SWISS
PLASMA
CENTER

**Faculté des Sciences de Base**
**Section de physique**

---

## Physique Générale II

# Moteurs, réfrigérateurs et pompes à chaleur

Notes de cours du 22 avril 2020

---

Prof. Ivo Furno

PPB 119
1015 Lausanne
Switzerland

Editées par Benoît Labit
mis à jour le 2022-05-30 à 08:40:16

---

**Avertissement : ces notes de cours ont été rédigées en urgence pendant la crise covid-19 et la fermeture du campus EPFL. Des "coquilles" peuvent s'être glissées et seront corrigées au fur et à mesure. Merci de votre compréhension.**

# Table des matières

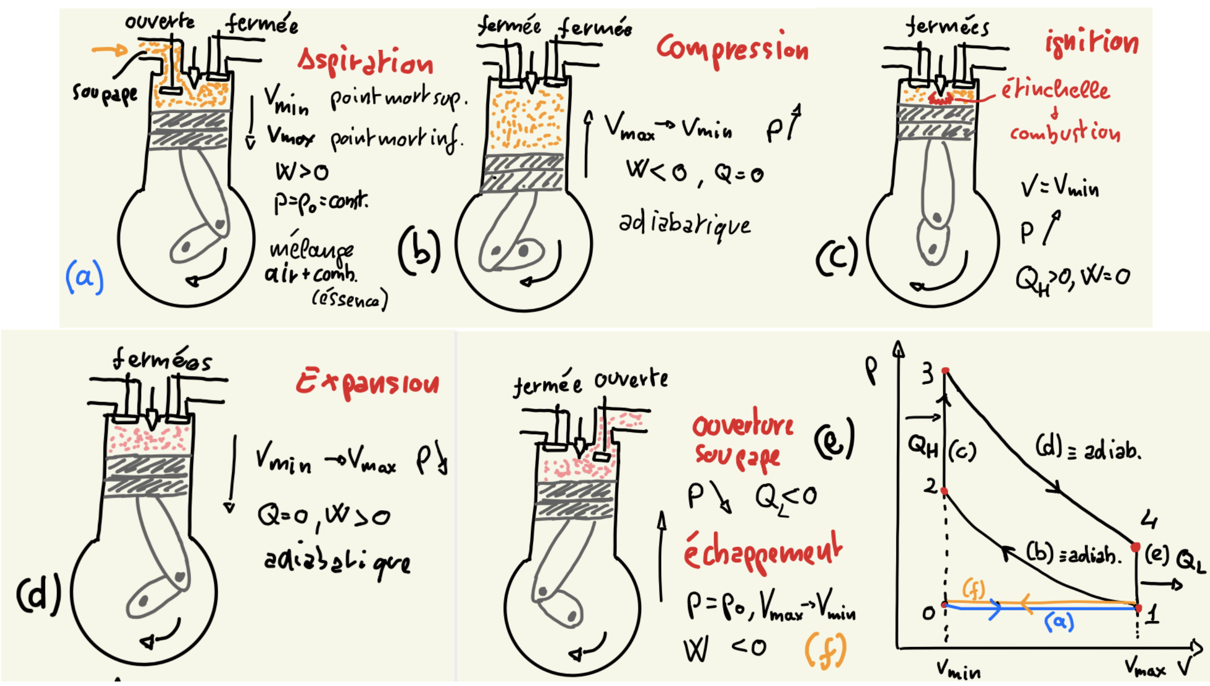
# Moteurs, réfrigérateurs et pompes à chaleur

## 1.1 Moteurs à combustion interne

### Cycle de Otto (∼1861)

Le nom de ce cycle vient de Nikolaus Otto (1832-1891) : inventeur et industriel allemand, inventeur du moteur à quatre temps en 1867 et fondateur de la société industrielle Deutz AG. Il est le père de Gustav Otto, cofondateur de BMW avec Karl Rapp en 1917.
Afin de le représenter dans un diagramme $p - V$ et en calculer le rendement théorique, on suppose que :
- l'air est un gaz parfait,
- les transformations sont réversibles (quasi-statiques),
- il n'y a pas de frottements ni pertes de chaleur.

Ce moteur (ou cycle) est aussi appelé "moteur à 4 temps" mais en réalité il est constitué de 6 phases. Examinons ce moteur en détails :




Calculons le rendement théorique de ce cycle après avoir remarqué que (a) et (f) s'annulent. Pour les 4 autres phases, seules les étapes (c) et (e) impliquent des échangent de chaleur. Ces 2 transformations sont des isochores, on a donc $dU = \delta Q = nC_V dT$ puisque le travail est nul :

- étape (c)

$$|Q_H| = \int_{T_2}^{T_3} nC_V dT = nC_V(T_3 - T_2)$$

- étape (e)

$$|Q_L| \int_{T_1}^{T_4} nC_V dT = nC_V(T_4 - T_1),$$

où $n$ est le nombre de moles.

Le rendement est donc :

$$\eta \equiv 1 - \frac{|Q_L|}{|Q_H|} = 1 - \frac{\cancel{nC_V}(T_4 - T_1)}{\cancel{nC_V}(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}.$$

Cependant, pour un ingénieur, la température n'est pas un paramètre utile pour une construction concrète du moteur. Exprimons-les en fonction des volumes minimum et maximum. Pour cela, on utilise le fait que les étapes (b) et (d) sont des adiabatiques et donc $pV^\gamma = \text{const.}$ (ou $TV^{\gamma-1} = \text{const.}$). On sait aussi que le nombre de moles ne varie pas car les soupapes sont fermées. On obtient donc

$$T_4 V_{\text{max.}}^{\gamma-1} = T_3 V_{\text{min.}}^{\gamma-1} \quad \text{et} \quad T_1 V_{\text{max.}}^{\gamma-1} = T_2 V_{\text{min.}}^{\gamma-1}.$$

En faisant le rapport entre ces deux égalités, on obtient

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2},$$

et en faisant la différence, on a :

$$(T_4 - T_1)V_{\text{max.}}^{\gamma-1} = (T_3 - T_2)V_{\text{min.}}^{\gamma-1} \quad \Rightarrow \quad \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = \left(\frac{V_{\text{min.}}}{V_{\text{max.}}}\right)^{\gamma-1}.$$

On introduit le rapport de compression défini comme $r = \frac{V_{\text{max.}}}{V_{\text{min.}}} > 1$. Le rendement du cycle de Otto peut donc s'écrire sous une forme plus pratique pour un ingénieur comme :

$$\eta = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \left(\frac{V_{\text{min.}}}{V_{\text{max.}}}\right)^{\gamma-1} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}.$$

<u>Exemple :</u> Pour $r$=10 et $\gamma$=1.4, on obtient *en théorie (!)* $\eta = 1 - \frac{1}{10^{0.4}} \simeq 0.6 = 60\%$.

Dans la pratique, le rendement d'un moteur à 4 temps est bien plus bas et de l'ordre 15-25%. En effet, les pertes thermiques, les frottements et la turbulence ne sont pas négligeables et rendent le cycle irréversible en réalité.

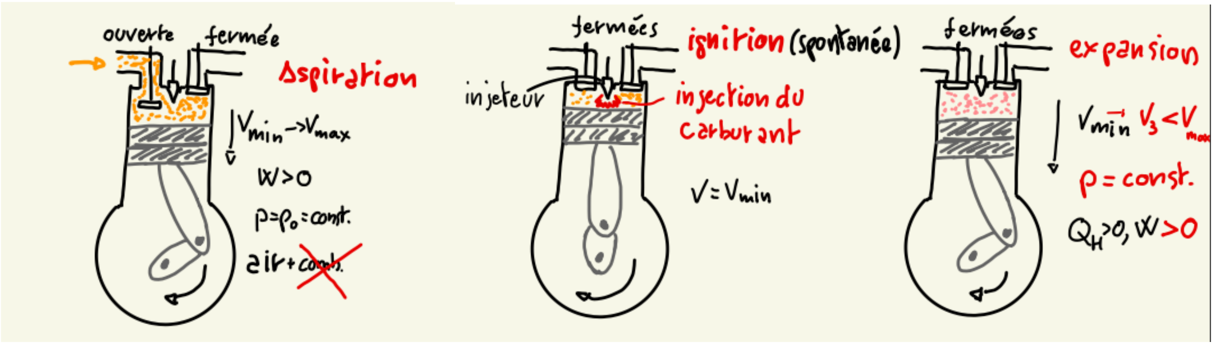
Cependant, on voit bien que plus $r$ est grand, plus le rendement sera proche de 1. Quels sont les facteurs qui limitent la rapport de compression $r$ ?

— La résistance mécanique du moteur : cylindre et piston.

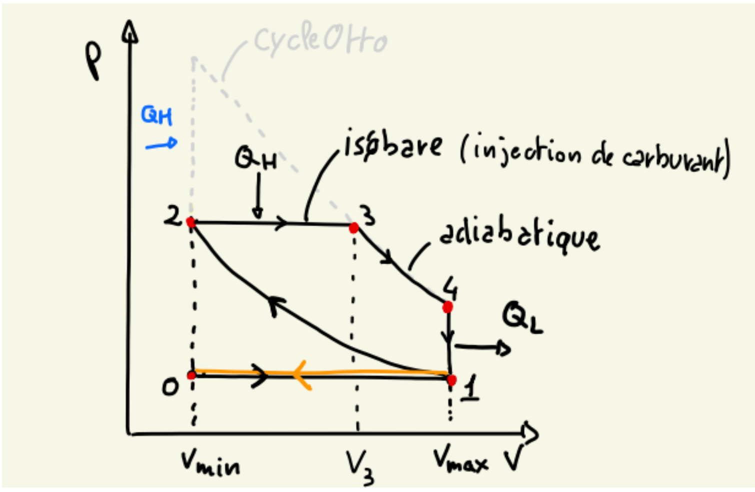
— La résistance de l'essence à la détonation. En effet, plus le combustible permet d'augmenter la pression (et donc la température), plus grand peut être $r$. Par contre, si l'essence brûle avant l'étincelle, alors on ne peut pas utiliser toute la compression possible. Pour éviter ceci, on rajoute des substances (plomb) pour augmenter la résistance à la détonation qui se mesure en *indice d'octanes* : $C_8H_{18}$. La combustion anormale avant l'étincelle produit une explosion sur les parois de la chambre et du piston, qui génère un bruit métallique typique (le "cliquetis") des moteurs à combustion interne.

### Cycle de Diesel

Ce cycle porte le nom de son inventeur Rudolf Diesel (1858-1913). Il a été conçu pour fonctionner avec de l'huile végétale ! Les étapes de ce cycle sont illustrées ci-dessous :




Pendant la phase d'aspiration, le cylindre n'aspire que de l'air et pas de combustible, il peut donc comprimer beaucoup sans explosion ($r > 20$). Le carburant est injecté au moment où la pression est maximale (et donc le volume minimal) et l'injection est réglée de telle sorte que la combustion soit isobare pendant l'expansion. On peut représenter le cycle Diesel (réversible) dans un diagramme $p - V$ :



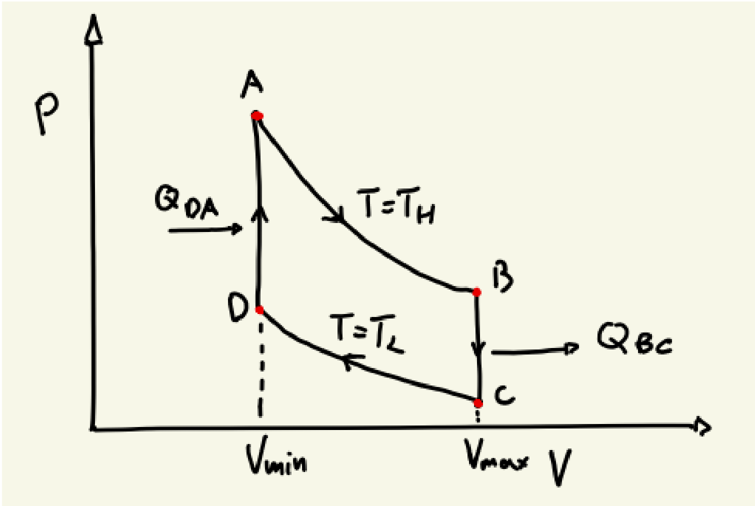

Comme le rapport de compression $r$ est plus élevé que pour le cycle de Otto, le rendement est également pus élevé :

$$\eta = 1 - \frac{\left(\frac{V_{\text{max.}}}{V_3}\right)^{-\gamma} - \left(\frac{V_{\text{max.}}}{V_{\text{min.}}}\right)^{-\gamma}}{\gamma\left[\left(\frac{V_{\text{max.}}}{V_3}\right)^{-1} - \left(\frac{V_{\text{max.}}}{V_{\text{min.}}}\right)^{-1}\right]}$$

<u>Question :</u> Lequel des moteurs (Diesel ou Otto) produit le plus de $CO_2$ par kilomètre parcouru ?

## 1.2 Cycle à combustion externe : le cycle de Stirling

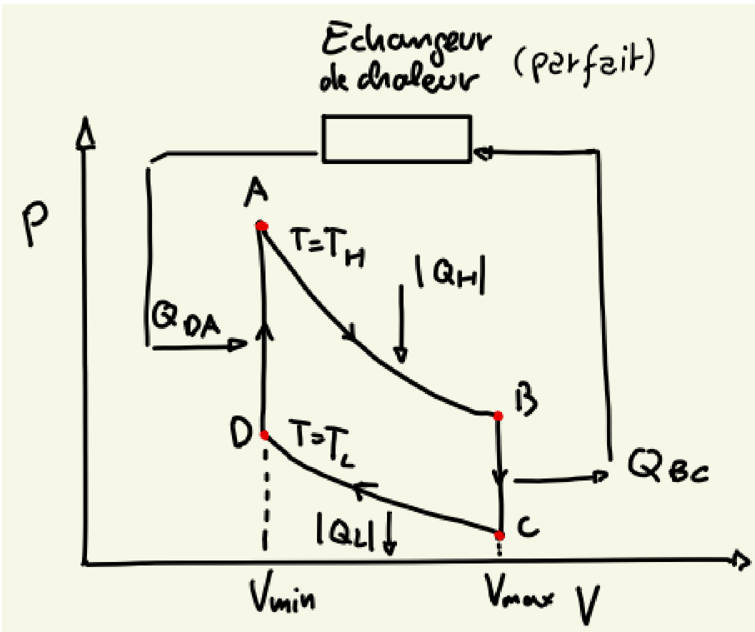
Ce cycle est composé de deux isothermes et deux isochores comme illustré ci-dessous :




Calculons le travail net et les chaleurs échangées au cours du cycle. Commençons par les isochores : le travail est nul puisque $dV = 0$. Ce qui donne $Q_{D\to A} = \Delta U_{D\to A} = U_A - U_D = \frac{\nu}{2}nR(T_H - T_L) > 0$ et $Q_{B\to C} = \Delta U_{B\to C} = U_C - U_B = \frac{\nu}{2}nR(T_L - T_H) < 0$, où $\nu$ est le nombre de degrés de liberté. On a donc

$$Q_{D\to A} = -Q_{B\to C}.$$

L'idée brillante du cycle de Stirling (mais pourquoi ?) est d'utiliser la chaleur expulsée par le système durant le refroidissement isochore pour le réchauffement isochore à l'aide d'un échangeur de chaleur parfait (pas de pertes) comme illustré ci-dessous :



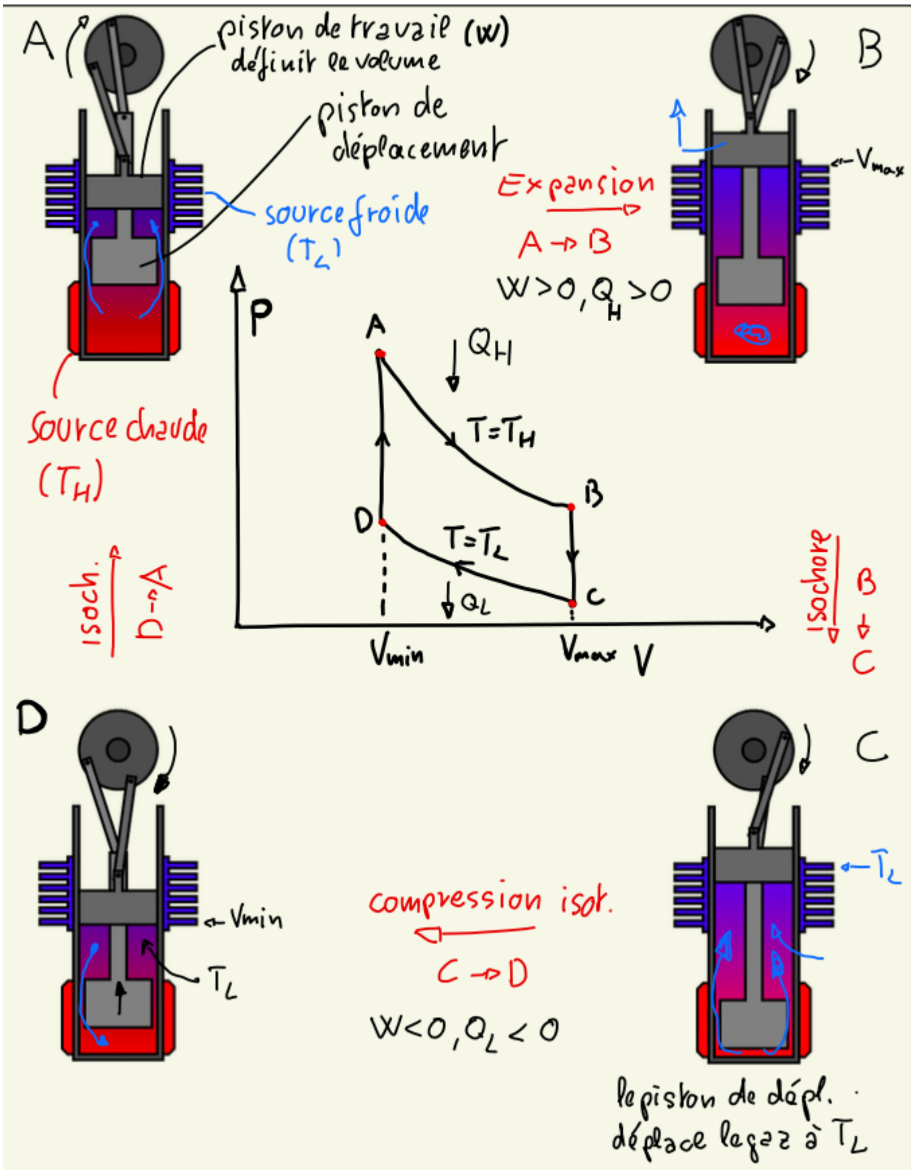

Le résultat est que les chaleurs qui comptent pour le rendement sont uniquement celles échangées lors des isothermes $Q_H$ et $Q_L$. Calculons ces deux quantités. Lors d'une isotherme, la variation d'énergie interne est nulle ($\Delta U = 0$), donc $Q_L = W_{C\to D}$ et $Q_H = W_{A\to B}$. Or $W_{C\to D} = nRT_L \ln\left(\frac{V_{\text{min.}}}{V_{\text{max.}}}\right)$ et $W_{A\to B} = nRT_H \ln\left(\frac{V_{\text{max.}}}{V_{\text{min.}}}\right)$. Finalement, on obtient :

$$\eta = 1 - \frac{\left|\cancel{nR}T_L \cancel{\ln\left(\frac{V_{\text{min.}}}{V_{\text{max.}}}\right)}\right|}{\left|\cancel{nR}T_H \cancel{\ln\left(\frac{V_{\text{max.}}}{V_{\text{min.}}}\right)}\right|} = 1 - \frac{T_L}{T_H}.$$

Comment peut-on réaliser un cycle de Stirling en pratique ? L'échangeur doit avoir une grande capacité thermique et une faible conductivité thermique : ce n'est pas facile !

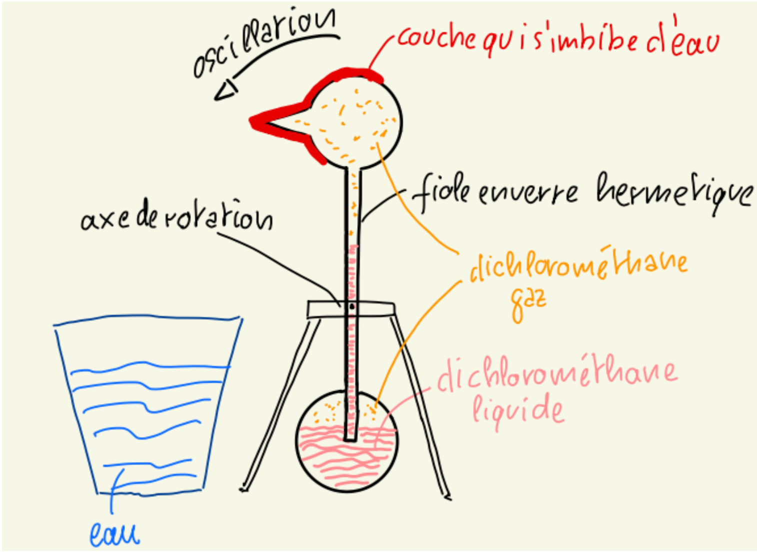
### Un peu d'histoire...

Robert Stirling invente le premier moteur en 1816, motivé par le besoin de remplacer les moteurs à vapeur. Le moteur est basé sur un circuit d'air fermé en utilisant une combustion externe. A l'époque, la technologie était assez rudimentaire avec des problèmes majeurs pour l'échangeur (turbulence,...), l'étanchéité du système piston/cylindre, le coût et le changement de vitesse.
Récemment, les cycles Stirling sont redevenus populaires pour des applications "high-tech" comme en cryogénie pour liquifier des gaz ou dans les satellites, etc... Ce cycle a des avantages : silencieux (pas de détonation), peu de vibrations, circuit fermé et un rendement réel de l'ordre de 40%. Le fonctionnement du cycle de Stirling est détaillé ci-dessous.




## 1.3 Les oiseaux buveurs

Sur le site Moodle, on trouve un lien vers une vidéo de démonstration.




Ce drôle d'oiseau est constitué de deux fioles en verre avec un élément chimique en phase liquide/gazeuse. En raison des frottements, le mouvement de l'oiseau autour de son axe devrait s'arrêter mais il y a une source d'énergie qui le fait osciller pendant des jours ! Où est cette source d'énergie ($T_H$ et $T_L$) ? La source chaude est la fiole du bas à température ambiante. La source froide est la tête de l'oiseau : l'évaporation de l'eau refroidit la tête et donc la vapeur à l'intérieur de cette fiole, la pression de vapeur diminue et le liquide peut donc monter dans la colonne. Ceci déplace ainsi le centre de masse de l'oiseau qui perd l'équilibre et plonge de nouveau son bec dans le verre d'eau. A ce moment-là, la tête se réimbibe d'eau (source froide) et le centre de masse se déplace vers le bas permettant à l'oiseau de se redresser.

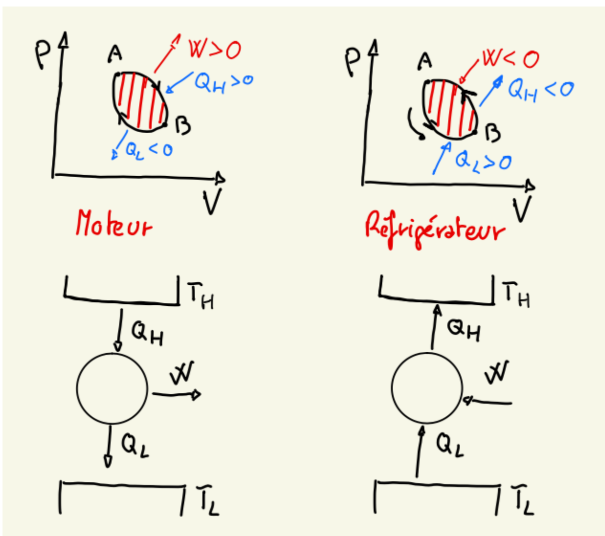
**Question challenge :**

Pourquoi le mouvement de l'oiseau s'arrête si on couvre le tout avec une cloche ?

## 1.4 Réfrigérateurs et pompes à chaleur

### Réfrigérateurs

Si l'on fait fonctionner un moteur (réversible) à l'envers, on obtient un cycle réfrigérateur.



Dans un réfrigérateur, on fournit un travail pour transférer de la chaleur d'une source à basse température $T_L$ à une source à haute température $T_H$. Comme pour les moteurs, pour quantifier l'efficacité d'un système, on peut calculer le rapport $\frac{\text{"avantage"}}{\text{"prix à payer"}} = \frac{|W|}{|Q_H|}$. Dans le cas des réfrigérateurs, on définit le coefficient de performance CP tel que

$$CP = \frac{|Q_L| \equiv \text{"avantage"}}{|W| \equiv \text{"prix à payer"}} = \frac{|Q_L|}{|Q_H| - |Q_L|},$$

où l'on a utilisé le premier principe qui donne $|W| = |Q_H| - |Q_L|$. Le deuxième principe de la thermodynamique stipule qu'on ne peut pas transférer de la chaleur d'un corps froid à un corps plus chaud sans consommer du travail ($W \neq 0$) donc $CP < \infty$ !

### Pompes à chaleur

Dans un réfrigérateur, on fournit du travail pour faire passer de la chaleur d'un corps plus froid à un corps plus chaud. Les pompes à chaleur font quelque chose de similaire mais avec un but différent : prendre de la chaleur à un corps froid (l'extérieur) pour chauffer un corps plus chaud. Le prix à payer est le même ($|W|$) mais l'avantage est ici la chaleur $|Q_H|$ transférée au corps chaud. On définit donc

$$CP = \frac{|Q_H|}{|W|}.$$

Exemple : Quelle est la puissance thermique transférée à une maison par une pompe à chaleur de CP=3 et de puissance 2 kW ? $P_H = \frac{Q_H}{\Delta t} = CP \times \frac{|W|}{\Delta t} = 3 \times 2 = 6$ kW.