

Thermodynamique 5 : Machines Thermiques

École Centrale Pékin

2019-2020

Année 3

Table des matières

1	Machines thermiques cycliques	2
1.1	Inégalité de Clausius-Carnot	2
1.2	Machine thermique monotherme	3
2	Machines cycliques dithermes	4
2.1	«source chaude» et «source froide»	4
2.2	Diagramme de RAVEAU	5
3	Rendement et efficacité (Théorèmes de Carnot)	6
3.1	Moteur ditherme	6
3.2	Réfrigérateur ditherme	8
3.3	Pompe à chaleur ditherme	9
4	Exemples de machines thermiques dithermes	10
4.1	Le moteur 4 temps	10
4.2	Principe de fonctionnement d'un réfrigérateur ditherme	13
4.3	Pompe à chaleur	14

Vocabulaire utile :

- Monotherme / Ditherme
- Rendement / efficacité
- Réfrigérateur
- Pompe à chaleur

Historiquement, les machines thermiques et les moteurs ont été découverts et inventés avant (ou en même temps) que la théorie et le formalisme de l'étude des machines thermiques. Bien sûr les connaissances théoriques et l'étude de la thermodynamique ont permis d'améliorer progressivement les moteurs déjà existants.

Dans ce cours, on se base sur les deux premiers principes de la thermodynamique pour concevoir les machines thermiques les plus performantes. Il est intéressant de noter que même si les premières machines thermiques dithermes ont plus de 150 ans, les moteurs "classique" des véhicules à essence fonctionnent globalement de la même façon.

1 Machines thermiques cycliques

Dans tout le chapitre, nous allons considérer un système Σ fermé qui va subir des transformations avec l'extérieur, recevoir ou fournir du travail, et échanger de l'énergie sous forme de chaleur avec des thermostats. Le système Σ sera très souvent un fluide ou un gaz. Dans la suite du chapitre, nous l'appellerons **agent thermique**.

Une machine thermique sert à effectuer un échange d'énergie précis. On distingue trois types de machines thermiques en fonction de leurs utilisations :

- **Les moteurs.** Un moteur fournit de l'énergie sous forme de travail à un utilisateur.
- **Les réfrigérateurs.** Un réfrigérateur prélève de l'énergie à une source de température froide pour la rendre encore plus froide.
- **Les pompes à chaleur.** Une pompe à chaleur apporte de l'énergie à une source de température chaude pour la rendre encore plus chaude.

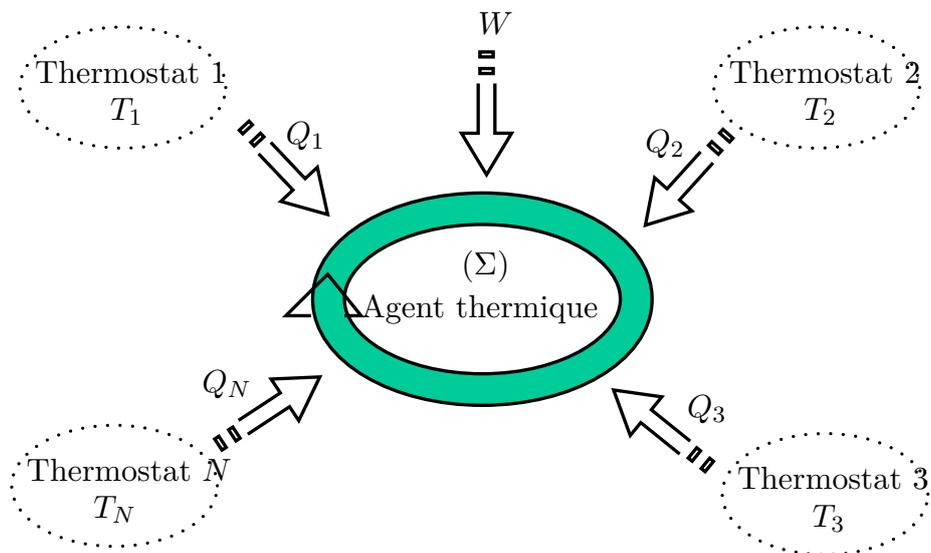


FIGURE 1 – Schéma symbolique d'une machine thermique

Nous n'allons étudier que les machines thermiques cycliques, c'est-à-dire les machines où le système revient dans le même état après avoir effectué une suite de transformations.

1.1 Inégalité de Clausius-Carnot

Prenons un système qui est en contact avec N thermostats différents de températures respectives T_i ($i \in [1, N]$) pendant un cycle. Appliquons le second principe de la thermodynamique au système pendant un cycle :

• Second Principe : $\Delta S = S_e + S_i$ avec $S_i \geq 0$ $\begin{cases} S_i = 0 \rightarrow \text{Réversible} \\ S_i > 0 \rightarrow \text{Irréversible} \end{cases}$

• On parcourt un cycle donc comme S est une fonction d'état

$$\Delta S = 0 = S_e + S_i \quad \left| \quad S_e = \sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{T_i} : \text{le système échange de la chaleur avec } N \text{ thermostats pendant le cycle.} \right.$$

et $S_i \geq 0$

donc $S_e \leq 0$

$$S_e \leq 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{T_i} \leq 0$$

On obtient l'inégalité de Clausius :

$$\sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{T_i} \leq 0$$

Si le cycle que parcourt le système est réversible, l'inégalité devient une égalité :

$$\sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{T_i} = 0$$

1.2 Machine thermique monotherme

On appelle machine thermique monotherme une machine thermique qui durant le cycle, n'est en contact qu'avec un seul thermostat.

Une machine thermique monotherme ne peut pas être un moteur.

En effet :

■ But d'un moteur : le Σ (gaz, liquide...) nous fournit du travail donc $W < 0$

■ Premier principe sur le cycle : $\Delta U = 0 = W + Q$

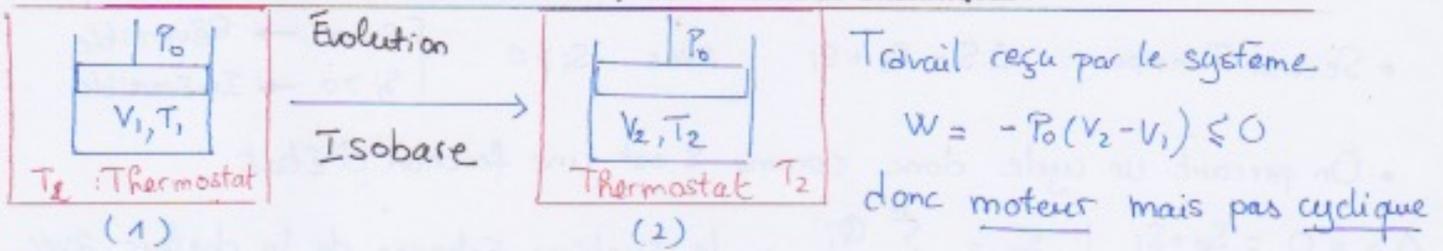
■ Inégalité de Clausius (ce qui revient à appliquer le second principe) :

$$\sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{T_i} \leq 0 \quad \text{Ici, on a que une source donc } \frac{Q_1}{T_1} \leq 0$$

et comme $W + Q = 0 \Rightarrow W \geq 0$ Le cycle est forcément récepteur
Le système (Σ) ne peut pas fournir de travail sur un cycle.

Le Deuxième principe de la thermodynamique est très frustrant car il garantit le caractère irréaliste de certains projets. Par exemple le suivant (que l'on doit au physicien Charles Fabry) : un bateau muni d'un moteur cyclique monotherme utilisant l'eau de la rivière comme unique thermostat, avançant en laissant derrière lui un sillage d'eau glacée.

Remarque : Il ne faut pas oublier l'adjectif **cyclique** lorsqu'on affirme qu'une machine thermique **monotherme** ne peut pas être motrice.



Idée: À partir de l'état (2), mettre (Σ) en contact avec un autre thermostat pour ramener (Σ) à l'état (1). On fait donc un cycle qui fournit du travail mais il faut au moins 2 Thermostats.

2 Machines cycliques dithermes

2.1 «source chaude» et «source froide»

On a vu que pour une seule source de chaleur, il n'est pas possible de réaliser un moteur. On ajoute maintenant un tout petit peu de complexité en considérant une machine thermique en contact avec deux sources de chaleur.

On nomme alors "source froide", le thermostat de plus faible température et "source chaude" celui de plus haute température.

Rappel :

Un thermostat est un système de capacité thermique grande devant la capacité thermique du système étudié. Sa température est supposée constante. Un thermostat fonctionne de manière quasi-statique.

⚠ Attention

Pour les machines thermiques tels que les pompes à chaleur ou les réfrigérateurs, notre but est de rendre plus chaude une source chaude, ou plus froide une source froide...

On considère alors que les sources chaudes et froides se comportent comme des thermostats pour un cycle seulement. Si le système effectue de nombreux cycles, la chaleur échangée sera telle que le thermostat ne pourra plus être considéré comme "à température constante".

Donc comme nous allons le voir, si on laisse évoluer un système moteur pendant longtemps, à la fin les sources chaudes et froides sont à la même température, et le moteur s'arrête.

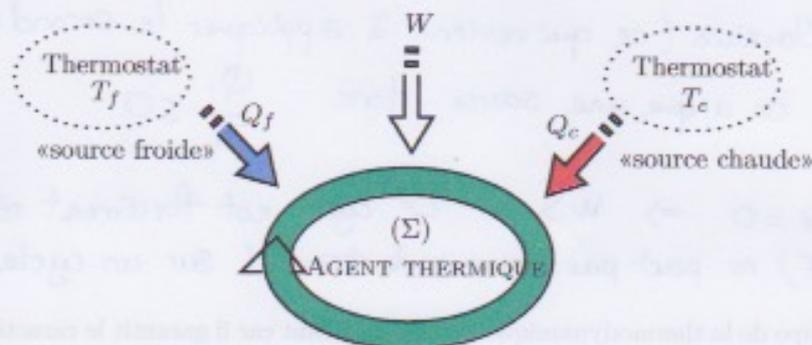


FIGURE 2 - Schéma symbolique d'une machine thermique ditherme

⚠ Attention

Quand on utilise le premier principe de la thermodynamique, et qu'on écrit $\Delta U = Q + W$, on oriente toujours les grandeurs Q et W comme entrantes dans le système Σ . Si l'on veut obtenir un système qui est moteur, il faut alors que $W < 0$. Dans ce cas Σ donne de l'énergie à l'extérieur, c'est bien un moteur.

2.2 Diagramme de Raveau

Le diagramme de Raveau représente dans le plan (Q_c, Q_f) les différentes machines thermiques.

■ Application du Deuxième principe

L'égalité (transformation réversible)

à lieu sur la droite d'équation:

$$Q_c = -\frac{T_c}{T_f} Q_f$$

$$T_c > T_f$$

$$\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0$$

$$S_i > 0$$

Irréversible

$$S_i = 0$$

Réversible

Impossible

$\left| \text{pente} \right| > 1$

■ Application du Premier principe

$$\Delta U = W + Q_c + Q_f$$

$\underset{=0}{\Delta U}$

$$Q_c = -Q_f - W$$

Pour $W=0$ on a une droite $Q_c = -Q_f$

En dessous $Q_c < -Q_f \Rightarrow W > 0$

Au dessus $Q_c > -Q_f \Rightarrow W < 0$

$$W > 0$$

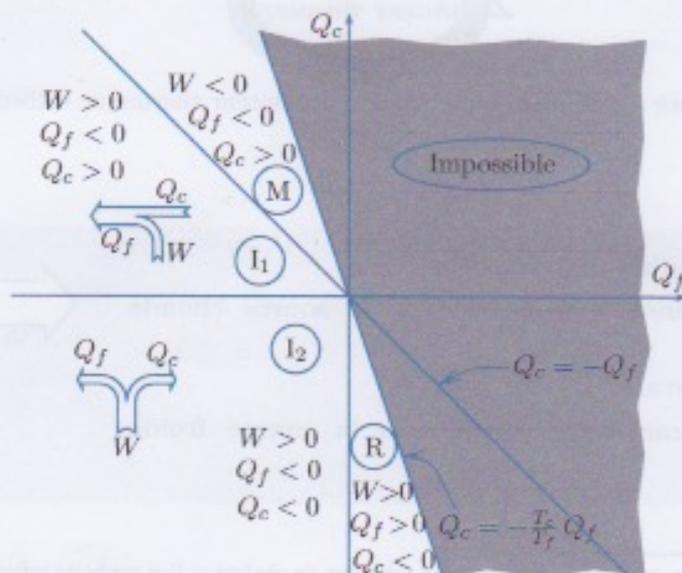
$$W < 0$$

$$W = 0$$

$\leftarrow \text{pente} = -1$

Si l'on superpose les deux informations dans le plan (Q_f, Q_c) , on obtient le diagramme suivant, appelée diagramme de Raveau. On peut distinguer plusieurs zones

- la zone grisée est la zone interdite par le Deuxième principe;
- la zone (M) est la zone dans laquelle sont situées les *moteurs thermiques* ($W < 0, Q_c > 0$ et $Q_f < 0$);
- la zone (R) est la zone dans laquelle sont situées les *pompes à chaleur* et les *réfrigérateurs* ($W > 0, Q_c < 0$ et $Q_f > 0$).



■ Il reste deux grandes zones dans les récepteurs : (I_1) et (I_2) . Dans ces zones nous avons représenté le bilan énergétique afin de mieux voir ce qu'il se passe :

- pour la zone (I_1) , nous pouvons voir que la machine reçoit du travail et que dans le même temps l'énergie passe des zones de température élevée aux zones de température basse. C'est une machine **inutile**¹ car c'est une machine qui utilise de l'énergie (W) pour réaliser un transfert énergétique naturel et spontané.
- pour la zone (I_2) , nous pouvons voir que la machine reçoit du travail et le restitue aux deux sources T_c et T_f sous forme de chaleur. Cela implique que ces deux sources ont le même rôle physique, ce qui rend inutile la machine. Quitte à ce que les deux sources soient physiquement aussi utiles, autant prendre deux machines, l'une donnant son énergie uniquement à T_c , l'autre à T_f .

3 Rendement et efficacité (Théorèmes de Carnot)

Pour une machine thermique qui réalise une tâche donnée (chauffer, refroidir, ou fournir du travail), il est fondamental de savoir si cette machine est efficace ou non. Bien sûr on cherche à réaliser la tâche donnée au moindre coût (donner le moins d'énergie à la machine). **On cherche à avoir le meilleur rendement.**

En fonction de la machine considérée, le rendement r (ou l'efficacité e) prendra un nom différent, mais la définition reste la même.

$$r_{\text{machine thermique}} = \left| \frac{\text{grandeur valorisable}}{\text{grandeur coûteuse}} \right|$$

3.1 Moteur ditherme

3.1.1 Sens effectif des transferts

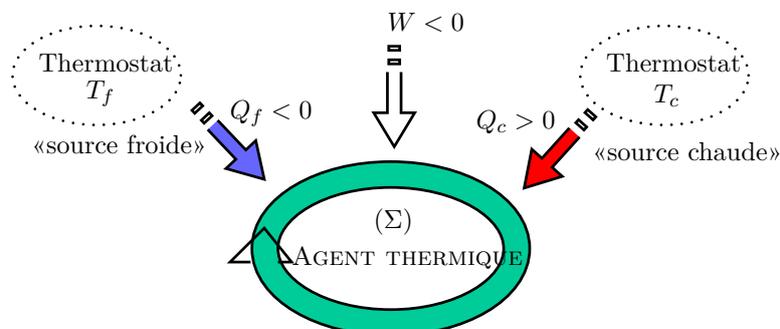
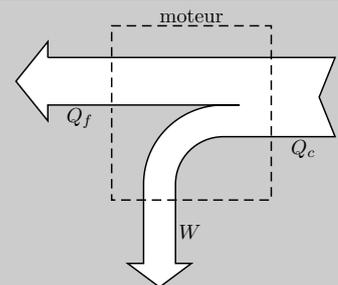


FIGURE 3 – Schéma symbolique d'un moteur thermique ditherme

L'agent thermique d'un moteur ditherme :

- Reçoit un transfert thermique de la source chaude ($Q_c > 0$)
- Fournit du travail ($W < 0$)
- Fournit un transfert thermique à la source froide ($Q_f < 0$).



1. Éventuellement, cela peut servir à accélérer des échanges de chaleur si l'on souhaite refroidir très vite un système.

Le travail fourni à la source froide n'est pas utile pour l'utilisation que l'on veut faire de la machine thermique, mais on ne peut pas annuler ce transfert (à cause du second principe et du fait que la machine doit réaliser un cycle).

3.1.2 Rendement pour les moteurs thermiques

■ Le rendement r d'un moteur cyclique ditherme réel vérifie l'inégalité suivante

$$r \leq 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

L'égalité est atteinte lorsque la machine cyclique réalise un cycle réversible. Le rendement maximal, appelé aussi rendement de Carnot, s'écrit :

$$r_C = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

En effet : $r = \left| \frac{\text{grandeur qui nous intéresse}}{\text{grandeur que l'on doit fournir}} \right| = \left| \frac{W}{Q_c} \right|$
 On suppose ici que la source froide est naturelle (ex : l'atmosphère)

■ Premier Principe : $\Delta U_{\text{cycle}} = 0$ et $\Delta U = W + Q_c + Q_f \Rightarrow W = -(Q_c + Q_f)$

Pour un moteur $W \leq 0$ donc $Q_c + Q_f \geq 0$ donc $r = \left| \frac{W}{Q_c} \right| = \frac{Q_c + Q_f}{Q_c} = 1 + \frac{Q_f}{Q_c}$

■ Second Principe : $\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0 \Rightarrow \frac{Q_f}{Q_c} \leq -\frac{T_f}{T_c}$ donc $1 + \frac{Q_f}{Q_c} \leq 1 - \frac{T_f}{T_c}$

$$r \leq 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

Remarques

■ Le rendement de CARNOT est indépendant de l'agent thermique qui évolue : il ne dépend que des températures des sources T_f et T_c .

■ La thermodynamique est très cruelle. En effet, même théoriquement le rendement est inférieur à 1 (pour des thermostats réalistes). C'est une grande différence avec les moteurs par induction qui eux ont un rendement théorique de 1 !

Quelques ordres de grandeurs du rendement de moteurs thermiques :

Type de machine	Source chaude	Source froide	rendement théorique	rendement réel
Moteur à essence	Gaz en combustion $T_c = 3000 \text{ K}$	Atmosphère $T_f = 300 \text{ K}$	$r_{th} = 0.9$	$r_{rel} \simeq 0.3$
Moteur pour bateau	Gaz en combustion	Océan	$r_{th} = 0.9$	$r_{rel} \simeq 0.5$
Centrale nucléaire	Réacteur $T_c = 600 \text{ K}$	Rivière $T_f = 300 \text{ K}$	$r_{th} = 0.5$	$r_{rel} \simeq 0.3$

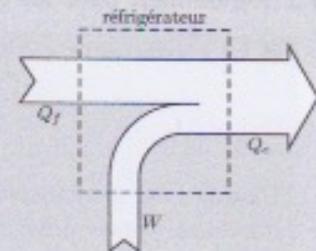
3.2 Réfrigérateur ditherme

3.2.1 Sens effectif des transferts

L'agent thermique d'un réfrigérateur :

- Reçoit du travail ($W > 0$)
- Reçoit un transfert thermique de la source froide ($Q_f > 0$),
- Fournit un transfert thermique à la source chaude ($Q_c < 0$).

Le système prélève bien de l'énergie à la source froide, c'est donc un réfrigérateur.



De même, ici le système fournit un transfert thermique à la source chaude. Une partie de l'énergie (électrique) que l'on fournit sert à réchauffer la source chaude... Bien sûr pour un réfrigérateur, on s'en fiche, mais on ne peut pas annuler ce transfert thermique avec une machine cyclique ditherme.

3.2.2 Théorème de Carnot pour un réfrigérateur ditherme

Pour un réfrigérateur, on ne parle pas de rendement mais d'efficacité e car un rendement est toujours inférieur à 1 tandis qu'une efficacité peut être supérieure à 1.

■ L'efficacité e d'un réfrigérateur cyclique ditherme réel vérifie l'inégalité suivante

$$e \leq \frac{T_f}{T_c - T_f}$$

L'égalité est atteinte quand la machine thermique réalise un cycle réversible :

$$e_c = \frac{T_f}{T_c - T_f}$$

En effet : 1^{er} Principe : $\Delta U = 0 = W + Q_c + Q_f$

2nd Principe : $\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0$

$$e = \left| \frac{\text{grandeur d'intérêt}}{\text{grandeur coûteuse}} \right| = \frac{Q_f}{W} \quad (\text{car ici } Q_f \geq 0, W > 0)$$

$$Q_c = -(W + Q_f) \Rightarrow -\frac{(W + Q_f)}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0 \Rightarrow -\frac{W}{T_c} \leq Q_f \left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_f} \right)$$

$$\frac{W}{Q_f} \geq \frac{T_c - T_f}{T_f} \Rightarrow \boxed{\frac{Q_f}{W} = e \leq \frac{T_f}{T_c - T_f}}$$

■ L'efficacité de CARNOT est indépendante de l'agent thermique qui évolue : elle ne dépend que des températures des sources T_f et T_c .

■ Par rapport à un rendement, Il est plus difficile d'interpréter une efficacité seule... Cette grandeur sert plutôt à comparer deux machines thermiques de même type d'utilisation.

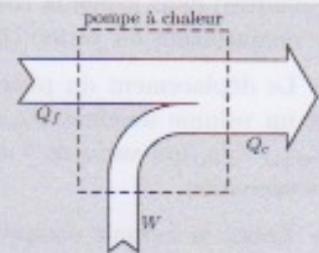
■ L'efficacité tend vers l'infini lorsque les deux sources ont la même température : C'est normal car à ce moment là il est facile de lutter contre le sens naturel de transfert de la chaleur. Par contre, plus les deux sources ont des températures éloignées, plus il est difficile de réaliser un transfert de chaleur du froid vers le chaud et donc plus l'efficacité est faible.

3.3 Pompe à chaleur ditherme

3.3.1 Sens effectif des transferts

L'agent thermique d'une pompe à chaleur (ch : 热泵) :

- Reçoit du travail ($W > 0$)
- Reçoit un transfert thermique de la source froide ($Q_f > 0$),
- Fournit un transfert thermique à la source chaude ($Q_c < 0$).



C'est exactement comme dans le cas du réfrigérateur !

⚠ Attention

La pompe à chaleur peut sembler identique à un réfrigérateur...mais l'opération que l'on veut réaliser cette fois-ci est chauffer la source chaude, on est pas a priori intéressé par refroidir la source froide (mais la machine le fait quand même, à cause du second principe et du côté cyclique).

3.3.2 Théorème de Carnot pour une pompe à chaleur ditherme

De même, pour une pompe à chaleur, on parle d'efficacité et pas de rendement.

L'efficacité e d'une pompe à chaleur cyclique ditherme réel vérifie l'inégalité suivante

$$e \leq \frac{T_c}{T_c - T_f}$$

L'égalité est atteinte pour le cycle de Carnot, c'est-à-dire lorsque la machine réalise un cycle réversible :

$$e_C = \frac{T_c}{T_c - T_f}$$

En effet :

- $\Delta U = 0 = W + Q_c + Q_f$
- $\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0$
- $e = \frac{-Q_c}{W}$ (car ici $Q_c \leq 0$)

$\frac{Q_c}{T_c} - \frac{W}{T_f} - \frac{Q_c}{T_f} \leq 0$
 $Q_c \left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_f} \right) \leq \frac{W}{T_f}$

$$\frac{Q_c}{W} \geq \frac{T_c T_f}{T_f (T_f - T_c)} \Rightarrow \boxed{e = \frac{-Q_c}{W} \leq \frac{T_c}{T_c - T_f}}$$

■ L'efficacité de CARNOT est indépendante de l'agent thermique qui évolue : elle ne dépend que des températures des sources T_f et T_c .

4 Exemples de machines thermiques dithermes

4.1 Le moteur 4 temps

Ce moteur, universellement utilisé, a été inventé par l'ingénieur allemand Nikolaus OTTO (1832-1891) et le physicien français Alphonse BEAU DE ROCHAS (1815-1893).

4.1.1 Description du moteur

- Le moteur est composé d'un *cylindre* (ou d'un ensemble de plusieurs cylindres) dans lequel la *combustion* (c 燃烧) du carburant provoque le déplacement du *piston* (活塞).
- Le déplacement du piston se fait entre un volume minimal V_{min} et un volume maximal V_{max} . Le rapport des volumes extrêmes $a = V_{max}/V_{min}$ qui varie de 7 à 12 en général, porte le nom de *taux de compression*.
- Enfin, le moteur comporte au moins deux *soupapes* (气门) par cylindre, qui permettent l'admission des "gaz" (mélange d'air et d'essence) destinés à être brûlés, et à l'expulsion des gaz brûlés.
- Le mouvement du piston entraîne, par l'intermédiaire d'une bielle (竿), l'arbre moteur qui transmet la puissance mécanique aux autres parties mobiles du moteur et aux roues du véhicule.

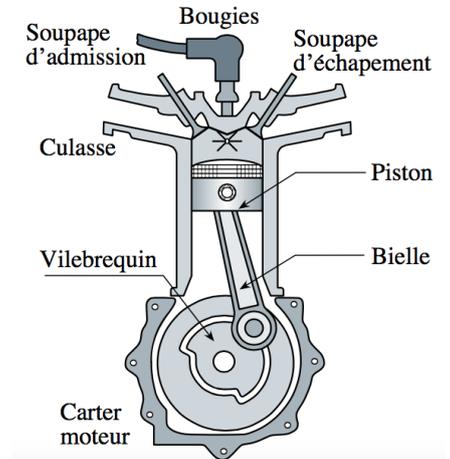
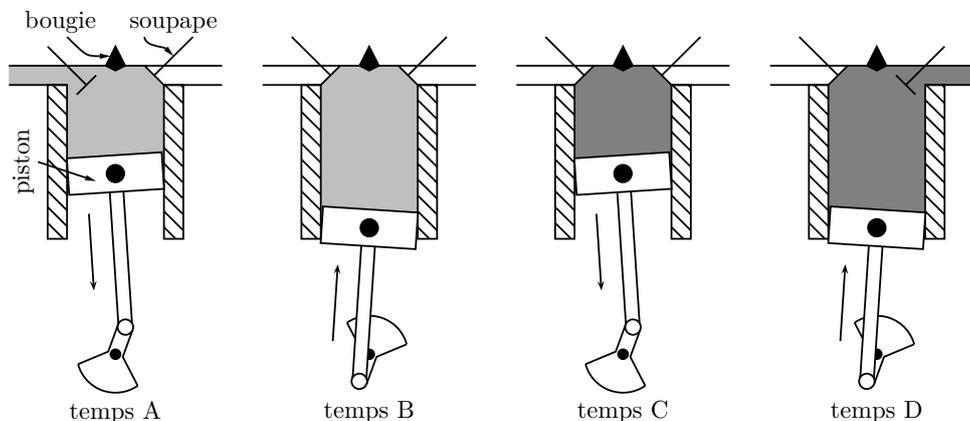


FIGURE 4 – Coupe d'un moteur

4.1.2 Principe du fonctionnement

Dans un moteur à essence « usuel », le fonctionnement est représenté par les schémas suivants :



- Temps A : *admission*. La (les) soupape(s) d'admission s'ouvre(nt) et le mélange air-carburant entre dans le cylindre. À la fin de ce temps, la (les) soupape(s) se referme(nt)
- Temps B : *compression*. Le piston remonte diminuant ainsi le volume de la chambre.
- L'*explosion* n'est pas un temps en soi : c'est entre le temps B et C. Une bougie crée une étincelle qui initie la réaction de combustion entre l'air et le carburant. Cette combustion est extrêmement rapide : c'est une explosion. Elle est si rapide que le piston n'a presque pas le temps de bouger.
- Temps C : *détente*. **C'est le temps moteur** : le gaz échauffé par l'explosion repousse violemment le piston vers le bas. C'est à ce moment là que le travail est véritablement fourni au piston.
- Temps D : *échappement*. La (les) soupape(s) d'échappement s'ouvre(nt) et le mélange de gaz brûlés est évacué de la chambre par la remontée du piston.

■ Il faut deux aller-retour du piston dans le cylindre pour faire un cycle complet. Mais durant un aller-retour, il n'y a pas de variation de pression et nous allons voir dans la suite que le temps correspondant à l'admission pourra être négligé.

■ Les soupapes permettent d'évacuer du gaz brûlé et de faire rentrer un nouveau mélange air-carburant. Le système Σ n'est alors pas fermé!! Nous allons voir qu'avec notre modélisation, tout se passe comme si on avait un unique système qui subit un cycle et qui revient à l'état d'équilibre.

4.1.3 Cycle réel

La représentation de la figure 5 est qualitative car il est difficile de trouver de véritables cycles tracés dans le diagramme (P, V) . La pression est celle régnant dans la chambre alors que le volume est celui de la chambre.

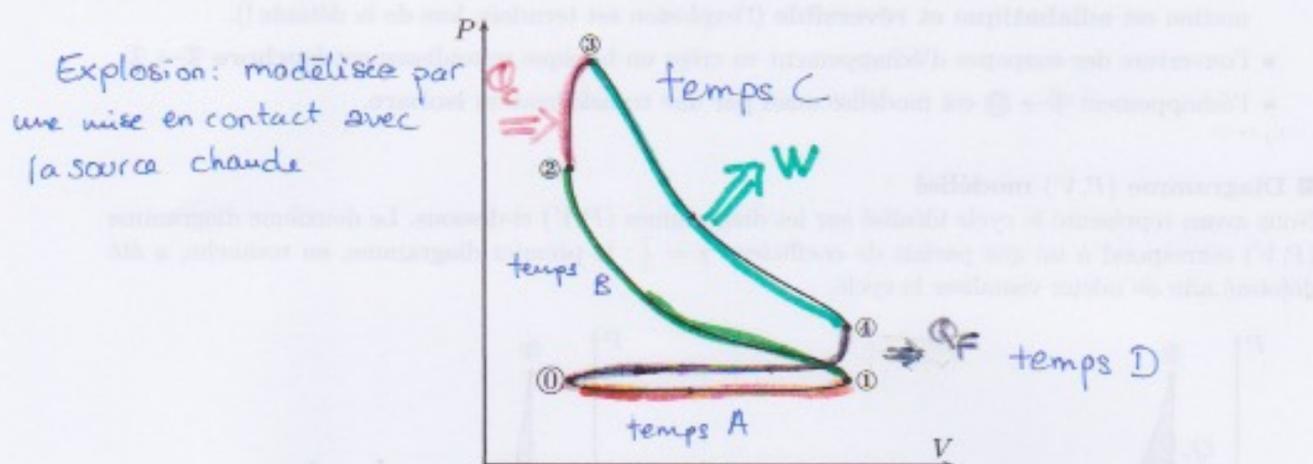


FIGURE 5 - Diagramme (P, V)

- Au point ①, le piston est à sa position la plus haute possible, le volume à l'intérieur de la chambre est alors très faible mais pas nul.
- Lors de l'admission ① \rightarrow ④ le volume augmente à l'intérieur de la chambre. C'est le temps A.
- Lorsque le piston est au plus bas, $V = V_{max}$, le volume de la chambre est maximal et les soupapes se ferment (point ④).
- La compression ④ \rightarrow ② correspond au temps B. Le volume diminue, la pression augmente.
- Lorsque le piston a de nouveau atteint sa butée, le volume est minimal, (point ②), une bougie crée une étincelle qui provoque la combustion très rapide des gaz (explosion) entre les points ② et ③. Lors de cette combustion, le piston n'est que très peu descendu.
- Lors de la détente ③ \rightarrow ④, le piston descend jusqu'à ce que le volume de la chambre soit minimal.
 - † Lorsque les soupapes s'ouvrent (en ④) le contact direct entre les gaz déjà échappés et les gaz brûlés dans la chambre provoque un refroidissement brutal.
 - † Le mouvement du piston vers le haut (diminution du volume) permet d'évacuer les gaz brûlés de ④ à ① et un nouveau cycle peut recommencer.

4.1.4 Cycle modèle

■ **Modèle concernant le mélange gazeux :**

- le mélange { air - carburant } sera considéré comme un gaz parfait de coefficient $\gamma = 1,4$. Cela est une bonne approximation pour l'air mais le carburant est (en première approximation) une vapeur d'un alcane (烷烃).
- nous allons supposer que le système ne subit **aucune transformation chimique**, autrement dit que ses caractéristiques (C_p , C_v , γ et surtout n) restent identiques.

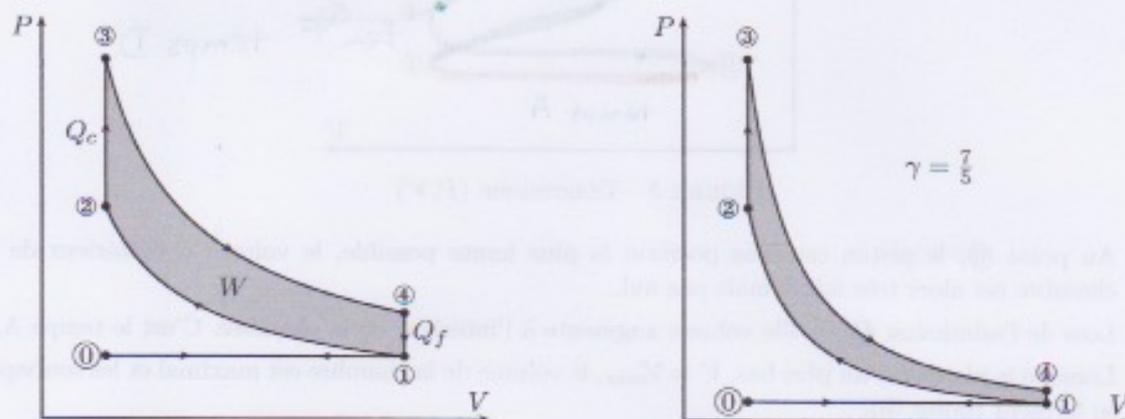
- Nous modélisons donc l'énergie libérée lors de la réaction chimique de combustion comme de l'énergie thermique provenant d'une source thermique externe et, évidemment, virtuelle.

■ Modèle concernant les transformations :

- la transformation ① → ② sera considérée comme **isobare** ;
- la transformation ② → ③ sera considérée comme **adiabatique** car suffisamment rapide pour négliger le transfert thermique. On ajoutera par ailleurs l'hypothèse forte que la transformation est **réversible**... afin de mener des calculs simples ;
- l'explosion ③ → ④ est modélisée par une transformation **isochore** ;
- lors de la détente ④ → ①, nous pouvons considérer, comme pour la compression que la transformation est **adiabatique et réversible** (l'explosion est terminée lors de la détente!).
- l'ouverture des soupapes d'échappement va créer un brusque refroidissement **isochore** ④ → ①.
- l'échappement ① → ① est modélisé aussi par une transformation **isobare**.

■ Diagramme (P, V) modélisé

Nous avons représenté le cycle idéalisé sur les diagrammes (P, V) ci-dessous. Le deuxième diagramme (P, V) correspond à un gaz parfait de coefficient $\gamma = \frac{7}{5}$; le premier diagramme, en revanche, a été déformé afin de mieux visualiser le cycle.



Finalement nous pouvons constater que les transformations ① → ② puis ④ → ① se compensent parfaitement à tout point de vue et ne permettent pas de fournir un travail. Nous allons donc supprimer ces deux étapes pour ne conserver que le cycle ② → ③ → ④ que nous considérerons être parcouru par le même mélange { air - carburant }. Dans notre modélisation, on peut alors raisonner avec un **système fermé**!

4.1.5 Calcul du rendement

On va montrer que pour le cycle que l'on vient de modéliser, on obtient $r = 1 - a^{1-\gamma}$ où $a = \frac{V_{max}}{V_{min}}$.

■ Rendement : $r = -\frac{W}{Q_c} = 1 + \frac{Q_f}{Q_c}$

■ Calcul de Q_c : ② → ③ : évolution isochore donc $W_{2 \rightarrow 3} = 0$

Gaz Parfait : $\Delta U_{2 \rightarrow 3} = C_v \Delta T = \frac{nR}{\gamma-1} (T_3 - T_2)$
 $= Q_c$

Calcul de Q_F : Même raisonnement, on obtient $Q_F = \frac{nR}{\gamma-1} (T_1 - T_4)$

$$\Gamma = 1 + \frac{Q_F}{Q_C} = 1 + \frac{T_1 - T_4}{T_3 - T_2}$$

Lien entre T_1 et T_2 : ① \rightarrow ② Adiabatique (car rapide)
+ Réversible (supposée)

Loi de Laplace (car Adiabatique + Quasi-Statique + Gaz Parfait):

$$PV^\gamma = \text{cte} \Leftrightarrow TV^{\gamma-1} = \text{cte}' \quad \text{donc} \quad T_2 V_2^{\gamma-1} = T_1 V_1^{\gamma-1} \Rightarrow \boxed{\frac{T_2}{T_1} = a^{\gamma-1}}$$

$(a = \frac{V_{\max}}{V_{\min}})$

Lien entre T_3 et T_4 : Même chose: $T_3 = T_4 a^{\gamma-1}$

$$\Rightarrow \Gamma = 1 + \frac{T_1 - T_4}{T_4 a^{\gamma-1} - T_1 a^{\gamma-1}} = 1 + \frac{-1}{a^{\gamma-1}} = \boxed{1 - a^{1-\gamma} = \Gamma}$$

Avec $\gamma = 1,4$, l'application numérique mène à :

a	3	6	9	12
r	0,36 = 36%	51 %	58 %	63 %

Expérimentalement, on obtient plutôt r variant de 10 à 20%.

Notre modèle est simple, mais on observe bien expérimentalement que r augmente avec a comme dans la relation

Remarque :

Théoriquement $r \xrightarrow{a \rightarrow +\infty} 1$ (avec $a \rightarrow +\infty \Leftrightarrow V_{\min} \rightarrow 0$) mais en pratique le phénomène d'autoallumage limite V_{\min} : avant que le piston n'atteigne la fin de sa course (V_{\min}), le mélange s'enflamme spontanément². Pour éviter cela, on ajoute des additifs comme $\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$ avec le carburant (c'est cette essence qu'on nomme "super" (号汽油)). Ces additifs néfastes à l'environnement sont écartés : on préfère utiliser des étheroxydes (on obtient alors du "super sans plomb" (无铅汽油)).

4.2 Principe de fonctionnement d'un réfrigérateur ditherme

Si l'on voulait établir une formule du rendement réel pour un réfrigérateur, on devrait faire une modélisation d'un cycle réel que subit le système dans cette machine thermique. Cependant pour les réfrigérateur on utilise **des changements d'état de l'agent thermique**. On ne peut pas encore décrire de manière quantitative la thermodynamique des changements d'état. On donne ici une description qualitative du fonctionnement d'un réfrigérateur.

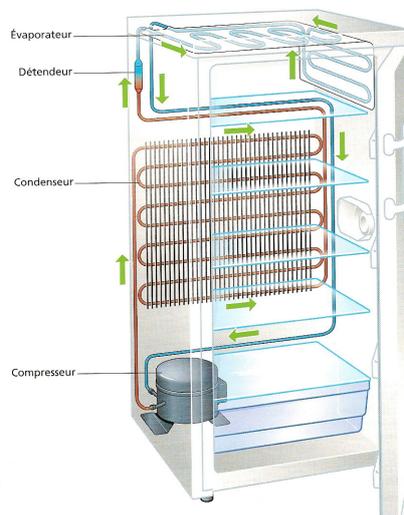


FIGURE 6 – Schéma de principe d'un réfrigérateur

L'agent thermique :

- est comprimé grâce au *compresseur*³ (ch : 压缩机) ④ (figure 7) : durant cette étape, il reçoit du travail ($W > 0$) ;

2. L'explosion violente du mélange provoque alors un choc préjudiciable sur les pièces métalliques : on dit que le moteur *cogne*.

3. C'est le compresseur que l'on entend lorsque le réfrigérateur se met à fonctionner.

- traverse le *condenseur* (冷凝器) ①. Le condenseur est constitué d'un serpentin. L'agent thermique cède effectivement un transfert thermique à ce moment (en réalité il se liquéfie, c'est-à-dire qu'il passe de la phase gazeuse à la phase liquide, cette opération transfère beaucoup de chaleur à l'extérieur) à l'atmosphère qui joue donc le rôle de source chaude ($Q_c < 0$).
- est détendu dans le *détendeur* ②(毛细管) (par exemple en réalisant une détente de Joule-Thomson!). Pendant cette étape la température baisse brutalement.
- Se vaporise (passage de l'état liquide à l'état vapeur) dans l'*évaporateur* (蒸发器). Cette étape demande beaucoup d'énergie, qui est prise dans le thermostat en contact avec le système à ce moment là : la source froide. Le système reçoit donc bien un transfert thermique de la source froide ($Q_f > 0$). La source froide est bien sûr l'intérieur du réfrigérateur!
- La vapeur ainsi produite retourne au compresseur, et on recommence le cycle.

On retiendra donc que pour un réfrigérateur,

■ la source chaude est l'atmosphère extérieure.

■ La source froide est l'intérieur du réfrigérateur.

■ Ordre de grandeur : Si $\theta_f = \theta_{\text{réfrigérateur}} = 5^\circ\text{C}$ et $\theta_c = \theta_{\text{cuisine}} = 20^\circ\text{C}$

$$e \leq \frac{5 + 273}{(273 + 20) - (273 + 5)} = 18,5$$

Remarques :

- Ici, afin de réaliser des échanges de chaleur importants entre le système et les sources froides et chaudes, on utilise le changement d'état du fluide. Dans le chapitre suivant nous reviendrons sur la grande quantité d'énergie que demande un changement d'état et donc l'intérêt d'utiliser les changements d'états dans les machines cycliques.
- Pour que le fluide change d'état aux températures et pressions que nous utilisons en pratique dans un réfrigérateur, on ne peut pas choisir de l'eau comme agent thermique⁴. Avant 1987, il n'y avait pas de restriction et les principaux fluides utilisés étaient des chlorofluorocarbones (CFC). Depuis, des restrictions interdisent l'usage de composés chlorés, car cet élément détruit la couche d'ozone et a également un fort impact sur l'effet de serre⁵.

4.3 Pompe à chaleur

4.3.1 Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur ditherme

Une pompe à chaleur n'est qu'un réfrigérateur pour lequel le *condenseur* fait office de radiateur (et est installé à l'intérieur de la pièce à chauffer qui joue le rôle de source chaude) tandis que l'*évaporateur* est placé à l'extérieur au contact d'une source froide (une rivière, un lac, l'atmosphère...). **La source chaude est la pièce que l'on chauffe, la source froide est l'atmosphère, un lac ou une rivière à l'extérieur de la maison.**

On voit ici clairement que la différence entre pompe à chaleur et réfrigérateur dépend juste du résultat que l'on souhaite obtenir :

Un réfrigérateur est aussi une pompe à chaleur car il réchauffe très légèrement la source chaude, qui est notre cuisine. Mais on ne s'intéresse pas à cette augmentation de température, souvent négligeable, car ce qui nous intéresse est la température de la source froide (l'intérieur du frigo).

4. On cherche également à avoir un fluide avec la plus grande chaleur latente de vaporisation.

5. Le rejet dans l'atmosphère d'un kg de certains fluides frigorigènes génère un effet de serre égale au rejet de 13 000 kg de CO₂ (l'équivalent d'une dizaine d'aller retour Lyon-Pékin)

De même une pompe à chaleur est aussi un réfrigérateur car elle refroidit très légèrement la source froide (atmosphère extérieur). Mais quand on allume le chauffage chez soi, on s'intéresse plus à l'augmentation de la température intérieure que ce qu'il se passe à l'extérieur.

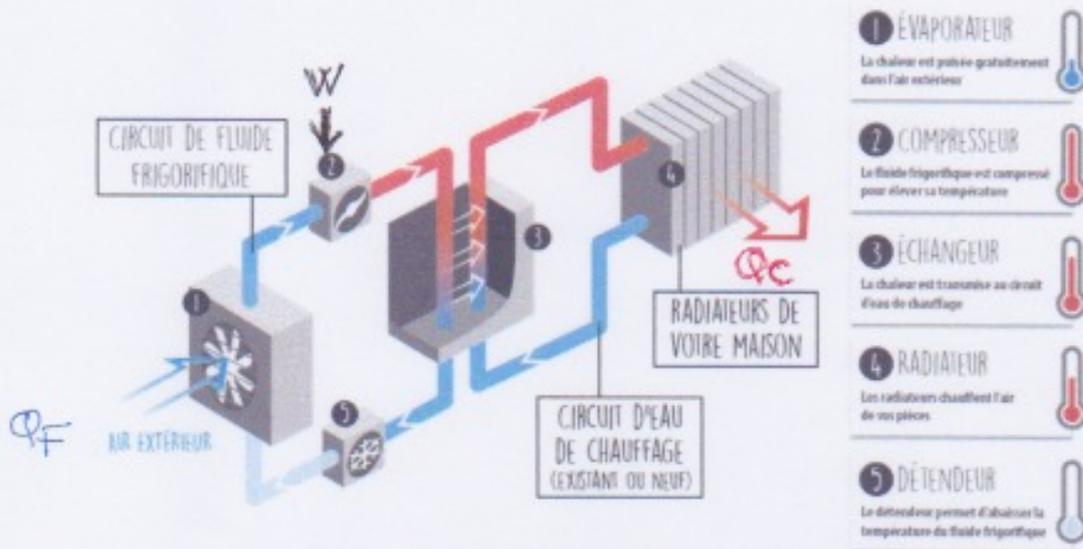


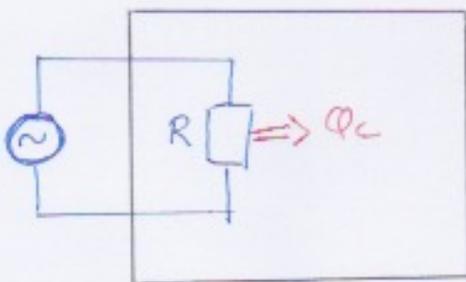
FIGURE 7 – Schéma de principe d'une pompe à chaleur

4.3.2 Ordre de grandeur

Si l'on choisit $\theta_{\text{appartement}} (= \theta_{\text{chaude}}) = 27^\circ\text{C}$ et $\theta_{\text{isc}} (= \theta_{\text{froide}}) = 4^\circ\text{C}$

$$e_c = \frac{T_c}{T_c - T_f} = \frac{300}{300 - 277} = 13$$

On peut comparer ce résultat à un autre système de chauffage : Considérons l'exemple d'un radiateur (Σ) assimilé à un résistor alimenté par un générateur de tension. Supposons un régime stationnaire atteint pour la résistance.



$\Delta U_{\text{résistance}} = 0$ (car le régime permanent est atteint)

$= W_{\text{elec}} + Q_C$ donc $Q_C = -W_{\text{elec}}$

$e = \left| \frac{\text{grandeur d'intérêt}}{\text{grandeur coûteuse}} \right| = -\frac{Q_C}{W} = 1$

Il est donc 13 fois plus avantageux d'utiliser le travail W pour actionner le compresseur d'une pompe à chaleur plutôt que de l'utiliser pour faire fonctionner un radiateur électrique. **Alors pourquoi n'a-t-on pas tous une pompe à chaleur chez soi ?**...Parce que les pompes à chaleur coûtent cher en installation et en entretien.