

Chapitre 22

Machines thermiques

I. Description des machines thermiques

1. Généralités
2. Types de machine
3. Bilans et inégalité de Clausius
4. Cycle de Carnot
5. Efficacité d'une machine thermique

II. Machines dithermes motrices

1. Fonctionnement général d'un moteur ditherme
2. Efficacité d'un moteur ditherme

3. Machine motrice de Carnot : théorème de Carnot

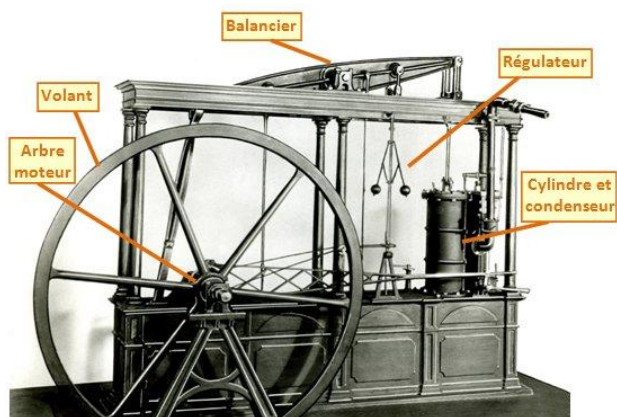
4. Exemple : le moteur à 4 temps essence

III. Machines dithermes réceptrices

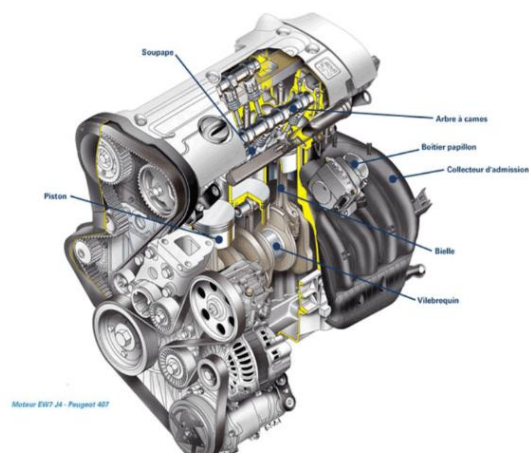
1. Position du problème
2. Fonctionnement général
3. Principe d'une PAC
4. Principe d'une machine frigorifique
5. Cogénération



Nicolas Sadi CARNOT (1796 - 1832)
ingénieur français



Machine à vapeur de James Watt



Moteur 4 temps

Le cours

C'est avec l'invention des machines thermiques que la thermodynamique est née en tant que science. Les notions de température, d'énergie, de travail et de chaleur, ont été introduites pour modéliser le fonctionnement des machines à vapeur, et améliorer leur rendement. La thermodynamique est donc au départ une science d'ingénieurs.

Toutes les machines thermiques sont basées au départ sur le même principe que la machine à vapeur : de l'énergie thermique (issue de la combustion de charbon, de pétrole, ou de la fission nucléaire) est convertie en énergie mécanique (par rotation d'une turbine ou d'un arbre) par l'intermédiaire d'un fluide (liquide ou gaz) qui subit un cycle de transformations le ramenant à son état initial. Alors que les machines du 19^{ème} siècle étaient toutes des moteurs, c'est-à-dire que leur finalité était de fournir du travail à l'utilisateur, on connaît aujourd'hui des dispositifs fonctionnant en sens inverse, c'est-à-dire capable de convertir un travail fourni par l'utilisateur en échanges thermiques non spontanés, comme les réfrigérateurs ou les pompes à chaleur.

I. Description des machines thermiques

1. Généralités

On appelle machine thermique tout dispositif capable de convertir de l'énergie thermique en énergie mécanique et inversement, lors d'une transformation cyclique.

Dans une machine thermique, les échanges d'énergie se font par l'intermédiaire d'un fluide, appelé le **fluide caloporteur** (ou agent thermique ou fluide frigorigène dans les machines frigorifiques).

Dans la plupart des machines, le fluide caloporteur circule dans un circuit fermé, autrement dit subit une suite de transformations à l'issue desquelles il revient à son état initial.

Un réfrigérateur, une pompe à chaleur, le circuit secondaire d'une centrale nucléaire sont des machines thermiques en cycle fermé.

Le moteur à combustion interne, le moteur à réaction sont des machines thermiques à cycle ouvert mais on les modélisera par des machines cycliques...

Au cours du cycle, le fluide caloporteur échange de l'énergie. L'échange par travail se fait généralement par l'intermédiaire de pièces en mouvement et les transferts thermiques au contact de **sources thermiques**.

Deux situations sont possibles en fonction de la taille de la source :

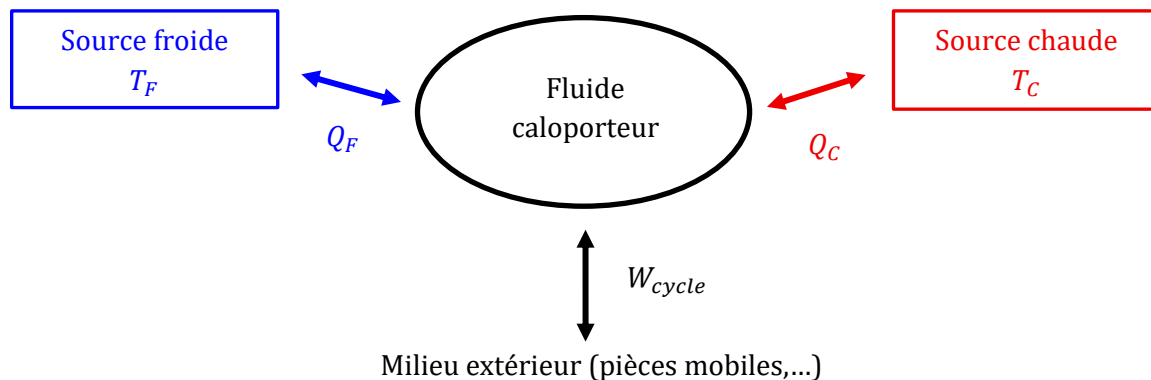
- Si une source est un thermostat (source de « grande taille »), sa température reste constante au cours du fonctionnement ;
- Si une source est de dimension petite, sa température varie à chaque cycle de fonctionnement, et elle est qualifiée de pseudo-source.

Nous allons restreindre notre étude aux cas particulier mais fondamental des **machines thermiques dithermes**, qui au cours d'un cycle vont être **en contact avec deux sources à deux moments différents du cycle**.

- **Une source chaude de température T_C**
- **Une source froide de température $T_F < T_C$**

Le transfert thermique total au cours du cycle est $Q_{cycle} = Q_C + Q_F$ où Q_C et Q_F sont les transferts thermiques au contact respectivement de la source chaude et de la source froide.

Le travail total algébriquement reçu au cours du cycle est W_{cycle} .



Le signe des échanges énergétiques dépend de la nature de la machine.

2. Types de machine

Une machine thermique qui fournit globalement du travail au milieu extérieur est une machine motrice ou moteur : $W_{cycle} < 0$. Dans $P(V)$, un tel cycle est décrit dans le sens **horaire**.

Exemples : moteurs de voiture, centrale nucléaire

Une machine thermique qui reçoit globalement du travail de la part du milieu extérieur est une machine réceptrice : $W_{cycle} > 0$. Dans $P(V)$, un tel cycle est décrit dans le sens **anti-horaire**. Une telle machine réalise un transfert thermique effectif de sens contraire au sens naturel.

Exemples : pompe à chaleur (PAC), réfrigérateur

Une des deux sources est généralement le milieu naturel (atmosphère, eau d'un fleuve, etc.), si bien qu'il n'y a qu'une seule source «à créer», ce qui est technologiquement plus facile.

En pratique, les sources n'ont pas toujours de réalité physique et il peut s'agir d'une modélisation de processus comme une réaction chimique (ex : réaction de combustion dans les moteurs essence ou diesel).

Exemples :

Machine	Fluide	Source chaude	Source froide	Pièces en mouvement
Moteur à essence	Mélange air + carburant	Modèle pour la réaction de combustion	Modèle pour le renouvellement du mélange	Piston
Centrale nucléaire	Eau du circuit secondaire	Eau du circuit primaire	Eau du circuit de refroidissement	Turbine
Réfrigérateur	Fluide frigorigène (isobutane R600a)	Air intérieur au frigo	Air de la cuisine	Compresseur
Turboréacteur	Mélange air + carburant	Modèle pour la réaction de combustion	Atmosphère	Compresseur et turbine

3. Bilans et inégalité de Clausius

Lors d'un cycle : $\Delta E_{cycle} = 0$ et $\Delta S_{cycle} = 0$ puisque le système revient à son état initial.

$$\text{1er principe} \Rightarrow \Delta E_{cycle} = W_{cycle} + Q_{cycle} = 0$$

$$\text{Dans le cas d'une machine ditherme : } W_{cycle} + Q_C + Q_F = 0$$

$$\text{2ème principe} \Rightarrow \Delta S = S^e + S^c = 0 \text{ avec } S^c \geq 0 \Rightarrow S^e \leq 0$$

$$\text{Dans le cas d'une machine ditherme : } \frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} + S^c = 0$$

$$S^c \geq 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0 \quad \text{INEGALITE DE CLAUDIUS}$$

$$\text{Forme infinitésimale (à utiliser en cas de pseudo-sources) : } \frac{\delta Q_C}{T_C} + \frac{\delta Q_F}{T_F} \leq 0$$

L'inégalité de Clausius est une reformulation du second principe en termes de transferts thermiques.

$$\text{Cas particulier d'un cycle réversible : } \frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} = 0$$

Le **fonctionnement réversible** au sens thermodynamique de ce terme, correspond à un **fonctionnement idéal**, au cours duquel il n'y aurait aucune dissipation intempestive d'énergie, en particulier par frottement. Cela ne signifie pas qu'on obtienne un rendement de 100%, mais qu'on obtient le rendement maximal théorique possible du fait des contraintes imposées par le second principe de la thermodynamique.

AP 1 : Énoncé de Thomson du 2ème principe

Il a été constaté expérimentalement, avant son énoncé par Carnot, qu'une machine ne peut fournir du travail que si le fluide caloporteur échange de l'énergie thermique au moins deux fois avec deux sources différentes, autrement dit, il est impossible de réaliser un moteur monotherme. Cette constatation empirique est l'énoncé originel du second principe de la thermodynamique.

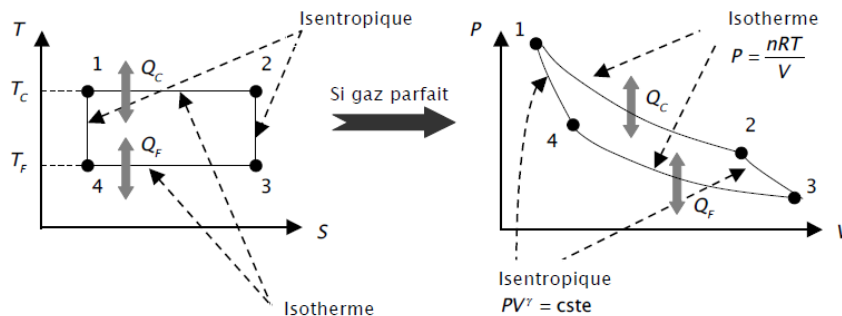
Une machine monotherme est toujours réceptrice. Pour réaliser un moteur, il faut envisager des échanges thermiques avec au moins deux sources thermiques !

4. Cycle idéal : cycle de Carnot

Le cycle d'une machine ditherme réversible et fonctionnant entre deux thermostats, de températures T_C et T_F est appelé **cycle de Carnot**. Une machine fonctionnant selon un cycle de Carnot est appelée **machine de Carnot**.

- Les étapes au contact des thermostats sont **monothermes** et **réversibles** : ce sont donc des **isothermes** à la température des sources. (transformations très lentes à réaliser...)
- Les étapes intermédiaires sont nécessairement des **adiabatiques** qui permettent d'amener le fluide de la température T_C à la température T_F , puis de T_F à T_C , sans transfert thermique mais avec du travail. Comme elles sont **réversibles** par hypothèse d'un cycle idéal, ce sont des **isentropiques**.

Le cycle de Carnot correspond à quatre transformations réversibles : 2 isothermes et 2 isentropiques.

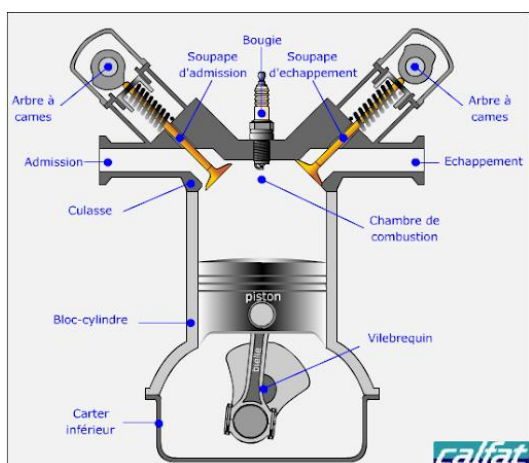


5. Efficacité d'une machine thermique

De manière générale, on définit l'efficacité d'une machine thermique par la relation suivante :

$$e = \frac{\text{transfert d'énergie utile}}{\text{transfert d'énergie coûteux}}$$

II. Machines dithermes motrices



Cylindre d'un moteur essence

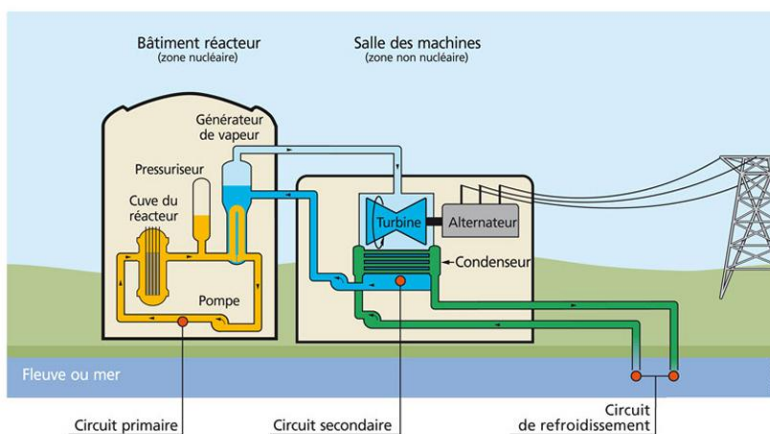
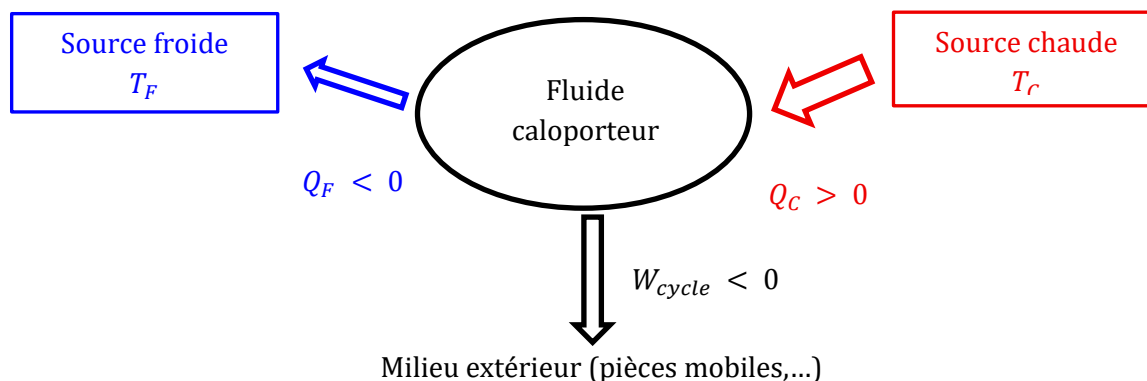


Schéma de principe d'une centrale nucléaire

1. Fonctionnement général d'un moteur ditherme



Le système reçoit de l'énergie de la part de la source chaude, en convertit une partie en travail et rejette le reste à la source froide : $Q_C = |W_{cycle}| + |Q_F|$

2. Efficacité d'un moteur ditherme

Pour une machine motrice, le transfert énergétique utile (« qui nous intéresse ») est le travail fourni.

Dans le cas d'un moteur ditherme mettant en jeu deux transferts thermiques se faisant au contact de 2 thermostats, le transfert énergétique coûteux est le transfert thermique au contact de la source chaude Q_C .

$Q_C > |W_{cycle}|$ donc **l'efficacité d'une machine motrice est inférieure à 1** et est aussi appelée improprement rendement, **noté η** .

De plus, d'après le 1^{er} principe appliqué au cycle $-W_{cycle} = Q_C + Q_F$

$$\text{Efficacité d'un moteur ditherme : } \eta = \frac{-W_{cycle}}{Q_C} = 1 + \frac{Q_F}{Q_C}$$

Quelques valeurs de rendements réels de machines actuellement utilisées :

Moteur à 4 temps : jusqu'à $\approx 35\%$ mais généralement 25% .

Moteur Diesel : jusqu'à 42% .

Centrale nucléaire : ≈ 30 à 35% .

Centrale thermique à combustion : $\approx 40\%$

3. Machine motrice de Carnot : théorème de Carnot

Dans le cas idéal d'un moteur ditherme réversible (cycle de Carnot moteur) : $\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} = 0$.

$$\frac{Q_F}{Q_C} = -\frac{T_F}{T_C} \quad \eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

Si le cycle est irréversible, $\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} < 0 \Leftrightarrow \frac{Q_F}{Q_C} < -\frac{T_F}{T_C} \Rightarrow \eta < 1 - \frac{T_F}{T_C}$

η_{Carnot} apparaît comme une valeur maximale de l'efficacité.

Théorème de Carnot

L'efficacité d'un moteur ditherme est maximale lorsque le cycle est décrit de façon réversible. Cette efficacité maximale, également appelée rendement de Carnot, ne dépend que des températures des sources :

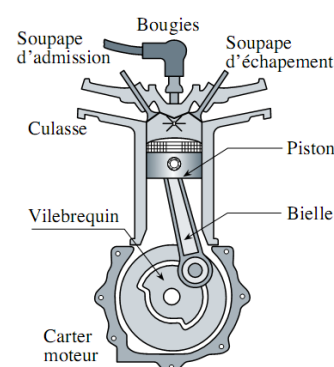
$$\eta \leq \eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

AP 2

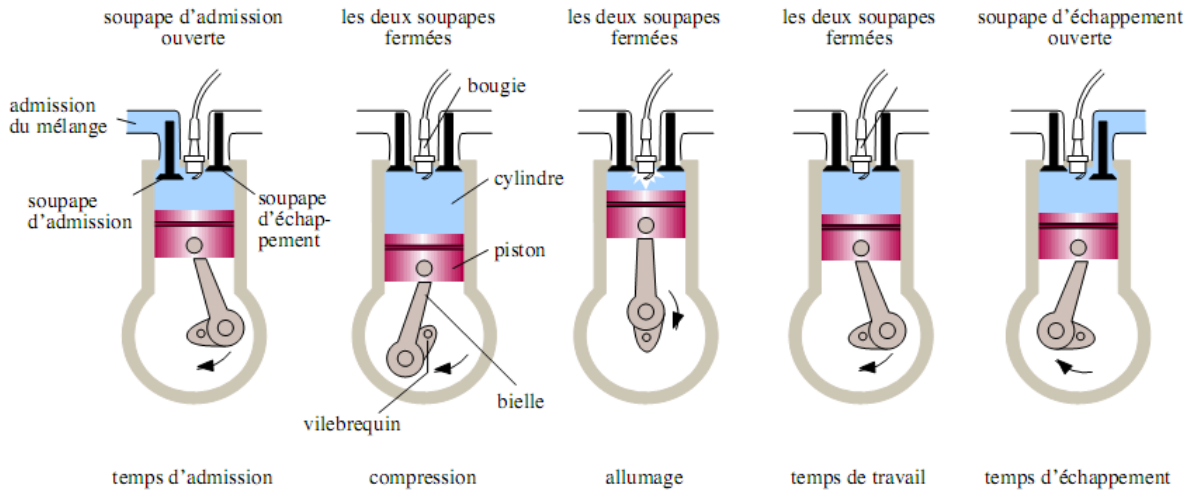
4. Exemple de moteur thermique : le moteur à 4 temps essence

Un moteur à explosion est constitué d'un ou plusieurs cylindres confinant les combustions. Dans chaque cylindre, un piston peut coulisser. Chaque cylindre est fermé par une culasse munie d'au moins deux soupapes :

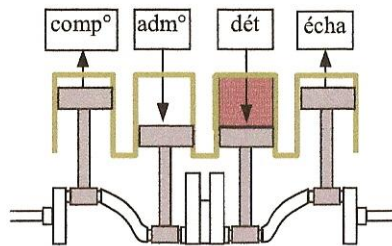
- La soupape d'admission qui permet l'entrée du combustible dans le cylindre
- La soupape d'échappement qui permet l'évacuation des gaz brûlés vers l'extérieur



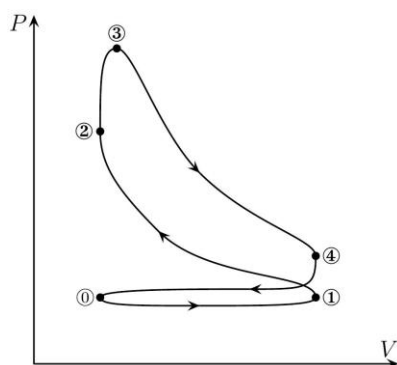
Le cycle de fonctionnement se décompose en **quatre temps**. **Chaque temps correspond à un aller simple du piston dans un cylindre**. Le mouvement du piston est initié par la combustion d'un mélange de carburant et d'air qui a lieu durant le temps moteur.



Dans un moteur 4 cylindres, la présence de 3 autres cylindres fonctionnant chacun sur un temps différent permet une rotation plus régulière du moteur et un travail fourni 4 fois plus élevé. La descente d'un piston suite à la combustion entraîne les 3 autres.

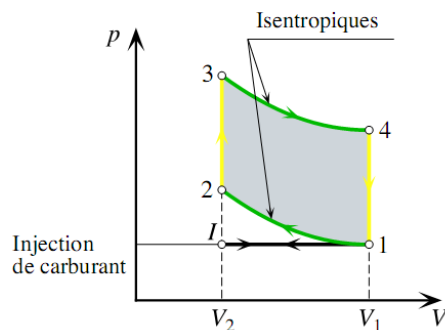


Description et modélisation du moteur essence à 4 temps :



Cycle réel

Cycle de Beau de Rochas ou cycle d'Otto



Modélisation

• **1^{er} temps (0-1) : admission d'un mélange d'air et de carburant**

Au point (0), le piston est à son point mort haut, c'est-à-dire en position la plus haute possible. Le volume à l'intérieur de la chambre est minimal, mais non nul. Le piston, entraîné par le vilebrequin, descend en aspirant le mélange par la soupape d'admission qui s'ouvre : le volume augmente. Lorsque le piston est à son point mort bas (1), le volume de la chambre est maximal et les soupapes se referment.



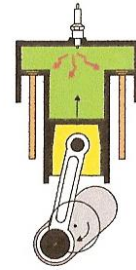
admission du mélange imposée par l'inertie mécanique

On peut supposer que l'admission se fait à pression constante P_{atm} .

Modélisation : admission isobare ($P_0 = P_1 = P_{atm}$)

• **2^{ème} temps (1-2) : compression du mélange**

Les 2 soupapes sont fermées, le piston, toujours entraîné par le vilebrequin, remonte et comprime le mélange jusqu'à 12 à 18 bars (P_2) et 400 à 500 °C (T_2).



compression imposée par l'inertie mécanique terminée par l'explosion

La course du piston est suffisamment rapide pour supposer la compression adiabatique. On néglige les frottements.

Modélisation : compression adiabatique réversible

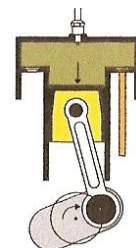
• **3^{ème} temps (2-3-4) : combustion (2-3) et détente(3-4)**

Le mélange (carburant + air) ne s'enflamme pas spontanément, mais sous l'action d'une étincelle provoquée par une bougie d'allumage. Lorsque le piston atteint son point culminant (point mort haut), la compression est au maximum (2) ; la bougie d'allumage produit une étincelle électrique qui provoque la **combustion rapide et exothermique** du mélange. **La température et la pression augmentent** (3).

Du fait de l'inertie du piston et de la rapidité de la combustion, on peut supposer que le volume ne varie pas lors de cette étape.

Modélisation de l'étape 2-3 : combustion isochore

Les gaz chauds (T_3 est de l'ordre du millier de K) **et à une pression moyenne de 40 bars** (P_3) **repoussent le piston** jusqu'au point mort bas (4), initiant le mouvement.



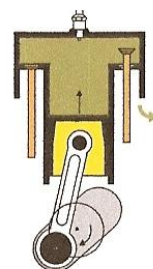
détente des gaz brûlés provoquée par la chaleur de l'explosion (réaction chimique)

La course du piston est suffisamment rapide pour supposer la détente adiabatique. On néglige les frottements.

Modélisation de l'étape 3-4 : détente adiabatique réversible

• **4^{ème} temps (4-0) : échappement**

Le piston, entraîné par le vilebrequin, remonte, la soupape d'échappement s'ouvre et le piston chasse les gaz brûlés, laissant la place à une nouvelle charge de mélange air/carburant. Lorsque les soupapes s'ouvrent au point (4), le contact entre les gaz brûlés dans la chambre de combustion et l'extérieur provoque leur refroidissement brutal et un retour à la pression atmosphérique (5) ($P_5 = P_{atm}$).



échappement des gaz brûlés imposé par l'inertie mécanique

Du fait de l'inertie du piston, on peut supposer que le volume ne varie pas lors du retour à la pression atmosphérique, puis que le volume diminue lorsque le piston remonte sans que la pression ne varie puisque les gaz sont évacués.

Modélisation : détente isochore puis isobare se superposant avec la phase d'admission.

Expression du rendement du cycle de Beau de Rochas :

En toute rigueur, on ne peut pas parler d'un cycle décrit par une quantité déterminée de gaz (la nature du mélange est modifiée par la combustion) : **nous assimilons le mélange air-carburant et les gaz d'échappement à un même gaz parfait de quantité constante.**

La source chaude est créée in situ par la combustion d'un carburant : $Q_C = Q_{2-3}$ et la source froide est l'atmosphère ambiante $Q_F = Q_{3-4}$. Les autres étapes sont supposées adiabatiques.

1er principe $\Rightarrow W_{cycle} + Q_{cycle} = 0 \Leftrightarrow W_{cycle} + Q_{2-3} + Q_{3-4} = 0$

L'efficacité est : $\eta = \frac{-W_{cycle}}{Q_C} = 1 + \frac{Q_{4-1}}{Q_{2-3}}$

Les étapes 2-3 et 4-1 sont des isochores $V_2 = V_3$ et $V_4 = V_1$: le travail des forces de pression sur ces étapes sont nuls.

$Q_{2-3} = \Delta U_{2-3} = C_V(T_3 - T_2)$ et $Q_{4-1} = \Delta U_{4-1} = C_V(T_1 - T_4)$ donc $\eta = 1 + \frac{T_1 - T_4}{T_3 - T_2}$

Remarque : on ne retrouve pas le η_{Carnot} car les transferts thermiques ne sont pas des isothermes !

Les températures dépendent du rapport de compression $\alpha = \frac{V_1}{V_2}$.

Les étapes 1-2 et 3-4 sont des isentropiques d'un gaz parfait : on peut appliquer les lois de Laplace.

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1} \Rightarrow T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} = T_1 \alpha^{\gamma-1}$$

$$T_3 V_3^{\gamma-1} = T_4 V_4^{\gamma-1} \Rightarrow T_3 = T_4 \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{\gamma-1} = T_4 \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} = T_4 \alpha^{\gamma-1}$$

$$\eta = 1 + \frac{T_1 - T_4}{T_4 \alpha^{\gamma-1} - T_1 \alpha^{\gamma-1}} = 1 + \frac{T_1 - T_4}{\alpha^{\gamma-1}(T_4 - T_1)} \Rightarrow \eta = 1 - \alpha^{1-\gamma}$$

Typiquement $\gamma = 1,4$ et α de l'ordre de 7-9, $\alpha = 7$ donne un rendement de 54 %.

Remarques :

- Le rapport de compression est limité par le phénomène de détonation (combustion spontanée du mélange, ce phénomène est limité par l'indice d'octane).
- Si on imagine un moteur de Carnot fonctionnant entre 2 sources de températures $T_C = T_3 = 1200$ K (température de fin de combustion) et $T_F = 293$ K (température de l'air ambiant), $\eta_{Carnot} = 76\%$.
- Par rapport à ce cycle théorique, de nombreuses modifications ont été progressivement apportées, comme l'ajustement de l'instant idéal d'allumage de l'étincelle (réglage de l'avance à l'allumage) ou l'utilisation d'injecteurs (entrée du mélange sous pression au lieu d'un simple appel d'air par dépression dans le carburateur, mélangeur d'air et d'essence).

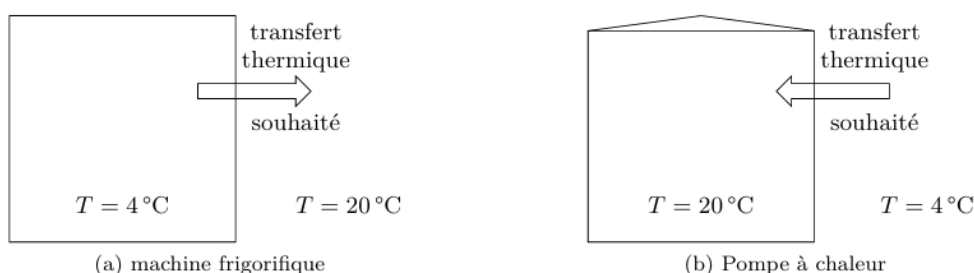
III. Machines dithermes réceptrices

1. Position du problème

On constate expérimentalement que le transfert thermique se fait spontanément d'un corps chaud vers un corps froid. On a également montré qu'une machine monotherme est forcément réceptrice. Une telle machine possède une efficacité maximale de 1.

Exemple : un radiateur électrique, au mieux l'énergie électrique reçue est intégralement dissipée par effet Joule.

D'un autre côté, l'impossibilité d'un simple transfert thermique d'une zone froide vers une zone chaude est un énoncé du second principe de la thermodynamique. Pourtant, il existe des situations où il est intéressant de réaliser le transfert thermique dans l'autre sens. C'est le cas des machines frigorifiques (réfrigérateur, congélateur, climatiseur), et des pompes à chaleur.



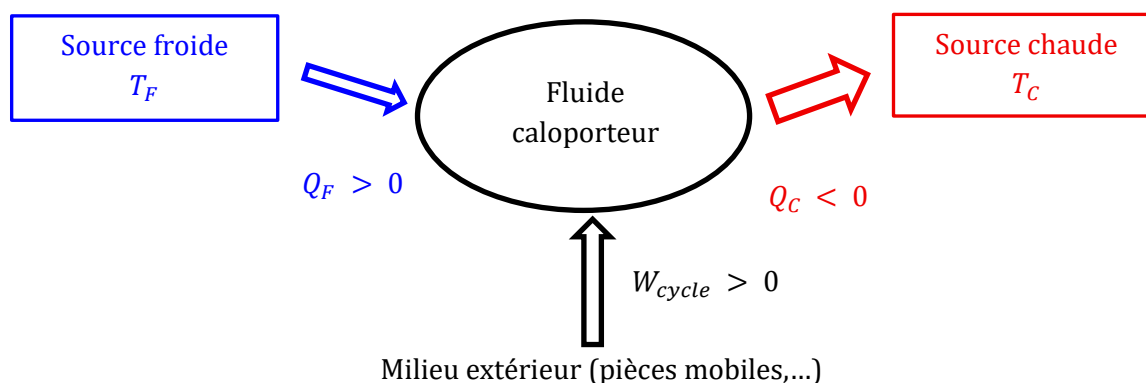
Une machine frigorifique a pour but de maintenir une enceinte à une température inférieure à celle de l'environnement. Or, du fait de la différence de température, il y a constamment de l'énergie thermique qui rentre dans la chambre froide par conduction à travers les parois, ou chaque fois qu'on ouvre la porte. Il faut donc en permanence extraire de l'énergie de la zone froide et la rejeter dans l'environnement.

Une pompe à chaleur a pour objectif de maintenir une enceinte à une température supérieure à celle de son environnement. Comme dans le cas de la machine frigorifique, il y a en permanence des sorties d'énergie thermique à travers les parois et les fenêtres par conduction thermique, qui tend à faire diminuer la température du local. Le principe d'une pompe à chaleur est de prélever de l'énergie dans milieu extérieur plus froid pour la transférer au local plus chaud.

Un tel transfert n'est possible que s'il s'accompagne d'un autre transfert d'énergie, la plupart du temps un travail au niveau d'un compresseur, qui doit être d'une façon ou d'une autre fourni par l'opérateur.

Les changements d'état sont mis à profit dans les machines frigorifiques et les pompes à chaleur. Ces machines utilisent généralement le fait que les liquides absorbent de l'énergie pour se vaporiser et que les gaz en libèrent lorsqu'ils se liquéfient.

2. Fonctionnement général



Le fonctionnement de principe est donc exactement symétrique entre un moteur et une machine réceptrice ...ce qui ne veut pas dire nécessairement dire qu'une machine donnée peut fonctionner dans les deux sens !

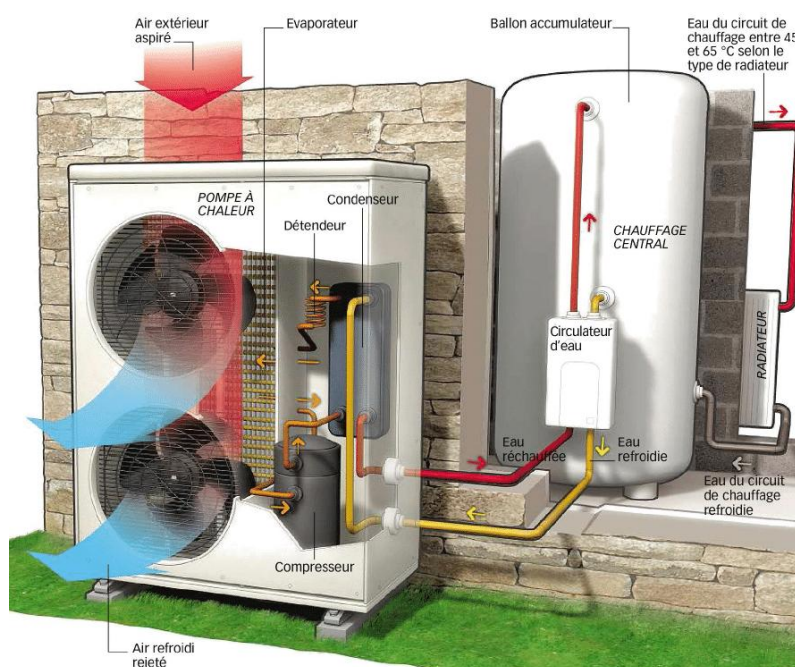
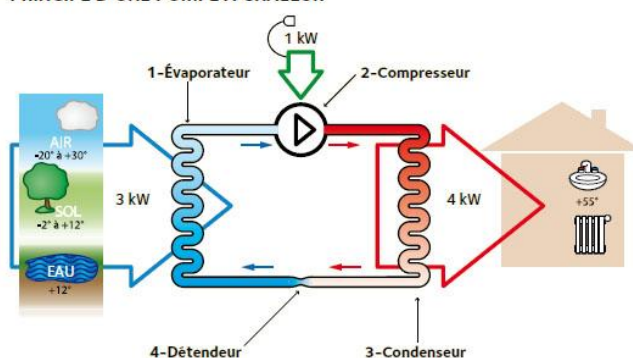
Le système réalise un transfert thermique non spontané : grâce au travail reçu, il transfère de l'énergie de la source froide vers la source chaude : $W_{cycle} + Q_F = |Q_C|$.

Pour une machine réceptrice, le transfert énergétique coûteux est le travail reçu. Pour exprimer l'efficacité, il faut distinguer PAC et réfrigérateur car l'énergie utile (intéressante) n'est pas la même.

3. Principe d'une PAC

On désire chauffer un appartement à l'aide d'une PAC. Pour cela, on devra installer le condenseur à l'intérieur de l'appartement jouant le rôle de source chaude alors que l'évaporateur sera placé à l'extérieur au contact d'une source froide.

PRINCIPE D'UNE POMPE À CHALEUR



Dans le cas d'une PAC mettant en jeu deux transferts thermiques se faisant au contact de 2 thermostats, **le transfert énergétique utile est le transfert thermique fournit à la source chaude Q_C .**

L'efficacité d'une pompe à chaleur ditherme est $e_{PAC} = -\frac{Q_C}{W_{cycle}}$

1^{er} principe $\Rightarrow W_{cycle} = -(Q_F + Q_C)$

Etudions le cas idéal d'un cycle de Carnot récepteur : cycle réversible composé de 2 isentropiques et 2 isothermes.

$$\underline{2^{\text{ème}} \text{ principe}} \Rightarrow \frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} = 0 \Leftrightarrow \frac{Q_F}{Q_C} = -\frac{T_F}{T_C} \quad e_{PAC} = \frac{-Q_C}{W_{\text{cycle}}} = \frac{-Q_C}{-(Q_C+Q_F)} = \frac{Q_C}{Q_C+Q_F} = \frac{1}{1+\frac{Q_F}{Q_C}} = \frac{1}{1-\frac{T_F}{T_C}}$$

L'efficacité d'une pompe à chaleur fonctionnant selon un cycle de Carnot récepteur est $e_{PAC} = \frac{T_C}{T_C - T_F}$

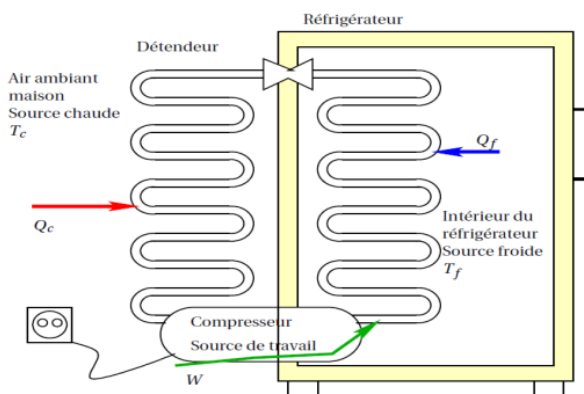
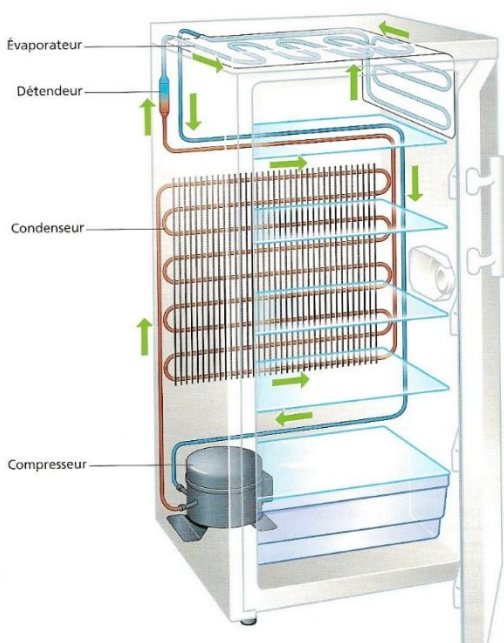
Imaginons une pompe à chaleur ditherme fonctionnant en hiver de façon réversible. La température de la source froide est prise à 4°C et celle de la source chaude à 20°C. Avec $T_F = 4^\circ\text{C}$ et $T_C = 20^\circ\text{C}$ $e_{PAC} = 18.3$.

En pratique on est plutôt autour de 3-4.

Remarques :

- $e_{PAC} > 1$, on parle aussi de coefficient de performance (COP)
- La formule littérale de e_{PAC} est l'inverse de η_{Carnot}
- La PAC est d'autant plus efficace que l'écart de température à maintenir est faible...

4. Principe d'une machine frigorifique



On désire réfrigérer ou maintenir une basse température à l'intérieur d'un local. Pour cela, le condenseur est à l'extérieur du local alors que l'évaporateur sera placé à l'intérieur.

Dans le cas d'un réfrigérateur mettant en jeu deux transferts thermiques se faisant au contact de 2 thermostats, **le transfert énergétique utile est le transfert thermique prélevé à la source froide Q_F .**

L'efficacité d'un réfrigérateur ditherme est $e_R = \frac{Q_F}{W_{\text{Cycle}}}$

$$\underline{1^{\text{er}} \text{ principe}} \Rightarrow W_{\text{cycle}} = -(Q_F + Q_C)$$

Etudions le cas idéal d'un cycle de Carnot récepteur : cycle réversible composé de 2 isentropiques et 2 isothermes.

$$\underline{\text{2ème principe}} \Rightarrow \frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} = 0 \Leftrightarrow \frac{Q_C}{Q_F} = -\frac{T_C}{T_F}$$

$$e_R = \frac{Q_F}{W_{\text{cycle}}} = \frac{Q_F}{-(Q_C + Q_F)} = \frac{Q_F}{-Q_C - Q_F} = \frac{1}{-1 - \frac{Q_C}{Q_F}} = \frac{1}{-1 + \frac{T_C}{T_F}}$$

L'efficacité d'un réfrigérateur fonctionnant selon un cycle de Carnot récepteur est $e_R = \frac{T_F}{T_C - T_F}$

Imaginons réfrigérateur ditherme fonctionnant en hiver de façon réversible. La température de la source froide est prise à 5°C et celle de la source chaude à 20°C. Avec $T_F = 5^\circ\text{C}$ et $T_C = 20^\circ\text{C}$ $e_R = 18.5$.

En pratique on est plutôt autour de 3-4.

AP 3

Remarques générales :

- Notons que, l'énergie réellement dépensée par l'utilisateur correspond au travail mis en jeu au niveau du compresseur. Le fluide reçoit du travail à d'autres endroits de son cycle, en particulier lorsqu'il change d'état : son volume varie, ce qui implique un travail des forces pressantes. Cette contribution est souvent négligeable devant la première et on assimile souvent le travail reçu au niveau du compresseur au travail total reçu au cours du cycle.
- Une machine réceptrice, réfrigérateur ou pompe à chaleur, ne peut donc fonctionner qu'avec un fluide frigorigène adapté aux températures des sources : il doit pouvoir se vaporiser à la température de la source froide sous une pression pas trop éloignée de la pression atmosphérique et il doit pouvoir se liquéfier à la température de la source chaude sous une pression pas trop éloignée de la pression atmosphérique. La condition sur la pression est importante pour pouvoir réaliser des machines ne nécessitant pas de gérer des pressions trop élevées ou trop basses, ce qui entraîne des contraintes techniques. Par ailleurs, il est préférable que l'enthalpie de vaporisation soit la plus élevée possible pour qu'on puisse échanger le plus possible d'énergie avec le moins possible de fluide. Plus cette enthalpie de changement d'état est faible, plus il faut faire circuler de fluide par unité de temps pour parvenir au même résultat.

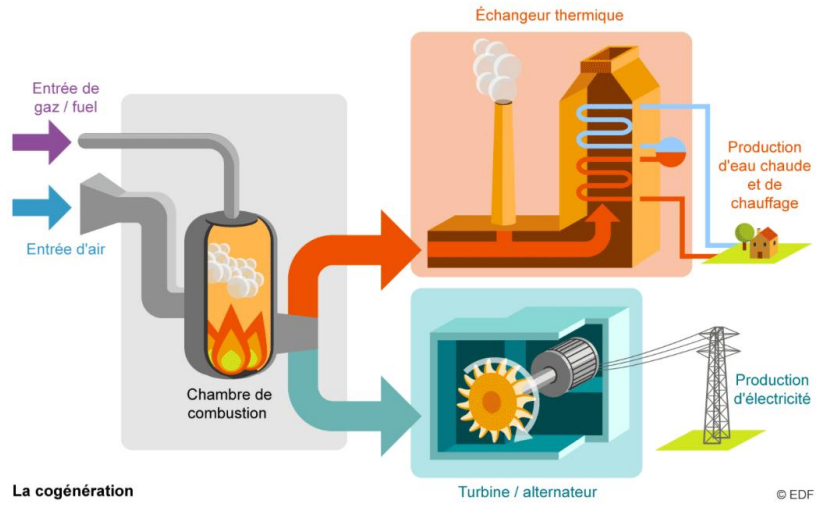
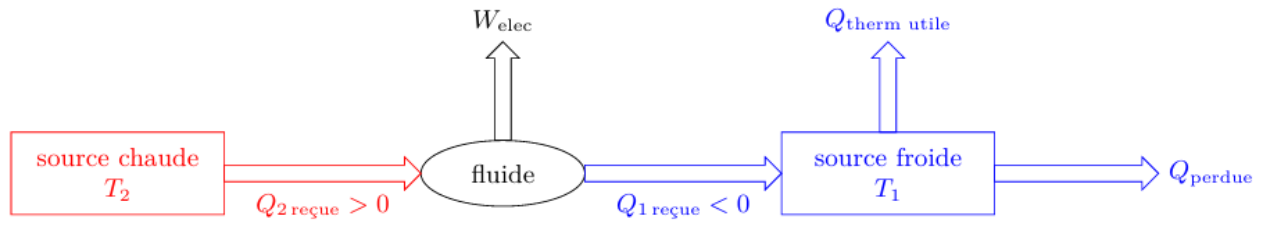
5. Cogénération

On a vu que, dans les machines motrices, l'efficacité est nécessairement inférieure à 1 : une partie de l'énergie fournie par la source chaude est perdue par dissipation thermique dans la source froide. Il est souhaitable d'essayer de valoriser ce transfert thermique.

La cogénération consiste à combiner deux modes de production d'énergie utile dans une même centrale.

La cogénération thermique par exemple consiste à produire du travail (le plus souvent électrique), et d'utiliser comme source froide le fluide d'un réseau de chauffage.

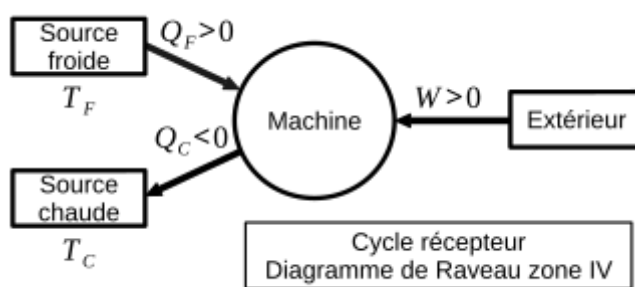
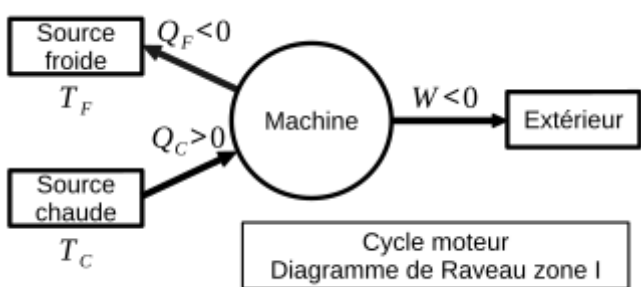
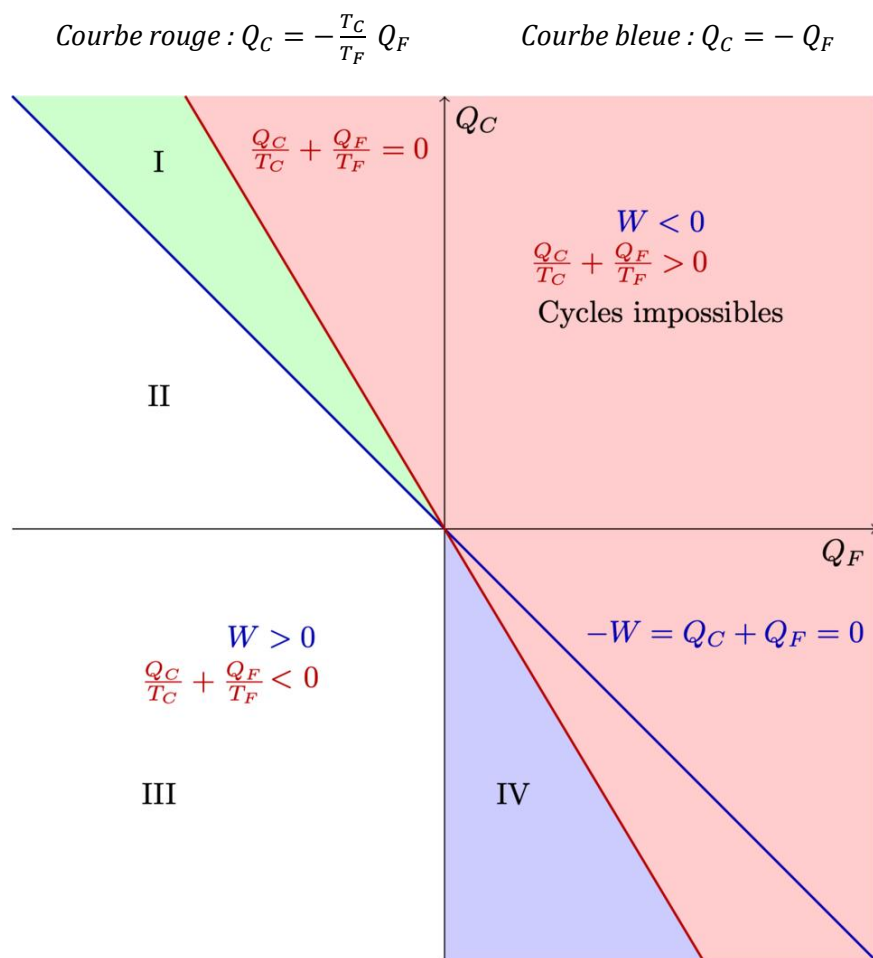
Exemple à grande échelle : une centrale qui alimente en électricité une zone industrielle et en énergie thermique des serres agricoles.



Compléments : diagramme de Raveau

$$W_{cycle} + Q_C + Q_F = 0 \quad W_{cycle} = -(Q_C + Q_F) = 0$$

$$\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0 \quad Q_C \leq -\frac{T_C}{T_F} Q_F$$



Zone III : La machine est réceptrice, elle consomme du travail en cédant de la chaleur aux deux sources. Ces machines sont peu intéressantes et se rapprochent des machines monothermes qui transforment du travail en chaleur (chauffage électrique)

Zone II : La machine est réceptrice, elle consomme du travail, prélève de l'énergie à la source chaude et en fournit à la source froide. Ces machines sont peu intéressantes car le sens des transferts thermiques correspond au sens spontané (ne nécessite pas de travail). Ce type de machine peut être intéressant pour accélérer les transferts thermiques (ventilateur)

Applications

Application 1 : Machine thermique monotherme

Montrer qu' une machine monotherme est forcément réceptrice.

Application 2 : Centrale nucléaire

Considérons une centrale nucléaire, fonctionnant entre deux sources de températures $T_c = 300^\circ\text{C}$ et $T_f = 20^\circ\text{C}$. Elle fournit à l'alternateur une puissance de 1300 MW, et son rendement ne vaut que 55% du rendement théorique maximal. Déterminer les puissances thermiques échangées avec chacune des deux sources.

Application 3 : Congélateur

Un congélateur est placé dans une pièce à température ambiante de 21°C . Pour que son intérieur reste à -19°C , il est nécessaire d'en extraire un transfert thermique de 400 kJ par heure. On supposera cette opération faite de manière réversible.

- 1) Rappelez l'expression puis donnez la valeur de l'efficacité de ce congélateur.
- 2) Calculez la puissance électrique nécessaire pour faire fonctionner le congélateur dans les conditions indiquées.