est illustré en figure 6.3.

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

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

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

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

1. Attention, il est aisé de confondre le travail net (en anglais, *net work*) avec le *travail brut* (*gross work*), soit $\dot{W}_{brut} \equiv |\dot{W}_{out}|$. Le travail net peut être positif ou négatif, en fonction du type de machine.

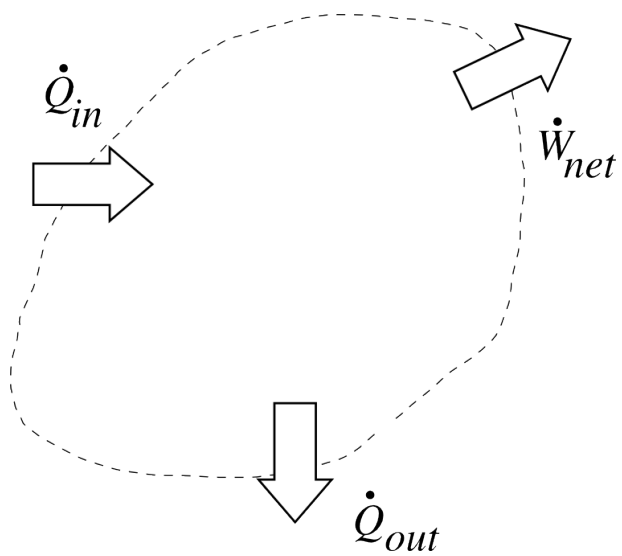


FIGURE 6.3 – Les transferts de la figure 6.2 représentés différemment. Le travail rentrant \dot{W}_{in} et le travail sortant \dot{W}_{out} sont regroupés en un seul transfert, le travail net \dot{W}_{net} .

6.2 Transformer chaleur et travail

6.2.1 Construire des cycles thermodynamiques

Si nous voulons qu'une machine fonctionne en continu, il faut qu'elle ramène le fluide qu'elle contient dans l'état où il était au début de son fonctionnement.

Par exemple, il est aisé de refroidir une pièce avec une bouteille d'air comprimé (il suffit de le laisser travailler dans une 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 température initiale, à la fin du processus.

Lorsque le fluide est ramené à son état initial (même température, même pression, même énergie interne), on dit qu'il a parcouru un cycle thermodynamique complet (§2.3). Tous les cycles ne sont pas équivalents. Nous allons assembler différentes évolutions pour les construire.

6.2.2 Produire un travail à partir de chaleur

Le raisonnement à l'origine du fonctionnement de n'importe quel moteur est assez simple. Lorsque l'on chauffe un fluide, sa pression et son volume ont tendance à augmenter ; on peut exploiter cela en lui faisant fournir un travail.

Avant de ramener le fluide à son volume initial, on le refroidit. Ainsi, on dépense moins de travail au chemin retour que l'on en a obtenu à l'aller. L'ensemble aura donc *produit* du travail et absorbé (plus exactement, *transformé*) de la chaleur.

Il existe de multiples façons de faire évoluer un fluide pour transformer de la chaleur en travail, mais toutes comportent quatre transferts énergétiques, comme représenté en figures 6.4 et 6.5. En fonction des contraintes technologiques et pratiques, certains de ces transferts peuvent être effectués simultanément.

La machine requiert un investissement extérieur sous forme de travail, \dot{W}_{in} , pour la compression ; elle fournira, sous forme de travail également, une puissance \dot{W}_{out} plus grande, lors de la détente.

Il est bien sûr possible de relier mécaniquement les sections consommant et fournissant de l'énergie, comme représenté en figures 6.6 et 6.7. L'ensemble fournit alors directement une puissance nette \dot{W}_{net} .

En fonction des applications, certaines modifications sont apportées, par exemple :

- Dans un moteur à explosion, le cycle n'est pas effectué de façon continue mais par brèves évolutions successives ;
- La plupart des moteurs à air ne contiennent pas de « refroidisseur » proprement dit. En effet, l'air étant disponible en abondance, il est plus simple de le rejeter dans l'atmosphère plutôt que de le laisser refroidir à l'intérieur du moteur². Le

2. On pourra aussi mentionner que cela permet de ré-alimenter les cylindres avec de l'air oxygéné et sans déchets de combustion.

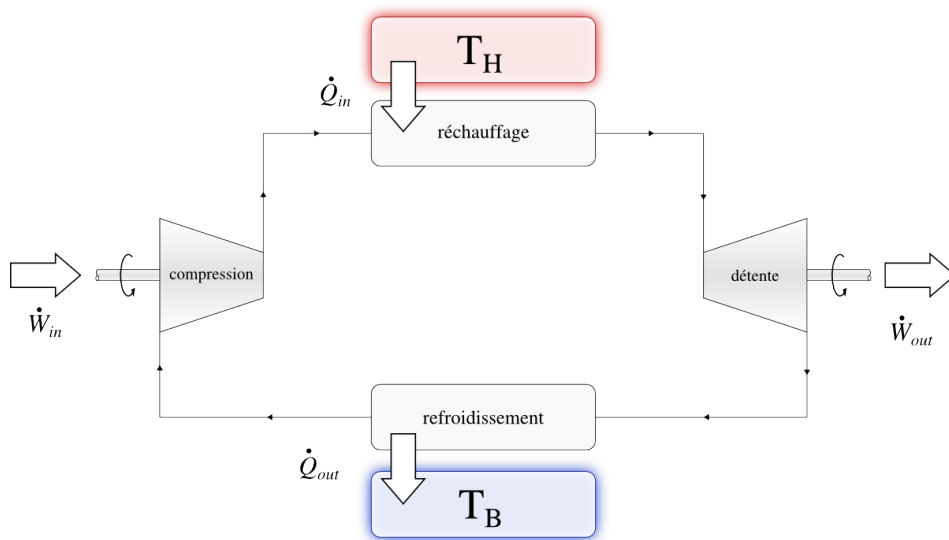


FIGURE 6.4 – Cycle thermodynamique moteur, avec un circuit continu. La somme nette du travail (soit $\dot{W}_{in} + \dot{W}_{out}$) est négative, c'est-à-dire que le fluide fournit une puissance \dot{W}_{net} à l'extérieur..

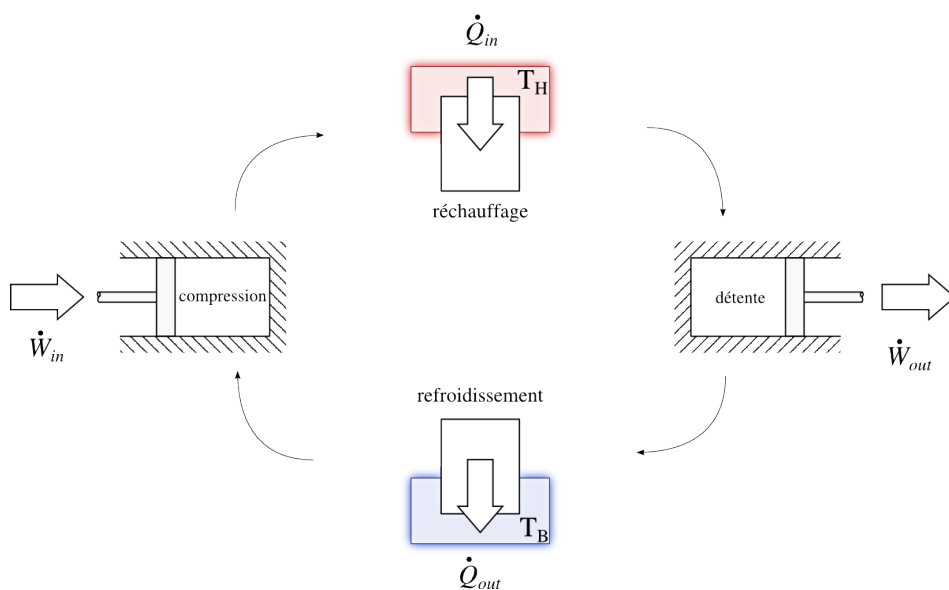


FIGURE 6.5 – Cycle thermodynamique moteur avec quatre évolutions successives.

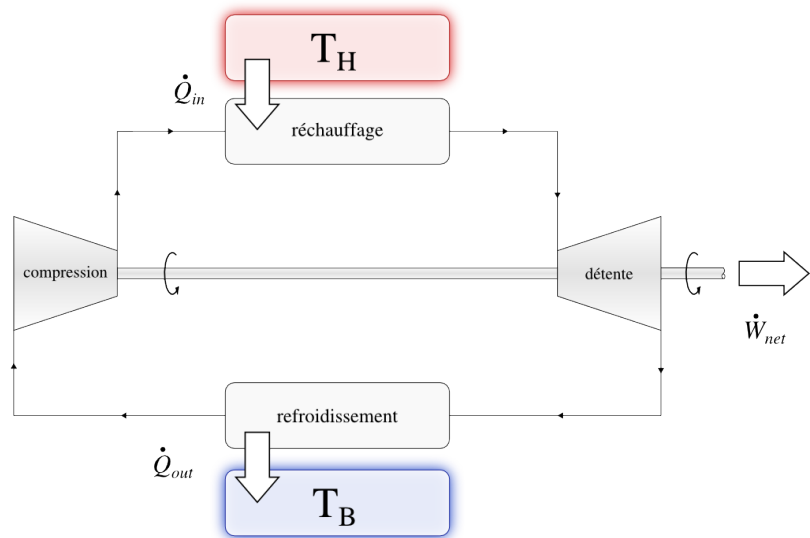


FIGURE 6.6 – Cycle thermodynamique moteur, pour lequel le compresseur et la turbine sont reliés mécaniquement. La somme nette du travail (soit $\dot{W}_{in} + \dot{W}_{out}$) est négative, c'est-à-dire que le fluide fournit une puissance \dot{W}_{net} à l'extérieur.

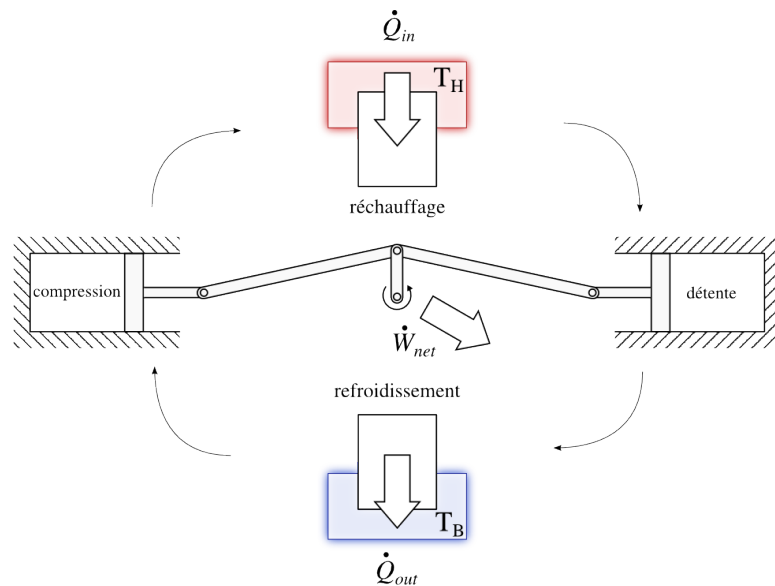


FIGURE 6.7 – Dans le moteur de la figure 6.5, on peut relier mécaniquement la phase de compression et de détente, comme schématisé ici.

refroidissement a alors lieu en dehors du moteur physique. Le moteur perd de la chaleur avec l'air qu'il rejette ; cette perte est quantifiée exactement comme si on utilisait un refroidisseur interne³.

6.2.3 Extraire de la chaleur avec du travail

Lorsque l'on fournit du travail à un fluide, sa température augmente,⁴ et il peut ainsi fournir de la chaleur à un corps qui était initialement plus « chaud » que lui.

À l'inverse, lorsque l'on détend un fluide, sa température baisse,⁵ et il peut ainsi capter de la chaleur à un corps qui était initialement plus « froid » que lui.

Lorsque ces étapes sont combinées en un cycle, nous obtenons le principe de fonctionnement d'un *réfrigérateur* : on *extraie de la chaleur de l'intérieur* d'un récipient (basse température) et on la rejette à l'extérieur (à plus haute température). Le fonctionnement d'un réfrigérateur est décrit en figures 6.8 et 6.9.

On peut aussi positionner la machine différemment. La chaleur est alors *extraite de l'extérieur* (milieu à basse température) d'un bâtiment, et rejetée à l'intérieur de l'habitation (milieu à plus haute température). C'est le principe de la *pompe à chaleur*, que l'on appelle parfois *thermopompe*.

On voit qu'une pompe à chaleur n'est rien de plus qu'un réfrigérateur positionné de sorte qu'il « refroidisse l'extérieur ».

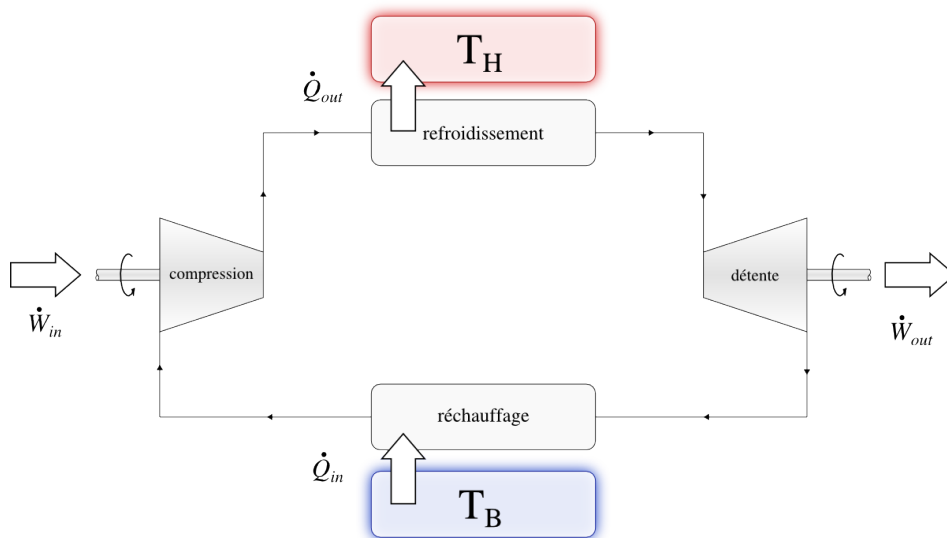


FIGURE 6.8 – Cycle thermodynamique de refroidissement en cycle continu.

Le travail net \dot{W}_{net} est positif, c'est-à-dire que la machine doit être alimentée en travail par l'extérieur. De la chaleur \dot{Q}_{in} est captée du corps « froid » à température T_B , et de la chaleur \dot{Q}_{out} est transmise au corps « chaud » (à température T_H).

3. En termes thermodynamiques, on pourrait dire que l'atmosphère fait partie du moteur : elle ramène le fluide à son état initial en le refroidissant à pression constante.

4. C'est strictement vrai pour un gaz parfait. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 5 (*liquides et vapeurs*), les liquides/vapeurs suivent aussi cette tendance mais connaissent une phase à température constante entre leurs points de saturation.

5. La même remarque s'applique ici.

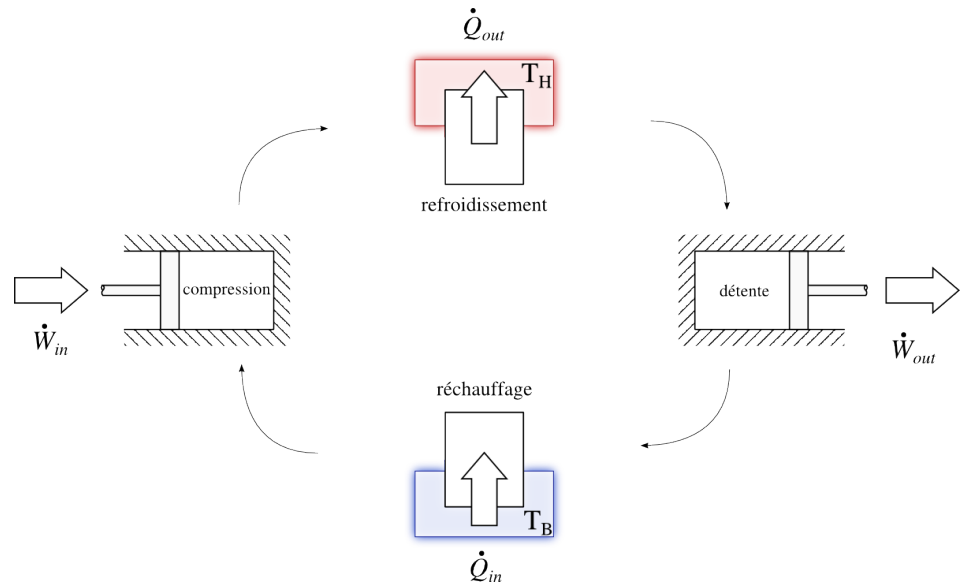


FIGURE 6.9 – Cycle thermodynamique de refroidissement en évolutions successives.

En pratique dans les systèmes de réfrigération, on ne cherche pas toujours à produire un travail dans la phase de détente. Il est en effet souvent plus économique d'utiliser une simple soupape que d'extraire et acheminer du travail mécanique au travers de la machine.

Cette soupape, en termes thermodynamiques, permet d'effectuer une détente irréversible, augmentant le volume et baissant la pression sans extraire de travail. Dans le cas d'un gaz parfait, cela n'aura aucun effet sur la température ⁶(et donc aucun intérêt pratique) ; mais pour les mélanges liquide-vapeur, c'est un moyen technologiquement simple de faire chuter la température. Cette modification est décrite en figure 6.10.

6. Revoir à ce propos le principe de Joule étudié en section §4.3.2

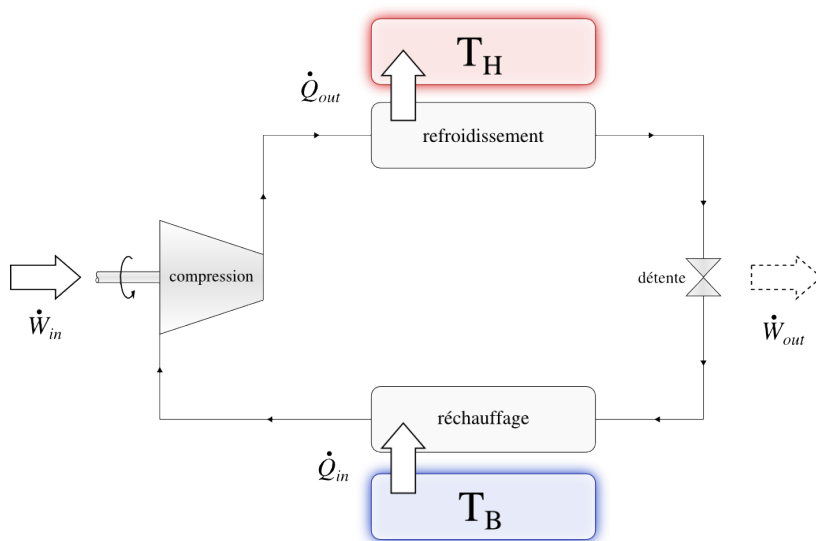


FIGURE 6.10 – Cycle de refroidissement modifié. Dans le cas de mélanges liquide-vapeur, il est possible de se dispenser d’extraire du travail lors de la détente. L’utilisation d’une simple soupape suffit pour faire baisser la température du fluide.

6.3 Rendement des cycles

Le *rendement* 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 :

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

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 standard, 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).

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

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

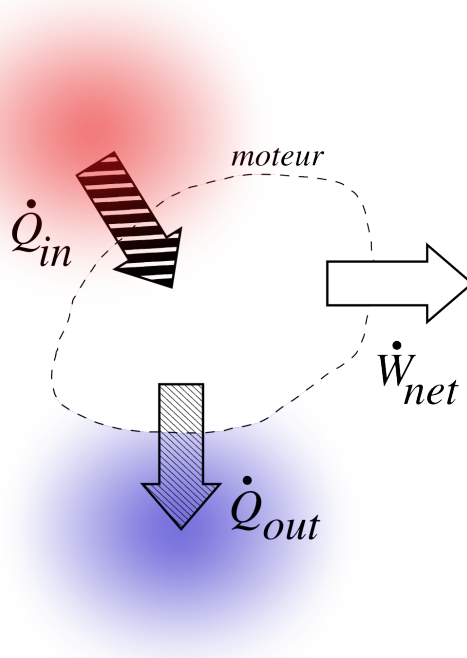


FIGURE 6.11 – Schématisation d'un moteur standard. On souhaite obtenir un grand transfert \dot{W}_{net} (résultat) à partir du transfert \dot{Q}_{in} (coût). Le rejet \dot{Q}_{out} est indésirable.

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 usuellement 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.

Par exemple, un moteur recevant 100 W sous forme de chaleur issue de la combustion d'essence, et fournissant 60 W sous forme mécanique à l'arbre de transmission, a un rendement (dit parfois *efficacité*) de 60 %.

Le travail net \dot{W}_{net} peut être exprimé 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, car nous saurons alors lier les transferts de chaleur \dot{Q}_{in} et \dot{Q}_{out} aux températures auxquels ils sont effectués (7/6).

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 (figure 6.12). Ce transfert est rendu possible par l'apport au réfrigérateur d'un travail, \dot{W}_{net} , « dépense » nécessairement positive⁷.

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

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

7. Nous explorerons à loisir la « nécessité » de cet apport de travail au chapitre 7 (le *second principe*).

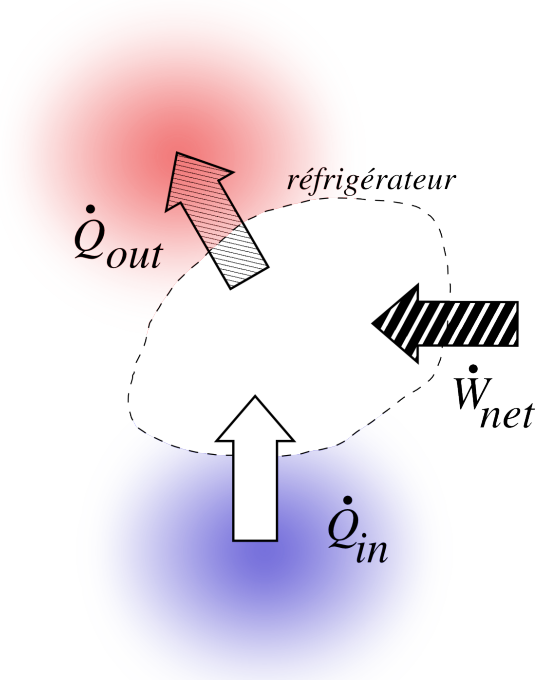


FIGURE 6.12 – Schématisation d'un réfrigérateur ou climatiseur. On souhaite obtenir un grand transfert \dot{Q}_{in} (résultat) à partir du transfert \dot{W}_{net} (coût).

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

☞ Ce réfrigérateur effectue un rejet $\dot{Q}_{out} = -\dot{W}_{net} - \dot{Q}_{in} = -100 - 120 = -220$ 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 qu'amènent les valeurs absolues, pour préparer le chapitre prochain nous pouvons exprimer ce rendement en fonction des quantités de chaleur uniquement :

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

6.3.3 Rendement d'une pompe à chaleur

Une pompe à chaleur fonctionne exactement de la même manière qu'un climatiseur – il s'agit d'ailleurs souvent de la même machine⁸. 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 d'un travail, \dot{W}_{net} , « dépense » nécessairement positive.

Le rendement (dit aussi *coefficient of performance* ou COP_{TP}) de la thermopompe est donc défini par :

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

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

🔑 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,

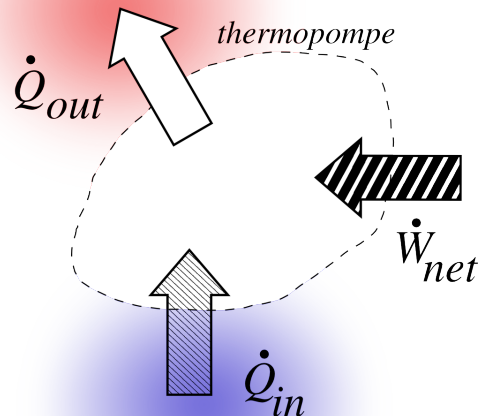


FIGURE 6.13 – Schématisation d'une pompe à chaleur. On souhaite obtenir un grand transfert \dot{Q}_{out} (résultat) à partir du transfert \dot{W}_{net} (coût).

8. Une pompe à chaleur dite *réversible* devient facilement climatiseur – il suffit de retourner l'installation sur elle-même, ou d'inverser le sens de circulation du fluide. Attention, ces machines n'en sont pas pour autant réversibles au sens thermodynamique du terme, comme nous le verrons au chapitre 7 (*le second principe*).

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*).