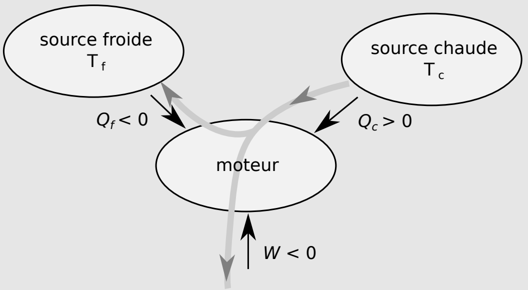
Thermodynamique
Chapitre 5

Machines thermiques

I Introduction

II Moteurs

1 - Signes des transferts



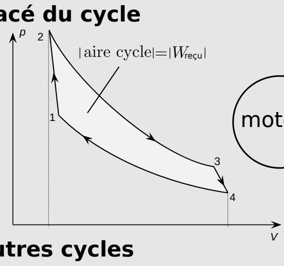
2 - Principe de fonctionnement

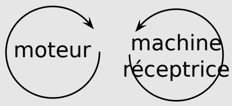
a/ Idée du fonctionnement : compression, détente, etc.

b/ Notion de cycle et variation des grandeurs d'état

$$\Delta U = \Delta H = \Delta S = 0$$

c/ Tracé du cycle





d/ Autres cycles

3 - Rendement

$$\eta = \frac{-W \text{ — utile}}{Q_c \text{ — couteux}}$$

4 - Cycle de Carnot

5 - Rendement maximal

1[er] ppe $W + Q_f + Q_c = 0$

2[nd] ppe $\dfrac{Q_f}{T_f} + \dfrac{Q_c}{T_c} \underbrace{=}_{\text{rev}} 0$

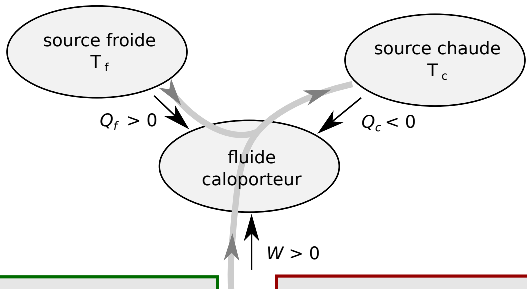
$\rightarrow \eta \leq \eta_{\text{rev}} = 1 - T_f/T_c$

théorème de Carnot

6 - Ordres de grandeurs

---

machines réceptrices



III Machines réfrigérantes

1 - Signes des transferts

2 - Principe de fonctionnement

a/ Idée du cycle classique : fluide en écoulement

b/ Tracé du cycle

3 - Efficacité

$$e = \frac{Q_f \text{ — utile}}{W \text{ — couteux}}$$

4 - Efficacité maximale

$W + Q_f + Q_c = 0$

$\dfrac{Q_f}{T_f} + \dfrac{Q_c}{T_c} \underbrace{=}_{\text{rev}} 0$

$\rightarrow e \leq e_{\text{rev}} = \dots$

IV Pompe à chaleur

1 - Signes des transferts

2 - Principe de fonctionnement

a/ Idée du cycle classique : fluide en écoulement

b/ Tracé du cycle

3 - Efficacité

$$e = \frac{-Q_c \text{ — utile}}{W \text{ — couteux}}$$

4 - Efficacité maximale

$W + Q_f + Q_c = 0$

$\dfrac{Q_f}{T_f} + \dfrac{Q_c}{T_c} \underbrace{=}_{\text{rev}} 0$

$\rightarrow e \leq e_{\text{rev}} = \dots$

Ce qu'il faut connaître

▶1 Comment s'écrit l'inégalité de Clausius ? Quand y a-t-il égalité ?

▶2 Quel est l'ordre de grandeur du rendement d'un moteur thermique de voiture ?

▶3 Quel est l'ordre de grandeur de l'efficacité d'un réfrigérateur ou d'une pompe à chaleur ?

Ce qu'il faut savoir faire

(cours : II,III,IV)

▶4 Pour un moteur, une machine réfrigérante ou une pompe à chaleur ditherme, donner le sens des échanges thermiques, la définition du rendement ou de l'efficacité, et savoir exprimer ce dernier / cette dernière en fonction des températures des sources. → **EC1,2,3**

▶5 Analyser un dispositif concret et le modéliser par une machine thermique ditherme. → TD

Exercices de cours

Exercice C1 – Moteur

On considère un moteur ditherme fonctionnant entre une source chaude à $T_c = 400\,°\mathrm{C}$ et une source froide à $T_f = 20\,°\mathrm{C}$. Lors d'un cycle, on note respectivement Q_c et Q_f les transferts thermiques reçus depuis ces sources, ainsi que W le travail reçu par le moteur.

1 - Réaliser un schéma du fonctionnement de la machine, faisant apparaître un rond pour chaque source, un rond pour la machine, et les transferts W, Q_f et Q_c.

Donner un exemple de source chaude et de source froide.

Préciser les signes de W, Q_f et Q_c.

2 - Dans un diagramme p-V, dans quel sens le cycle est-il parcouru ?

3 - Définir le rendement du moteur.

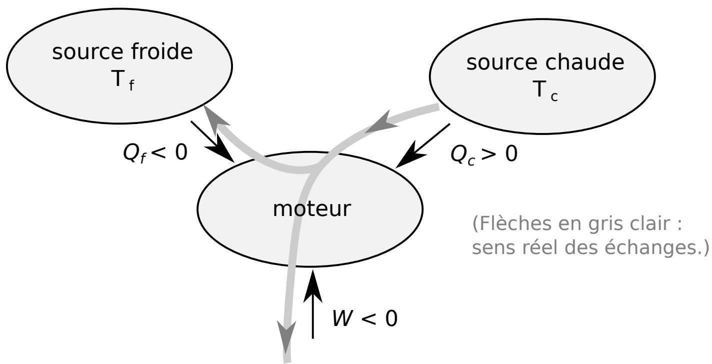
4 - On suppose le fonctionnement réversible. Démontrer que le rendement s'écrit $\eta_{\text{rév}} = 1 - \dfrac{T_f}{T_c}$. Faire l'application numérique.

5 - Que peut-on dire du rendement d'un moteur non réversible par rapport à l'expression du rendement ci-dessus ?

Correction

1 - Cf schéma ci-contre. On a représenté avec des flèches noires les transferts algébriquement reçus par le moteur, et en gris clair le sens réel. Ainsi : si les flèches noires et les flèches gris clair sont de sens opposé, c'est que ce transfert est négatif pour le moteur ; si elles sont de même sens c'est qu'il est positif.

Exemples de sources chaudes : combustion du mélange air-carburant, combustion de charbon, de combustible nucléaire ; et froides : l'atmosphère, une rivière...



2 - Pour un moteur, le cycle est toujours parcouru dans le sens horaire.

3 - Grandeur utile : $-W$, grandeur coûteuse : Q_c. D'où $\boxed{\eta = \dfrac{-W}{Q_c}.}$ (on met des moins pour avoir des grandeurs positives)

4 - Il s'agit de refaire la démonstration du II.5, à la différence qu'ici on suppose directement que le fonctionnement est réversible. On sait qu'il s'agira du rendement maximal.

⋆ Premier principe au système {moteur} sur un cycle :

$$\underbrace{\Delta U}_{=0} = W + Q_c + Q_f, \quad \text{donc} \quad W = -Q_c - Q_f$$

($\Delta U = 0$ sur un cycle car U est une grandeur d'état).

⋆ Second principe au système {moteur} sur un cycle :

$$\underbrace{\Delta S}_{=0} = \underbrace{\frac{Q_f}{T_f} + \frac{Q_c}{T_c}}_{S_e} + \underbrace{0}_{S_c}, \quad \text{donc} \quad \frac{Q_f}{Q_c} = -\frac{T_f}{T_c}.$$

($\Delta S = 0$ sur un cycle car S est une grandeur d'état).

⋆ Le rendement s'écrit :

$$\eta \underbrace{=}_{\text{par déf.}} \frac{-W}{Q_c} \underbrace{=}_{1^{\text{er}}\text{ ppe}} \frac{Q_c + Q_f}{Q_c} = 1 + \frac{Q_f}{Q_c} \underbrace{=}_{2^{\text{nd}}\text{ ppe}} 1 - \frac{T_f}{T_c}.$$

On a donc $\boxed{\eta_{\text{rév}} = 1 - \dfrac{T_f}{T_c}.}$

⋆ A.N. : $\boxed{\eta_{\text{rév}} = 1 - \dfrac{20 + 273}{400 + 273} = 0{,}56.}$

5 - Si le fonctionnement n'est pas réversible alors on sait que $\boxed{\eta < \eta_{\text{rév}}.}$

Exercice C2 – Machine réfrigérante

On considère un réfrigérateur ditherme fonctionnant entre une source chaude à $T_c = 24\,°\mathrm{C}$ et une source froide à $T_f = 4\,°\mathrm{C}$. Lors d'un cycle, on note respectivement Q_c et Q_f les transferts thermiques reçus depuis ces sources, ainsi que W le travail reçu par le fluide.

1 - Réaliser un schéma du fonctionnement de la machine, faisant apparaître un rond pour chaque source, un rond pour la machine, et les transferts W, Q_f et Q_c.

Donner un exemple de source chaude et de source froide.

Préciser les signes de W, Q_f et Q_c.

2 - Dans un diagramme p-V, dans quel sens le cycle est-il parcouru ?

3 - Définir l'efficacité de la machine.

4 - On suppose le fonctionnement réversible. Démontrer que l'efficacité s'écrit $e_{\text{rév}} = \dfrac{T_f}{T_c - T_f}$. Faire l'application numérique.

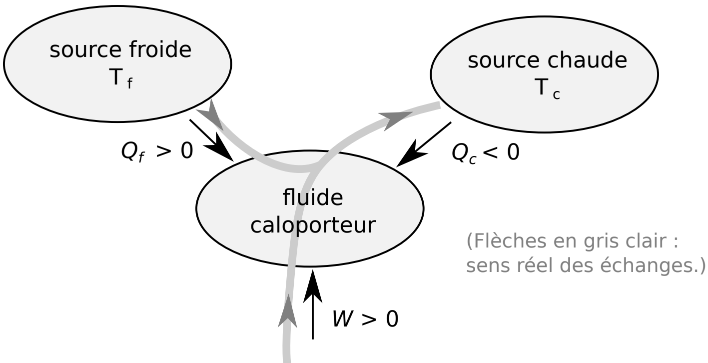
5 - Que peut-on dire de l'efficacité d'une machine non réversible par rapport à l'expression du rendement ci-dessus ?

6 - On considère un réfrigérateur d'efficacité $e = 1{,}5$. Pour compenser l'isolation non parfaite du frigo, la puissance thermique à extraire du compartiment froid est $\mathcal{P}_{\text{th}} = 300\,\mathrm{W}$. Quelle est la puissance électrique à fournir au réfrigérateur pour effectuer ceci ?

Correction

1 - Cf schéma ci-contre. On a représenté avec des flèches noires les transferts algébriquement reçus par le fluide caloporteur, et en gris clair le sens réel. Ainsi si les flèches noires et les flèches gris clair sont de sens opposé, c'est que ce transfert est négatif pour le fluide.

Exemples de sources chaudes : la cuisine pour un frigo ou congélateur, l'extérieur pour un climatiseur ; et froides : le compartiment à refroidir du frigo ou congélateur, la pièce à refroidir pour un climatiseur.



2 - Pour une machine réceptrice (ce qui est le cas d'une machine réfrigérante), le cycle est toujours parcouru dans le sens anti-horaire.

3 - Grandeur utile : Q_f, grandeur coûteuse : W. D'où $\boxed{e = \dfrac{Q_f}{W}}$.

4 - Il s'agit de refaire la démonstration du III.4. Nous renvoyons donc au cours.

⋆ A.N. : $\boxed{e_{\text{rév}} = 1 - \dfrac{4+273}{(24+273)-(4+273)} = 13{,}9.}$

5 - Si le fonctionnement n'est pas réversible alors on sait que $\boxed{e < e_{\text{rév}}.}$

6 - On a $e = \dfrac{Q_f}{W}$, donc $W = \dfrac{Q_f}{e}$. Ici on raisonne en puissance, donc par exemple pour une durée de $t = 1\,\mathrm{s}$, on a une puissance à fournir $P = W/t = \dfrac{Q_f/t}{e}$, et $Q_f/t = 300\,\mathrm{W}$ d'après l'énoncé.

Il faut donc fournir une puissance $P = \dfrac{300}{1{,}5} = 200\,\mathrm{W}$.

Exercice C3 – Machine pompe à chaleur

On considère une pompe à chaleur ditherme fonctionnant entre une source chaude à $T_c = 20\,°\mathrm{C}$ et une source froide à $T_f = 0\,°\mathrm{C}$. Lors d'un cycle, on note respectivement Q_c et Q_f les transferts thermiques reçus depuis ces sources, ainsi que W le travail reçu par le fluide.

1 - Réaliser un schéma du fonctionnement de la machine, faisant apparaître un rond pour chaque source, un rond pour la machine, et les transferts W, Q_f et Q_c.

Donner un exemple de source chaude et de source froide.

Préciser les signes de W, Q_f et Q_c.

2 - Dans un diagramme p-V, dans quel sens le cycle est-il parcouru ?

3 - Définir l'efficacité de la machine.

4 - On suppose le fonctionnement réversible. Démontrer que l'efficacité s'écrit $e_{\text{rév}} = \dfrac{T_c}{T_c - T_f}$. Faire l'application numérique.

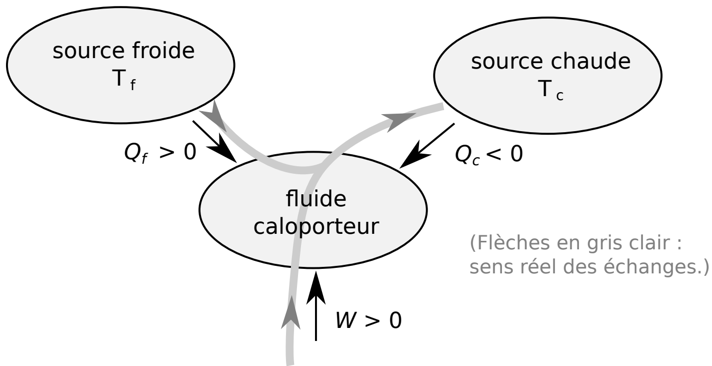
5 - Que peut-on dire de l'efficacité d'une machine non réversible par rapport à l'expression du rendement ci-dessus ?

6 - On considère une pompe à chaleur d'efficacité $e = 3$. La puissance thermique à fournir pour chauffer la maison est de $\mathcal{P}_{\text{th}} = 5\,\text{kW}$. Quelle est la puissance électrique à fournir à la pompe pour effectuer ceci ?

Correction

1 - Cf schéma ci-contre. On a représenté avec des flèches noires les transferts algébriquement reçus par le fluide caloporteur, et en gris clair le sens réel. Ainsi si les flèches noires et les flèches gris clair sont de sens opposé, c'est que ce transfert est négatif pour le fluide.

Exemples de sources chaudes : l'intérieur de la maison à chauffer ; et froides : l'extérieur de la maison.



2 - Pour une machine réceptrice (ce qui est le cas d'une pompe à chaleur), le cycle est toujours parcouru dans le sens anti-horaire.

3 - Grandeur utile : $-Q_c$, grandeur coûteuse : W. D'où $\boxed{e = \dfrac{-Q_c}{W}.}$ (on met des moins pour avoir des grandeurs positives)

4 - Il s'agit de refaire la démonstration du IV.4. Nous renvoyons donc au cours.

$\star$ A.N. : $\boxed{e_{\text{rév}} = \dfrac{20+273}{(20+273)-(0+273)} = 14{,}7.}$

5 - Si le fonctionnement n'est pas réversible alors on sait que $\boxed{e < e_{\text{rév}}.}$

6 - On a $e = \dfrac{-Q_c}{W}$, donc $W = \dfrac{-Q_c}{e}$. Ici on raisonne en puissance, donc par exemple pour une durée de $t = 1\,\text{s}$, on a une puissance à fournir $P = W/t = \dfrac{-Q_c/t}{e}$, et $-Q_c/t = 5\,\text{kW}$ d'après l'énoncé.

Il faut donc fournir une puissance $P = \dfrac{5000}{3} = 1{,}7\,\text{kW}$.

Exercice C4 – Cycle moteur de Carnot

Nous étudions ici le cycle moteur de Carnot. C'est un cycle ditherme au contact d'une source chaude à T_c et d'une source froide à T_f. Le fluide est un gaz, que l'on modélisera comme parfait, qui suit les étapes idéales suivantes :

- 1→2 : apport de chaleur au contact de la source chaude, lors de cet apport le gaz évolue de façon isotherme (sa température reste constante égale à T_c). Il reçoit un transfert Q_c.
- 2→3 : détente adiabatique et réversible.
- 3→4 : évacuation de chaleur isotherme au contact de la source froide, lors de cet apport le gaz évolue de façon isotherme (sa température reste constante égale à T_f). Il reçoit un transfert Q_f.
- 4→1 : compression adiabatique et réversible.

On remarque qu'ici les échanges de chaleur avec les sources ne sont pas isochores : lors de l'apport de chaleur T_{gaz} reste constant et donc le volume du gaz augmente, et lors du contact avec la source froide T_{gaz} reste aussi constant, et donc le volume du gaz diminue. Il y a donc un travail non nul associé à ces deux étapes.

Ces échanges de chaleur étant isotherme avec $T = T_{\text{ext}}$, on peut les supposer réversibles. Toutes les étapes sont donc réversibles.

On définit le travail reçu par le gaz lors d'un cycle : $W = W_{12} + W_{23} + W_{34} + W_{41}$,

1 - Représenter le moteur sur un diagramme où apparaissent moteur, sources, milieu extérieur, Q_c, Q_f et W. Donner les signes de ces grandeurs.

2 - Représenter le tracé du cycle dans le diagramme p-V, avec les numéros des étapes. Attention au sens, c'est un moteur donc ?

3 - Définir le rendement du moteur en fonction de grandeurs parmi Q_c, Q_f et W. Attention aux signes.

4 - Écrire le 1^er et 2^nd principe appliqué au moteur sur un cycle. En déduire une relation entre Q_c, Q_f et W, et une relation entre Q_c/Q_f et T_c/T_f.

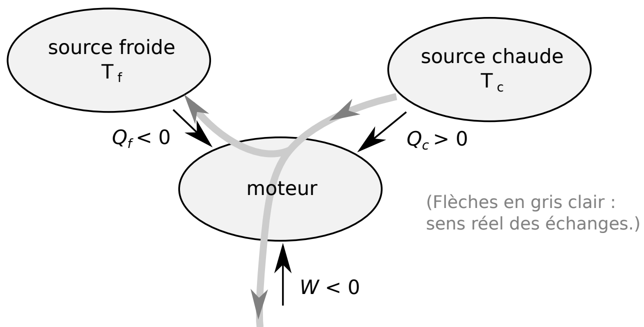
En déduire l'expression du rendement du moteur. On fera l'application numérique pour $T_f = 20\,°\mathrm{C}$ et $T_c = 400\,°\mathrm{C}$.

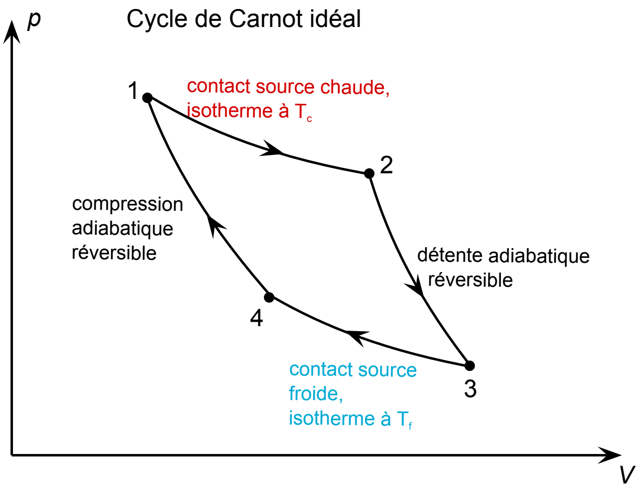
5 - Quel est le désavantage des échanges thermiques envisagés ici (température du fluide égale à la température de la source extérieure) ?

Correction

1 - Cf schéma ci-dessous. On a représenté avec des flèches noires les transferts algébriquement reçus par le moteur, et en gris clair le sens réel. Ainsi si les flèches noires et les flèches gris clair sont de sens opposé, c'est que ce transfert est négatif pour le moteur.

2 - Cf ci-dessous. Pour un moteur, le cycle est toujours parcouru dans le sens horaire.





3 - Grandeur utile : $-W$, grandeur coûteuse : Q_c. D'où $\boxed{\eta = \dfrac{-W}{Q_c}.}$ (on met des moins pour avoir des grandeurs positives)

4 - Identique à la question 4 de l'EC 1.

⋆ Premier principe au système {moteur} sur un cycle :

$$\underbrace{\Delta U}_{=0} = W + Q_c + Q_f, \quad \text{donc} \quad W = -Q_c - Q_f$$

($\Delta U = 0$ <u>sur un cycle</u> car U est une grandeur d'état).

⋆ Second principe au système {moteur} sur un cycle :

$$\underbrace{\Delta S}_{=0} = \underbrace{\frac{Q_f}{T_f} + \frac{Q_c}{T_c}}_{S_e} + \underbrace{0}_{S_c}, \quad \text{donc} \quad \frac{Q_f}{Q_c} = -\frac{T_f}{T_c}.$$

($\Delta S = 0$ <u>sur un cycle</u> car S est une grandeur d'état).

⋆ Le rendement s'écrit :

$$\eta \underbrace{=}_{\text{par déf.}} \frac{-W}{Q_c} \underbrace{=}_{1^{\text{er}}\text{ ppe}} \frac{Q_c + Q_f}{Q_c} = 1 + \frac{Q_f}{Q_c} \underbrace{=}_{2^{\text{nd}}\text{ ppe}} 1 - \frac{T_f}{T_c}.$$

On a donc $\boxed{\eta_{\text{rév}} = 1 - \dfrac{T_f}{T_c}.}$

A.N. : $\eta = 1 - \dfrac{T_f}{T_c} = 0{,}56$.

Signification : 56% du transfert thermique prélevé à la source chaude est utilisé pour faire tourner le moteur. Le reste (44%) est inutilement rejeté dans l'atmosphère sous forme de chaleur.

5 - Ces échanges thermiques sont nécessairement infiniment lents (puisque source et gaz sont à la même température). Le moteur tourne donc avec une vitesse nulle, ou quasi nulle.

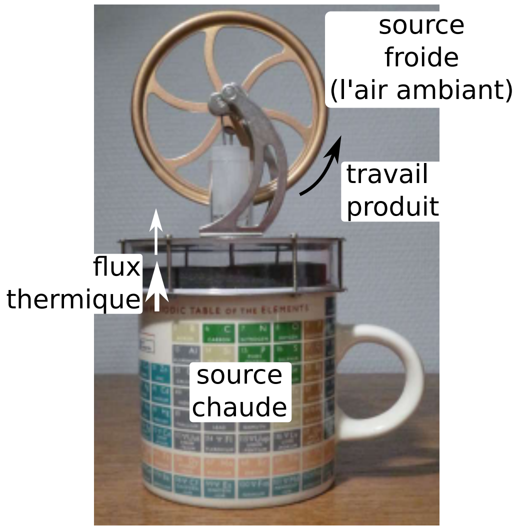
En pratique il faut donc des températures différentes, donc de l'irréversibilité : il faut trouver un compromis entre vitesse des échanges (pour avoir une puissance non nulle) et réversibilité (pour avoir un bon rendement).

Cours

I – Introduction

Les machines thermiques sont des dispositifs qui mettent en jeu des transferts thermiques entre des sources chaudes et froides, ainsi que des travaux mécaniques.

On se restreint aux machines thermiques *dithermes* : qui utilisent *deux* sources de chaleur. C'est le cas de l'immense majorité de ces machines. Il y a donc une source froide et une source chaude.



On classe les machines thermiques en fonction de leur objectif :

- **Les moteurs :** exploite un flux thermique d'une source chaude vers une source froide, et en détourne une partie pour le transformer en travail mécanique (la rotation de l'arbre moteur).

  Objectif : production d'un travail.

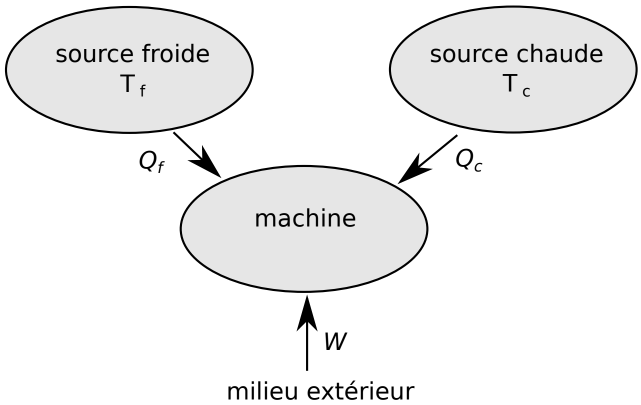
- **Les machines réceptrices :** elles reçoivent un travail afin de forcer un flux thermique dans le sens non-spontané, c'est-à-dire le forcer de la source froide vers la source chaude.

  Deux catégories :

  - **Réfrigérateur** (ou climatiseur) : force le compartiment froid à être davantage froid.
  - **Pompe à chaleur :** force la source chaude (l'intérieur de la maison) à être davantage chaude.

On schématise les échanges effectués par une machine ditherme comme ci-contre.

- W : travail reçu par la machine depuis le milieu extérieur.
- Q_f : transfert thermique reçu par la machine de la part de la source froide.
- Q_c : transfert thermique reçu par la machine de la part de la source chaude.



Attention, il y a plusieurs systèmes ici : la machine elle-même, le fluide qui y circule, la source froide, la source chaude. Il faudra bien préciser lors de l'application des principes.

Attention : les transferts Q_f, Q_c, W sont algébriquement **reçu** par la machine, donc s'ils sont positifs c'est que la machine les reçoit effectivement, s'ils sont négatifs c'est qu'en fait le sens réel est de la machine vers l'extérieur ou vers les sources.

II – Moteurs

1 – Signes des transferts

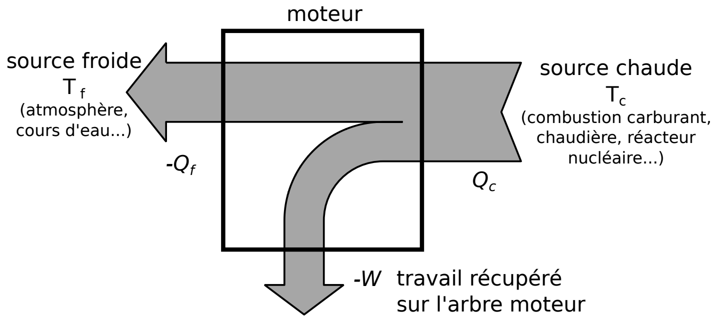
Objectif : produire un travail afin de faire tourner un arbre moteur.

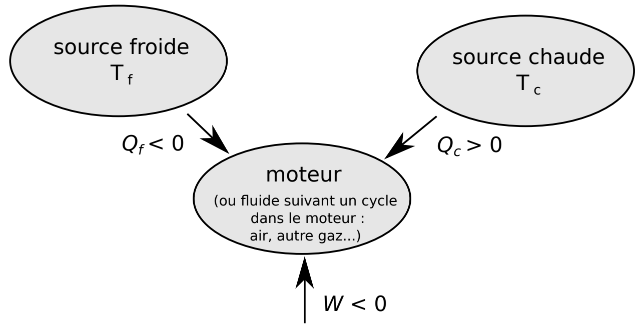
La source d'énergie est une source chaude :

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

Le source froide est en général l'atmosphère (pour un moteur de voiture), ou une rivière (cas des centrales nucléaires).

Le schéma général est donc celui dessiné à droite.





Signes des transferts (>0 si reçus, <0 si cédés) :

- $W<0$ car le moteur ne reçoit pas un travail ! Il en produit un, donc $W<0$.

  Ainsi l'extérieur reçoit un travail $-W>0$.
- $Q_c>0$ car le moteur reçoit effectivement de la chaleur de la part de la source chaude. C'est cette énergie qui le fait tourner.
- $Q_f<0$ car le moteur ne reçoit pas de chaleur de la source froide : c'est le contraire, il rejette un surplus de chaleur vers cette source froide.

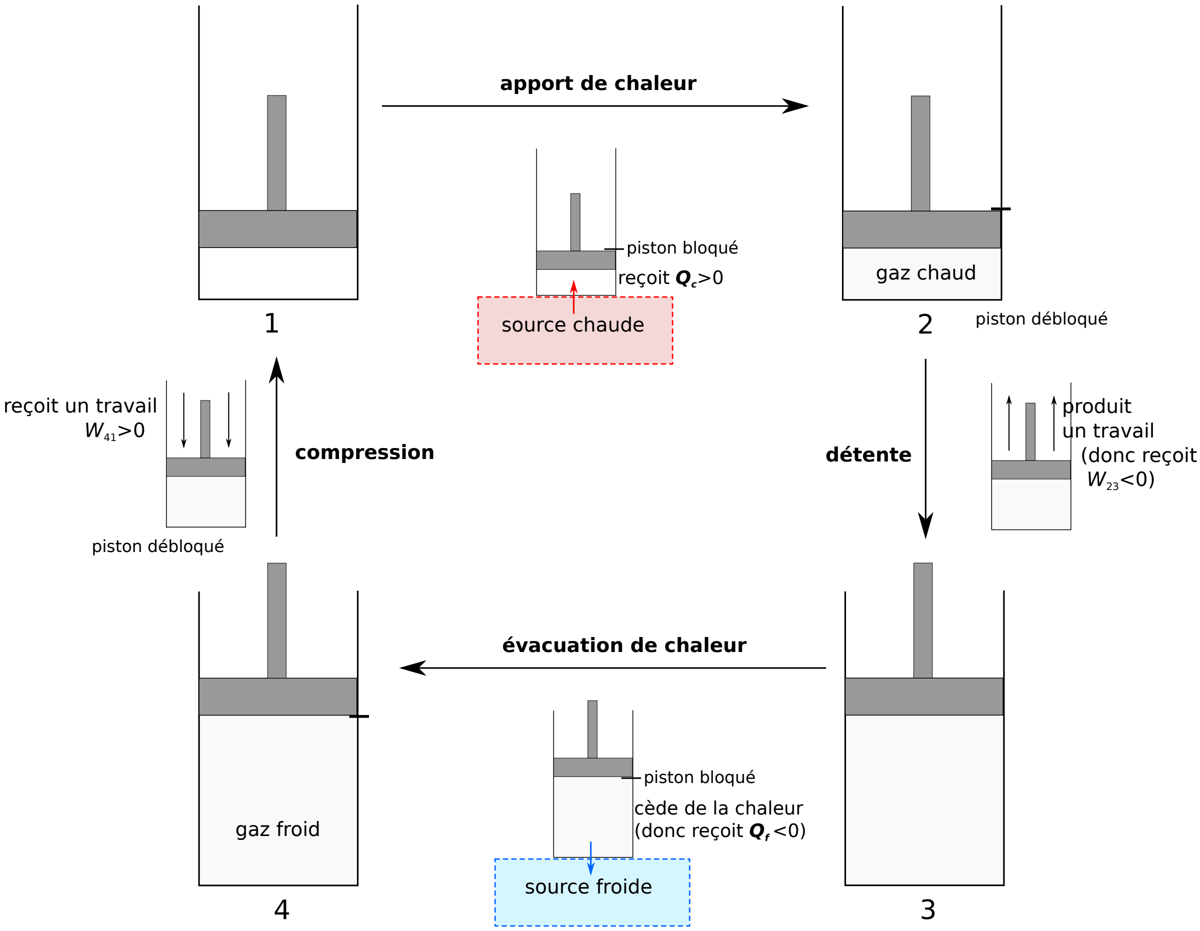
  Penser au moteur d'une voiture, qui chauffe et donc cède un transfert thermique vers l'atmosphère.

Il faut savoir refaire ce type de schéma, et expliquer les signes des transferts. Ceci est repris dans la question 1 de l'**EC1**.

2 – Principe de fonctionnement

a/ Idée du fonctionnement

Nous envisageons ci-dessous un **exemple** qui permet de comprendre le principe de fonctionnement d'un moteur.



- L'étape 1→2 est un apport de chaleur : on prélève de l'énergie à la source chaude, sous forme de transfert thermique Q_c.
- L'étape 2→3 est une détente : on laisse le gaz chaud (et donc sous haute pression) se détendre librement. Via un système de bielle, ceci entraîne une roue et produit un travail sur l'axe moteur.
- L'étape 3→4 sert à refroidir le gaz, en cédant un transfert thermique vers la source froide.
- Avant de recommencer, il faut retourner à l'état 1 en comprimant le gaz.

  L'étape 4→1 est donc une compression. Il faut pour cela fournir un travail au gaz.

  Ceci peut se faire via une roue d'inertie comme avec le moteur de Stirling (image page 6) : une fois lancée par la détente 2→3, la roue continue de tourner et comprime le gaz ; ou dans un moteur de voiture par la détente du gaz dans un cylindre adjacent (il y a souvent plusieurs cylindres).

Remarquons que le travail gagné lors de la détente doit être supérieur à celui nécessaire à la compression (il faut $|W_{23}| > |W_{41}|$). C'est pour cela qu'on a refroidit le gaz avant de le comprimer.

Bilan : la source d'énergie fournit Q_c, et ceci est en partie converti en un travail, en partie rejeté vers la source froide.

Attention : ceci est un exemple. En particulier les apports et évacuations de chaleur ne sont pas toujours isochores, ils peuvent aussi être isobares ou isothermes.

b/ Notion de cycle et variation des grandeurs d'état

L'exemple ci-dessus montre qu'une machine thermique est nécessairement **cyclique** : après un certain nombre d'étapes, l'ensemble revient dans le même état qu'initialement.

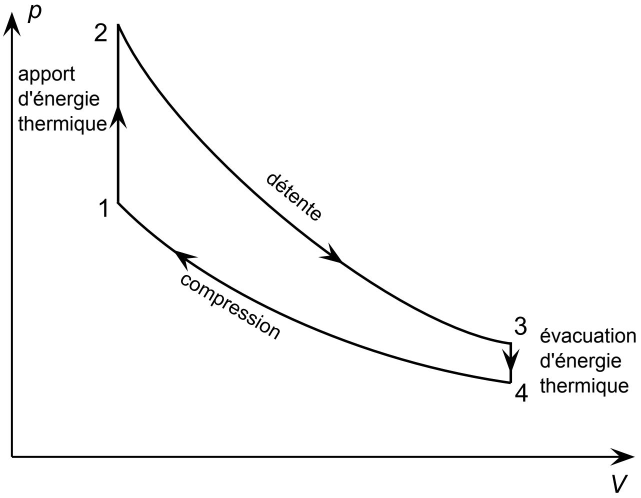
$\rightsquigarrow_1$ Quelle conséquence ceci a-t-il sur la variation des grandeurs d'état sur un cycle ?
Elles sont nulles : sur un cycle, $\Delta U = 0$, $\Delta S = 0$, $\Delta H = 0$.
En effet, on a par exemple $\Delta U = U_{\text{fin du cycle}} - U_{\text{début du cycle}} = U(\{T,p,V\}_{\text{fin du cycle}}) - U(\{T,p,V\}_{\text{début du cycle}}) = 0$, puisque T, p et V sont les mêmes au début et à la fin du cycle.

Fonctionnement cyclique et variation des grandeurs d'état

Une machine thermique fonctionne selon des cycles.

La variation sur un cycle des grandeurs d'état est nulle : $\Delta U = 0$, $\Delta H = 0$, $\Delta S = 0$.

c/ Tracé du cycle dans le diagramme p-V



Si la transformation est mécaniquement réversible, alors la pression p du gaz est uniforme à tout instant et parler de LA pression du gaz a un sens. Il est possible de tracer l'évolution du cycle dans le diagramme p-V.

→ C'est ce qui est fait ci-contre pour l'exemple du a/.

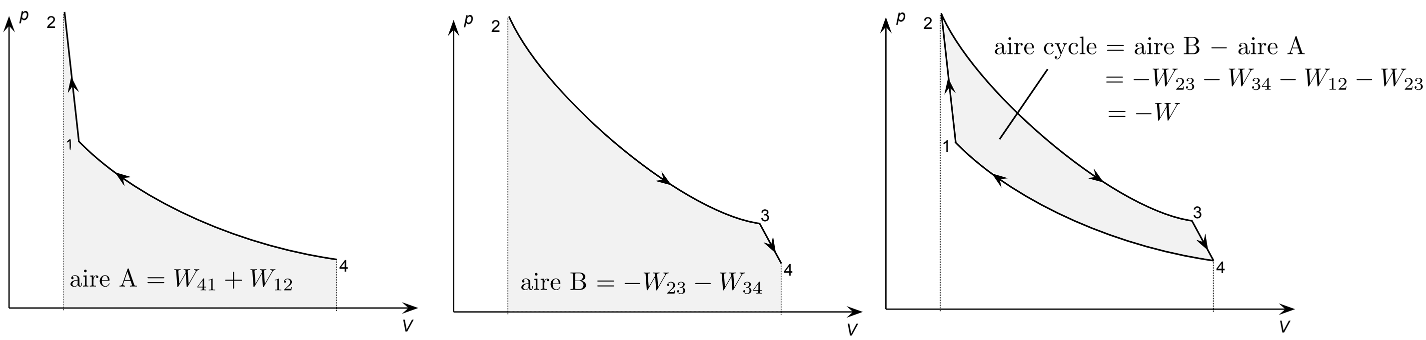
Propriété : sens du cycle dans le diagramme p-V

- Un moteur parcourt son cycle dans le sens horaire.
- Une machine réceptrice (qui reçoit un travail $W > 0$, donc de type réfrigérateur ou pompe à chaleur) parcourt son cycle dans le sens antihoraire.

Pour le moteur, l'aire du cycle donne le travail produit par le moteur sur un cycle.
Pour une machine réceptrice, elle donne le travail consommé sur un cycle.

On retiendra, car cela rime : "moteur = sens des heures".

Démonstration :



Remarque : W_{12} est le travail reçu par le fluide lors de l'étape 1→2, et de même pour W_{23}, W_{34} et W_{41}.
W est le travail reçu par le fluide sur tout le cycle : $W = W_{12} + W_{23} + W_{34} + W_{41}$.

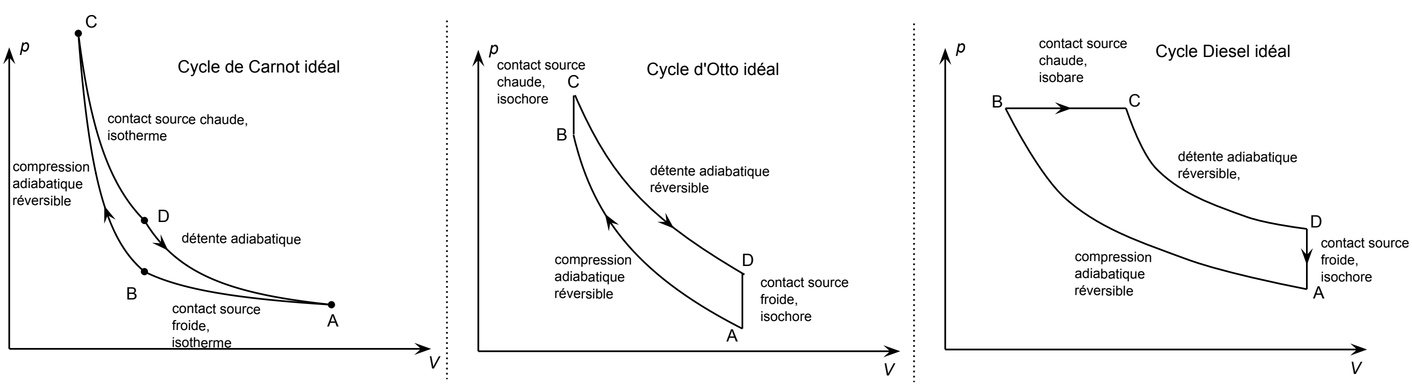
→ *L'aire du cycle* donne l'opposée du travail total reçu par le fluide.

→ Ici, aire B > aire A, donc l'aire du cycle est positive, donc le travail total reçu par le moteur est négatif : c'est bien un moteur.

Si le cycle avait été parcouru dans le sens inverse, on aurait eu aire B < aire A, donc une aire du cycle négative, donc un travail total reçu positif : il s'agit alors d'une machine réceptrice (réfrigérateur, pompe à chaleur).

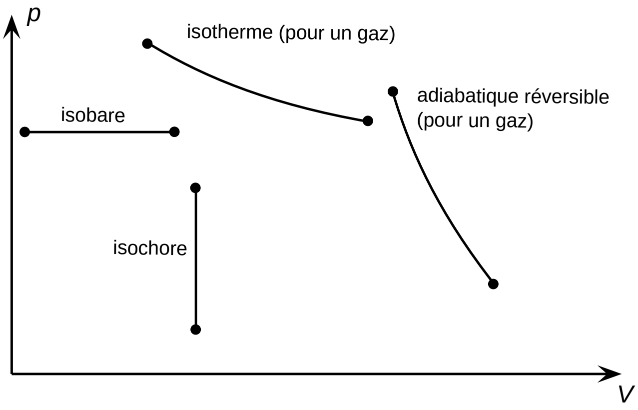
d/ Autres cycles

Bien sûr, notre exemple de cycle est arbitraire. Il correspond en fait au cycle dit de Beau de Rochas (ou d'Otto), et est celui utilisé dans les moteurs à essence. Mais d'autres existent, par exemple (pas à connaître) :



Ci-contre l'allure de différentes évolutions.
(à connaître)

L'adiabatique réversible (⇔ isentropique) est plus pentue que l'isotherme.



3 – Rendement

Définition du rendement

Le rendement est défini par : $\eta = \dfrac{\text{grandeur utile}}{\text{grandeur coûteuse}}$.

Dans le cas d'un moteur :

- la grandeur utile est le travail produit sur un cycle : $-W$;
- la grandeur coûteuse est le transfert thermique prélevé à la source chaude : Q_c.

Ainsi, $\eta = \dfrac{-W}{Q_c}$.

Par conservation de l'énergie, on a $\eta \leq 1$.

- Q_f n'apparaît pas dans le rendement, car il s'agit de la chaleur rejetée vers l'atmosphère (qui est à la fois inutile et qui ne coûte rien).
- On a mis un signe moins devant W pour avoir un rendement positif (rappel : $W < 0$ et $Q_c > 0$ pour un moteur).

4 – Cycle de Carnot

Un exemple de cycle idéal est celui de Carnot $\rightsquigarrow_2$ faire pour cela l'**EC4**, questions 1, 2, 3.

Remarque : on peut aussi imaginer un cycle de Carnot où il y a des changements d'état, que l'on peut tracer sur un diagramme de Clapeyron.

5 – Rendement maximal

Étant donné un moteur fonctionnant entre une source froide à T_f et une source chaude à T_c, fixées (par exemple 20 °C et 300 °C comme dans l'EC4), on peut se demander s'il possible d'avoir un rendement qui s'approche autant que possible de 1, ou s'il y a une limite imposée par la physique...

On sent bien que cela va avoir un lien avec l'entropie créée, qui est synonyme d'énergie mal exploitée.

Considérons donc un moteur ditherme, fonctionnant entre une source froide à T_f et une chaude à T_c, échangeant sur un cycle un transfert thermique Q_f avec la première et Q_c avec la seconde, et un travail W avec le milieu extérieur (tous comptés comme algébriquement reçu par le moteur).

a/ Inégalité de Clausius

$\rightsquigarrow_3$
Démontrons cette inégalité.

On écrit le second principe au système {moteur} sur un cycle : $\Delta S = S_e + S_c$, avec :

- $\Delta S = 0$ car il s'agit d'un cycle et que S est une grandeur d'état.
- $S_e = \dfrac{Q_f}{T_f} + \dfrac{Q_c}{T_c}$.

  (en effet, il faut sommer l'entropie échangée reçue au contact de chacun des thermostats, et ici il y en a deux)

– $S_c \geq 0$, nul si et seulement si réversible.

Le second principe peut donc s'écrire :

$$S_e = -S_c \leq 0, \quad \text{soit} \quad \boxed{\frac{Q_f}{T_f} + \frac{Q_c}{T_c} \leq 0 \text{ et égalité si c'est réversible.}}$$

L'inégalité encadrée s'appelle **inégalité de Clausius**. Elle est valable pour toute machine ditherme. Il faut savoir la redémontrer rapidement.

b/ Rendement maximal

$\leadsto_4$ Faire l'**EC1**.

Bilan :

Rendement maximal d'un moteur

Le rendement d'un moteur fonctionnant entre une source froide à T_f et une source chaude à T_c est maximal s'il est réversible, et s'écrit alors :

$$\eta_{\text{rév}} = 1 - \frac{T_f}{T_c}.$$

Pour un moteur réel, $\eta \leq \eta_{\text{rév}}$.

Remarque : comme par définition $T_c > T_f > 0$, on a $0 \leq \eta \leq 1$.

> **Exemple d'A.N. :** $T_f = 20\,°\text{C}$ et $T_c = 400\,°\text{C}$ donnent un rendement maximal $\eta_{\text{rév}} = 0{,}56$.
> Il est donc *impossible* de faire mieux (avec ces sources là), quel que soit le cycle envisagé, le fluide utilisé, etc...
>
> **Attention :** bien mettre les températures en kelvin !

$\leadsto_5$ Faire la fin de l'**EC4** (questions 4 et 5).

c/ Autre démonstration : si on garde S_c (partie en complément)

Reprenons la démonstration de l'EC1, mais sans supposer le cycle réversible : $\dfrac{Q_f}{T_f} + \dfrac{Q_c}{T_c} = -S_c$.

Celle-ci implique que $\dfrac{Q_f}{T_f} = -\dfrac{Q_c}{T_c} - S_c$, soit en multipliant par $\dfrac{T_f}{Q_c}$: $\dfrac{Q_f}{Q_c} = -\dfrac{T_f}{T_c} - \dfrac{T_f}{Q_c} S_c$.

On a donc

$$\eta = \frac{-W}{Q_c} = \frac{Q_c + Q_f}{Q_c} = 1 + \frac{Q_f}{Q_c} = \underbrace{1 - \frac{T_f}{T_c}}_{=\eta_{\text{rév}}} - \underbrace{\frac{T_f}{Q_c}}_{\geq 0} S_c\,.$$

On trouve donc que

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

→ On voit que la création d'entropie au cours d'un cycle est équivalente à une baisse de rendement. On retrouve donc ce que nous disions au chapitre 3 :

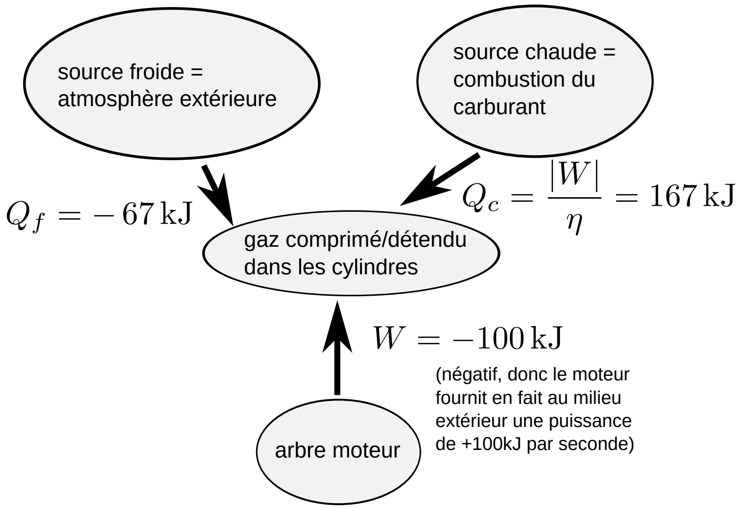
Création d'entropie ⇔ Baisse de rendement ou d'efficacité
⇔ De l'énergie disponible a été mal utilisée (dissipée, ou dégradée)

Exemple : on considère un moteur de voiture, de rendement réversible $\eta_{\text{rév}} = 0{,}6$, et qui doit fournir à l'arbre moteur une puissance typique de $100\,\text{kW}$ (donc $100\,\text{kJ}$ par seconde).

Le rendement réel est plutôt $\eta_{\text{réel}} = 0{,}3$.

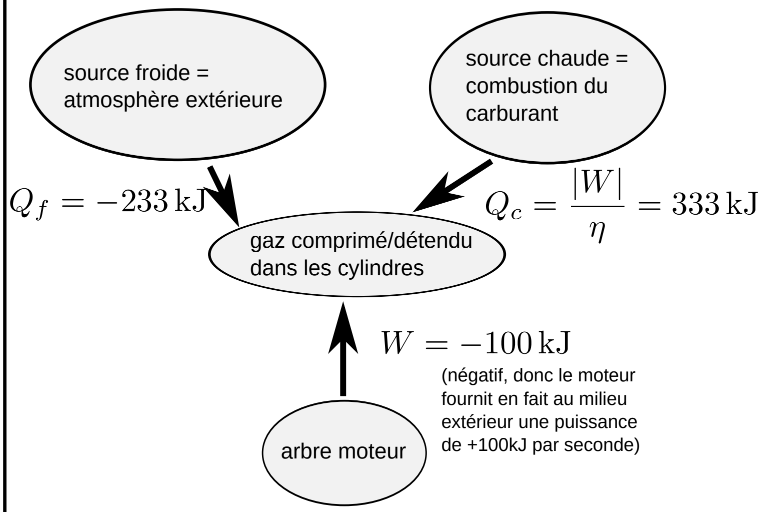
Fonctionnement réversible, S_c=0 - rendement = 0.6

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 100kJ par seconde 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.



6 – Ordres de grandeur

Le rendement réel d'un moteur thermique est de l'ordre de 0,3.

Il y a bien sur des différences.

Ci-contre moteur Diesel de puissance de 25 MW propulsant un pétrolier de 290 000 tonnes. Chacune des portes donne sur un des sept cylindres du moteur. Les pistons ont une course de plusieurs mètres, avec une vitesse assez lente. Ceci permet d'être assez proche de la réversibilité et donc du rendement maximal réversible, et d'atteindre η de l'ordre de 50%.

En comparaison, un moteur de voiture développe environ 100 kW et tourne à plusieurs milliers de tours par minutes, ce qui l'éloigne de la réversibilité.

(Source : CC-by-sa par H. Cozanet, issue du livre de O. Cleynen, Thermodynamique de l'ingénieur)

III – Machine réfrigérante

1 – Signes des transferts

Objectif : refroidir le compartiment interne du réfrigérateur.

Ainsi :

- La source froide est le compartiment interne du réfrigérateur.
- La source chaude est la pièce (la cuisine) dans laquelle est le réfrigérateur.
- Les échanges thermiques se font via un fluide (appelé fluide frigorigène ou caloporteur) qui circule dans le réfrigérateur.

  Sa circulation est assurée par une pompe.

  C'est ce fluide qui, lorsqu'il passe alternativement dans le compartiment interne ou à l'extérieur, réalise les échanges thermiques.

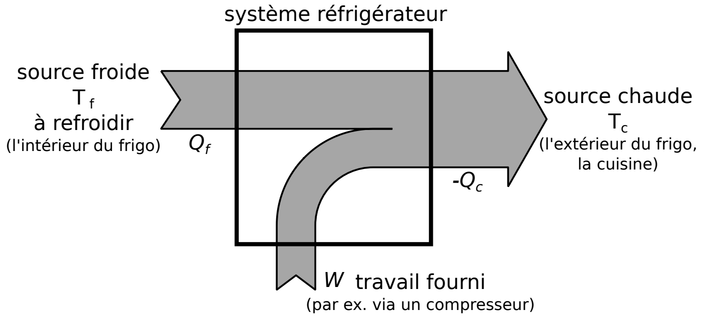
  → le système d'intérêt est donc le {fluide frigorigène}, qui reçoit Q_f, Q_c, W.
- La machine reçoit un travail positif, souvent électrique, qui sert à faire tourner un compresseur, qui à son tour fournit du travail au fluide frigorigène.

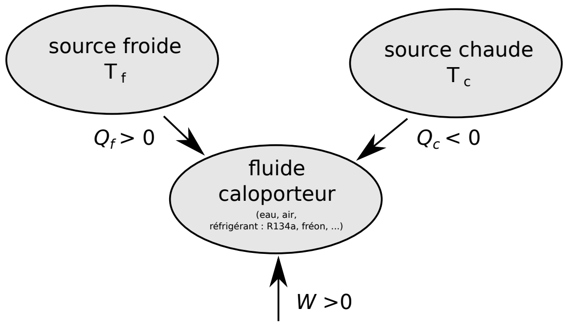
Le schéma général est donc celui dessiné à droite.

Signes des transferts (> 0 si reçus, < 0 si cédés) :

- $W > 0$ (vous savez bien qu'un réfrigérateur consomme de l'énergie).
- $Q_f > 0$ car l'objectif est d'extraire de la chaleur du compartiment interne (qui est la source froide).

  Le transfert thermique doit donc être dirigé de la source froide vers le fluide frigorigène, c'est-à-dire que ce fluide reçoit bien un transfert positif.
- $Q_c < 0$ car le réfrigérateur rejette la chaleur prélevée au compartiment interne vers l'extérieur (ainsi que le travail qu'il reçoit) (mettez la main derrière un frigo : il est chaud).





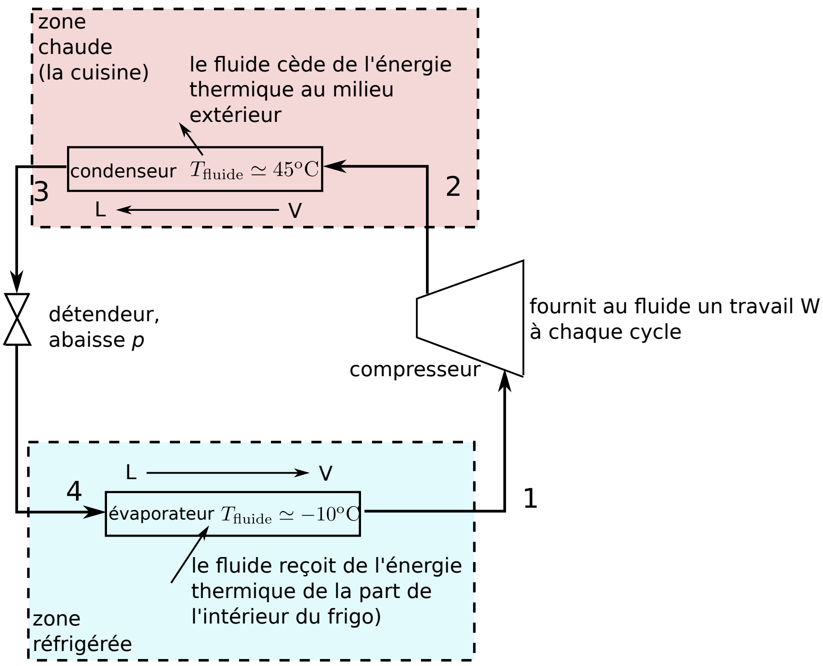
Remarque : signes inverses de ceux d'un moteur.

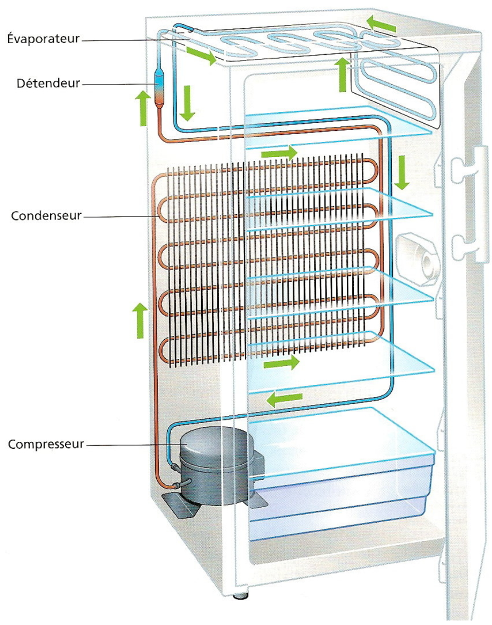
Remarque : pour un climatiseur, la source froide est la pièce à climatiser, et la source chaude est l'extérieur de la pièce.

2 – Principe de fonctionnement

a/ Idée : le cycle classiquement mis en œuvre

(ce qui suit est là pour information, et n'est pas à connaître) Les machines réfrigérantes (frigo, congélateur, climatiseur) utilisent la plupart du temps la circulation d'un fluide frigorigène (qui a de bonnes propriétés thermiques). Le fluide circule en circuit fermé, et s'écoule dans les différents organes de la machine.



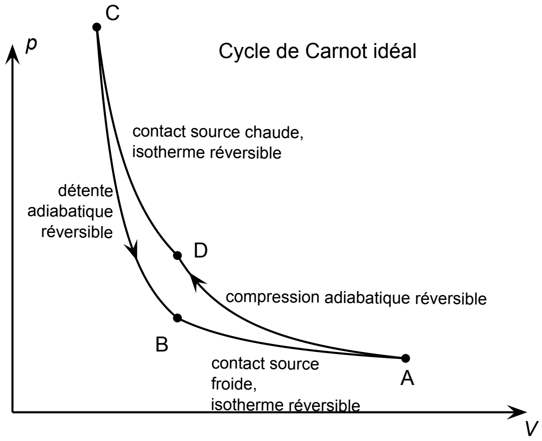


(source image : La physique par les objets quotidiens, Cédric Ray)

- Le compresseur élève sa pression, et fournit un travail au fluide. Cette compression élève sa température au delà de celle de la source chaude (jusqu'à $\simeq 45\,^{\circ}\mathrm{C}$).
- Le fluide chaud circule ensuite dans un échangeur (appelé condenseur, car le fluide condense, c'est la grille noire à l'arrière du réfrigérateur). Comme le fluide est plus chaud que la cuisine, il cède un transfert thermique vers la cuisine (il reçoit donc $Q_c < 0$). C'est l'évacuation de chaleur.
- Le fluide passe dans un détendeur qui abaisse sa pression et le refroidit, à une température inférieure à celle du compartiment à refroidir (jusqu'à $T \simeq -10\,^{\circ}\mathrm{C}$ pour un frigo sans congélateur).
- Le fluide circule ensuite dans un échangeur thermique (appelé évaporateur car le fluide devient gazeux), qui est dans la doublure interne du frigo. Comme le fluide est plus froid que l'intérieur du frigo, il sert à le refroidir. Il reçoit un transfert thermique $Q_f > 0$ de la part de cet intérieur.

L'étude détaillée de ce type de cycle ne peut pas se faire cette année, car les différents éléments (compresseur, échangeurs, détendeur) sont des systèmes ouverts où le fluide s'écoule en permanence. Or le 1^{er} et le 2^{nd} principe ne s'appliquent que pour des systèmes fermés. Vous verrez l'an prochain les versions "système ouvert" de ces principes.

b/ Tracé dans le diagramme p-V



On peut envisager d'autres cycles que ci-dessus. Par exemple le cycle de Carnot vu dans l'EC4 pour le moteur est réversible, et peut donc être réalisé dans l'autre sens. Les signes des transferts sont alors tous inversés, et on a bien une machine réfrigérante !

Ci-contre le tracé du cycle. → Il est parcouru dans le sens anti-horaire : c'est bien une machine réceptrice.

3 – Efficacité

Pour les machines réceptrices (réfrigérantes ou pompe à chaleur), on ne parle pas de rendement mais d'efficacité, ou de façon synonyme de coefficient de performance (COP). La définition est toutefois la même.

Définition de l'efficacité

L'efficacité est définie comme : $e = \dfrac{\text{grandeur utile}}{\text{grandeur coûteuse}}$.

Dans le cas d'une machine réfrigérante (frigo, climatiseur, congélateur) :

- la grandeur utile est le transfert thermique extrait du compartiment à refroidir : Q_f ;
- la grandeur coûteuse est le travail fourni au fluide : W.

$$\text{Ainsi, } e = \frac{Q_f}{W}.$$

On a $e \in [0, +\infty[$.

– Q_c n'apparaît pas dans l'efficacité, car il s'agit de la chaleur rejetée vers la pièce (vers la cuisine par exemple).

– Il n'y a pas de signe moins, car on a déjà $Q_f > 0$ et $W > 0$ pour une machine réceptrice.

> **Exemple :** prenons un réfrigérateur avec une efficacité $e = 4$. Ceci signifie que pour extraire $Q_f = 100\,\text{J}$ d'énergie du compartiment à refroidir, il faut fournir un travail $W = \dfrac{Q_f}{e} = 25\,\text{J}$.
>
> → Ainsi plus l'efficacité e est grande, moins il faut fournir d'énergie pour refroidir le compartiment interne (et donc moins la facture d'électricité est élevée !).

4 – Efficacité maximale

Même question que pour le moteur : étant donné un réfrigérateur fonctionnant entre une source froide à T_f et une source chaude à T_c, fixées (par exemple 4 °C pour un frigo, et 20 °C dans la cuisine), est-il possible d'avoir une efficacité aussi élevée que l'on souhaite, ou y a-t-il une limite imposée par la physique ?

Même réponse que pour le moteur : les deux principes imposent une contrainte, et il faut minimiser l'entropie créée.
$\leadsto_6$ Faire l'**EC2**.
Bilan :

Efficacité maximale d'une machine réfrigérante

L'efficacité d'une machine réfrigérante fonctionnant entre une source froide à T_f et une source chaude à T_c est limité par la valeur maximale (pas à connaître)

$$e_{\text{rév}} = \frac{T_f}{T_c - T_f}.$$

Elle peut atteindre cette limite si elle est réversible.

c/ Autre démonstration : si on garde S_c (partie en complément)

Si on reprend la démonstration ci-dessus, en conservant S_c (donc $\dfrac{Q_f}{T_f}+\dfrac{Q_c}{T_c}=-S_c$), on obtient $e=\dfrac{T_f}{T_c-T_f+T_fT_cS_c/Q_f}$.

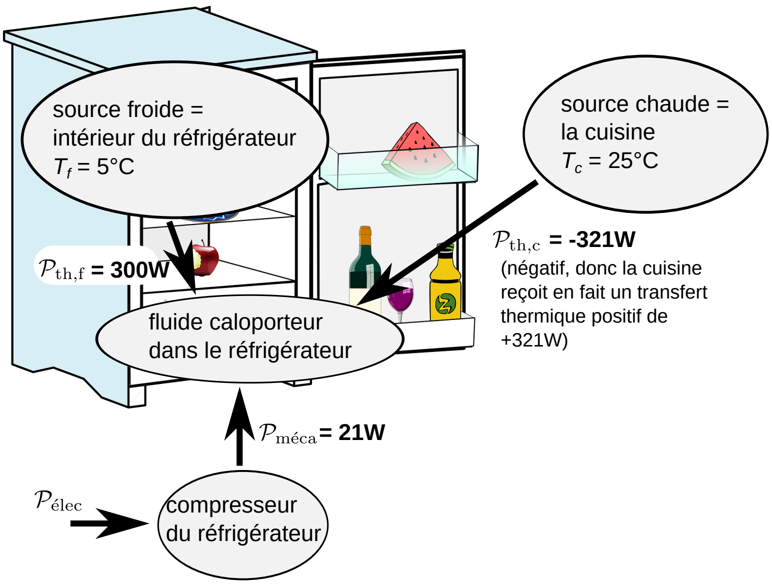
Ceci est d'autant plus petit que l'entropie créée est grande, confirmant le lien entre S_c et mauvaise exploitation de l'énergie.

Exemple : soit un réfrigérateur, d'efficacité réversible $e_{\text{rév}}=\dfrac{T_f}{T_c-T_f}=14$. Pour fonctionner normalement, il doit extraire $Q_f=300\,\text{J}$ du compartiment froid par seconde, soit donc une puissance thermique $\mathcal{P}_{\text{th,f}}=300\,\text{W}$.

$\rightsquigarrow_7$ Compléter les schémas ci-dessous avec les valeurs des puissances $\mathcal{P}_{\text{th,c}}$ (puissance thermique reçue depuis la source chaude) et $\mathcal{P}_{\text{méca}}$ (puissance mécanique reçue par le fluide).

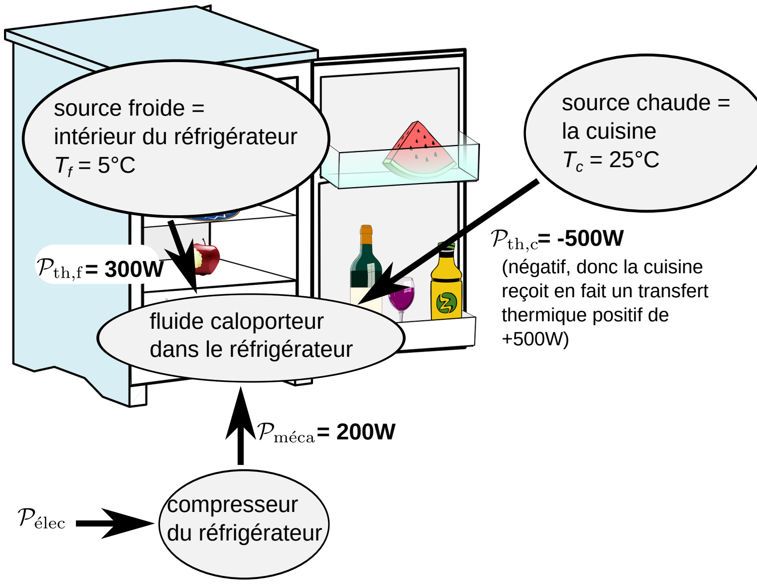
Fonctionnement réversible, S_c=0 - $e_{rév}$ = 14

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.



Ci-dessus les schémas sont complétés avec les valeurs des puissances. Comment les avons-nous trouvées ?

- Le frigo a besoin d'extraire 300 J par seconde du compartiment froid, c'est-à-dire que pour une seconde $Q_f=300\,\text{J}$, et donc en terme de puissance (rappel : puissance = énergie/Δt) : $\mathcal{P}_{\text{th,f}}=300\,\text{W}$.
- L'efficacité est $e=\dfrac{Q_f}{W}$, donc on a pareil pour les puissances : $e=\dfrac{\mathcal{P}_{\text{th,f}}}{\mathcal{P}_{\text{méca}}}$ ($\mathcal{P}_{\text{méca}}=W/\Delta t$).

  Comme on connait e et $\mathcal{P}_{\text{th,f}}$, on en déduit $\mathcal{P}_{\text{méca}}=\dfrac{\mathcal{P}_{\text{th,f}}}{e}$.

  Ceci donne $\mathcal{P}_{\text{méca}}=21\,\text{W}$ lorsque $e=14$ (cas réversible), et $\mathcal{P}_{\text{méca}}=200\,\text{W}$ lorsque $e=1{,}5$ (cas réel).

  Le cas réversible est bien celui qui consomme le moins d'énergie.
- Ensuite on utilise le premier principe sur un cycle : $W+Q_f+Q_c=0$, donc pour les puissances on a aussi $\mathcal{P}_{\text{méca}}+\mathcal{P}_{\text{th,f}}+\mathcal{P}_{\text{th,c}}=0$, donc on en déduit $\mathcal{P}_{\text{th,c}}=-\mathcal{P}_{\text{méca}}-\mathcal{P}_{\text{th,f}}$. Ceci donne les valeurs sur la figure ci-dessus.

5 – Ordres de grandeur

L'efficacité réelle d'un réfrigérateur ou congélateur (ou climatiseur) est plutôt de l'ordre de $e\simeq 3$.

IV – Système pompe à chaleur

1 – Signes des transferts

Objectif : chauffer une habitation (lorsqu'il fait plus froid dehors).

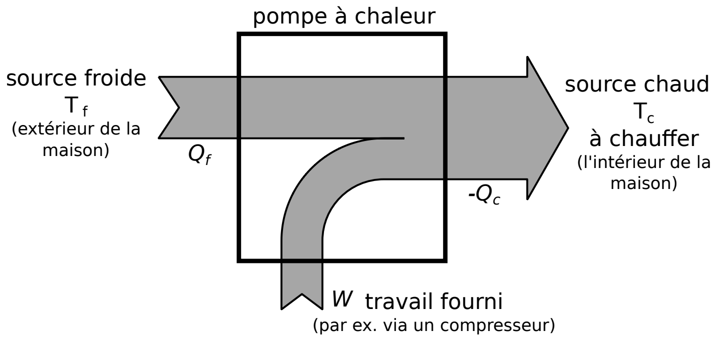
Ainsi :

– La source froide est l'extérieur de la maison.

– La source chaude est la pièce à chauffer (à l'intérieur de la maison).

– Comme pour le réfrigérateur, les échanges thermiques se font via un fluide qui circule dans la machine.
  $\rightarrow$ le système d'intérêt est donc le {fluide}, qui reçoit Q_f, Q_c, W.

– La machine reçoit un travail positif, souvent électrique, qui sert à faire tourner un compresseur, qui à son tour fournit du travail au fluide qui circule.

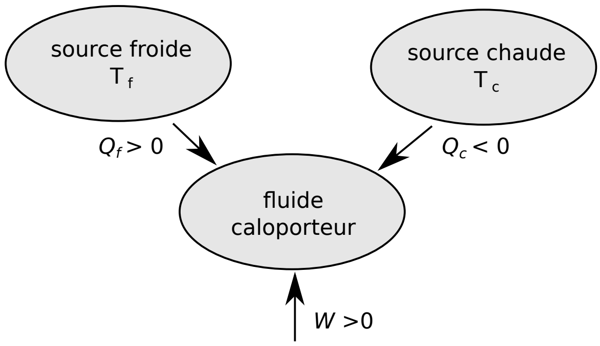


Le schéma général est donc celui dessiné à droite.

Signes des transferts (> 0 si reçus, < 0 si cédés) :

- $W > 0$ (il faut payer la facture d'électricité).
- $Q_c < 0$ car l'objectif est de chauffer la pièce (qui est la source chaude).

  Le transfert thermique doit donc être dirigé du fluide vers la source chaude, c'est-à-dire que ce fluide cède de la chaleur, donc reçoit $Q_c < 0$.
- $Q_f > 0$ car le fluide prélève de la chaleur à l'extérieur.



Important

Une pompe à chaleur ou un réfrigérateur font exactement la même chose, à savoir forcer le transfert thermique de la source froide vers la source chaude. *Les signes des transferts thermiques sont les mêmes.*
Mais :

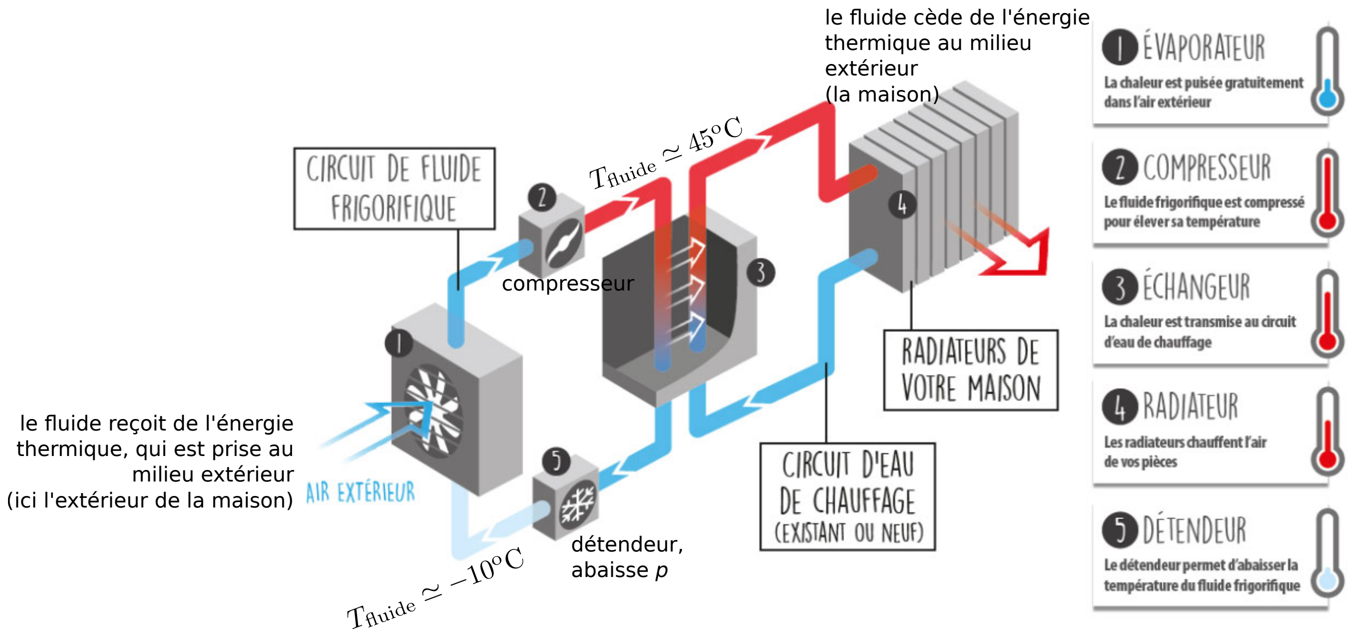
- Un réfrigérateur est optimisé pour refroidir la source froide (son compartiment interne).
- Une pompe à chaleur est optimisée pour réchauffer la source chaude (la pièce à chauffer).

$\rightarrow$ *La définition des rendements n'est donc pas la même.*

2 – Principe de fonctionnement

a/ Idée : le cycle classiquement mis en œuvre (pas à connaître)

Idée identique à celle du réfrigérateur. Le fluide circule en circuit fermé, et s'écoule dans les différents organes de la machine.



Remarque : Lorsqu'il passe côté extérieur, le fluide est plus froid que l'air ambiant. Il reçoit donc un transfert thermique $Q_f > 0$. C'est cette énergie, prélevée à l'extérieur, qui sera ensuite réinjectée côté chaud dans la pièce à chauffer.

b/ Tracé dans le diagramme p-V

Identique au cas du réfrigérateur : parcours dans le sens antihoraire.

3 – Efficacité

Définition de l'efficacité

L'efficacité est définie comme : $e = \dfrac{\text{grandeur utile}}{\text{grandeur coûteuse}}$.

Dans le cas d'une pompe à chaleur :

- la grandeur utile est le transfert thermique fourni à la pièce à chauffer : $-Q_c$;
- la grandeur coûteuse est le travail fourni au fluide : W.

$$\text{Ainsi, } e = \frac{-Q_c}{W}.$$

On a $e \in [1, +\infty[$.

- Q_f n'apparaît pas dans l'efficacité, car il s'agit de la chaleur prélevée à l'extérieur de la maison : elle ne coûte rien.
- Signe moins devant Q_c car il est négatif.

Exemple : Prenons une pompe à chaleur avec une efficacité $e = 4$. Ceci signifie que pour fournir $-Q_c = 100\,\text{J}$ d'énergie à l'intérieur de la maison, il faut fournir un travail $W = \dfrac{-Q_c}{e} = 25\,\text{J}$ seulement.

→ Ainsi plus l'efficacité e est grande, moins il faut fournir d'énergie pour chauffer la maison (et donc moins la facture d'électricité est élevée !).

Remarque : on peut comparer ceci à un radiateur électrique, dont l'efficacité est $e = 1$ puisque $100\,\text{J}$ de travail électrique sont dissipés en $100\,\text{J}$ de chaleur par effet Joule.

4 – Efficacité maximale

$\rightsquigarrow_8$ Faire l'**EC3**.
Bilan :

Efficacité maximale d'une pompe à chaleur

L'efficacité d'une pompe à chaleur fonctionnant entre une source froide à T_f et une source chaude à T_c est limité par la valeur maximale (pas à connaître) :

$$e_{\text{rév}} = \frac{T_c}{T_c - T_f}.$$

Elle peut atteindre cette limite si elle est réversible.

c/ Autre démonstration : si on garde S_c (partie en complément)

Si on reprend la démonstration de l'EC3, en conservant S_c, on obtient $e = \dfrac{T_c}{T_c - T_f + T_f T_c S_c/|Q_c|} < e_{\text{réversible}}$.

Ceci est d'autant plus petit que l'entropie créée est grande, confirmant le lien entre S_c et mauvaise exploitation de l'énergie.

Exemple : en TD.

5 – Ordres de grandeur

L'efficacité réelle d'une pompe à chaleur est plutôt de l'ordre de $e \simeq 3$.