MACHINES THERMIQUES

I. Qu’est-ce qu’une machine thermique ?

On appelle machine thermique un dispositif destiné à réaliser des **transferts d’énergie**, quelle que soit leur nature (travail ou transfert thermique).

Les machines thermiques étudiées dans le cadre du cours seront des **machines cycliques** dans lesquelles un **système thermodynamique** - qui est presque toujours un fluide - décrit des cycles au cours desquels **il échange un travail W et un transfert thermique Q avec le milieu extérieur**.
Suivant le signe du travail échangé au cours d’un cycle, on distingue :

- **Moteur thermique si W < 0**, le système fournit globalement du travail au milieu extérieur (machine à vapeur, moteur à explosion ...)
- **Récepteur thermique si W > 0**, le système reçoit globalement du travail du milieu extérieur (machine frigorifique, pompe à chaleur ...)

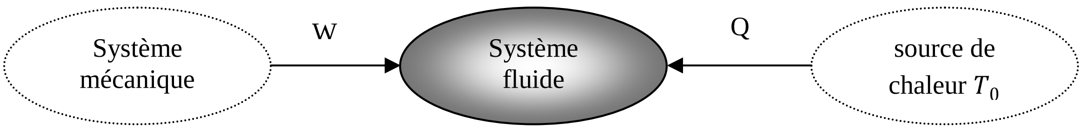
Le **milieu extérieur** est **idéalement** décrit par :

- **une ou plusieurs sources de chaleur** (ou thermostat de température T_i) qui n’échangent que de la chaleur avec le système de manière isotherme réversible. On notera Q_i ces transferts thermiques sur un cycle définis par rapport au système $Q = \sum Q_i$.
- un **système mécanique** qui n’échange que du travail avec le système de manière adiabatique réversible.

II. Machines monothermes

1) Bilans énergétique et entropique

Une machine monotherme, c'est-à-dire en contact avec une seule source de chaleur, peut se schématiser comme suit :



- **Le premier principe** appliqué **au système fluide pour tout cycle** s’écrit :

$\boldsymbol{\Delta U = Q + W = 0}$ soit $\boxed{\boldsymbol{W = -Q}}$

- **Le second principe** appliqué **au système fluide pour tout cycle** s’écrit :

$\boldsymbol{\Delta S = S_e + S_c = 0}$ soit $\boldsymbol{S_e = -S_c}$ avec $\boldsymbol{S_c \geq 0}$ (par définition) et $\boldsymbol{S_e = \frac{Q}{T_0}}$ (système en contact avec une source de chaleur de température T_0). Par conséquent $\frac{Q}{T_0} \leq 0$ soit $\boxed{\boldsymbol{Q \leq 0}}$.

En associant les deux expressions encadrées on obtient $\boxed{\boldsymbol{W \geq 0}}$: **une machine monotherme ne peut être qu’un récepteur thermique. Un moteur thermique monotherme est impossible d’après le second principe.**

Exemple : Un radiateur est un récepteur monotherme qui reçoit du travail (W>0) qu’il restitue par transfert thermique (Q<0) à la pièce qu’il faut chauffer. Dans ce cas la pièce n’est pas une source de chaleur idéale car sa température va varier au cours du chauffage. Cependant on peut considérer qu’elle reste constante au cours d’un cycle.

2) Principe de Carnot

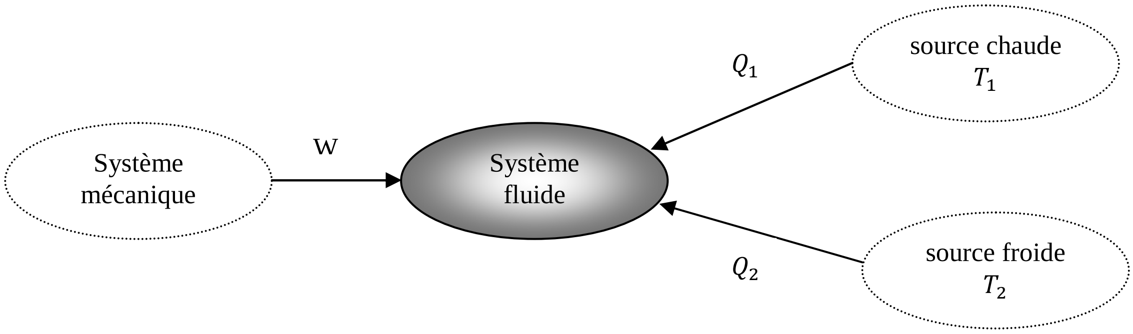
Le premier principe est insuffisant pour prouver l'inexistence du moteur monotherme. Le second principe est alors nécessaire dont voici la version historique énoncée par Carnot :

« Pour qu'un système décrivant un cycle fournisse du travail, il doit nécessairement être en contact avec au moins deux sources de chaleur. »

III. Machines dithermes

1) Bilans énergétique et entropique

Une machine ditherme est en contact avec <u>deux sources de chaleur</u> : une source chaude (T_1) et une source froide (T_2).



- **Le premier principe** appliqué **au système fluide pour tout cycle** s'écrit :

$\Delta U = Q + W = 0$ soit $\boxed{\boldsymbol{W = -Q = -(Q_1 + Q_2)}}$

- **Le second principe** appliqué **au système fluide pour tout cycle** s'écrit :

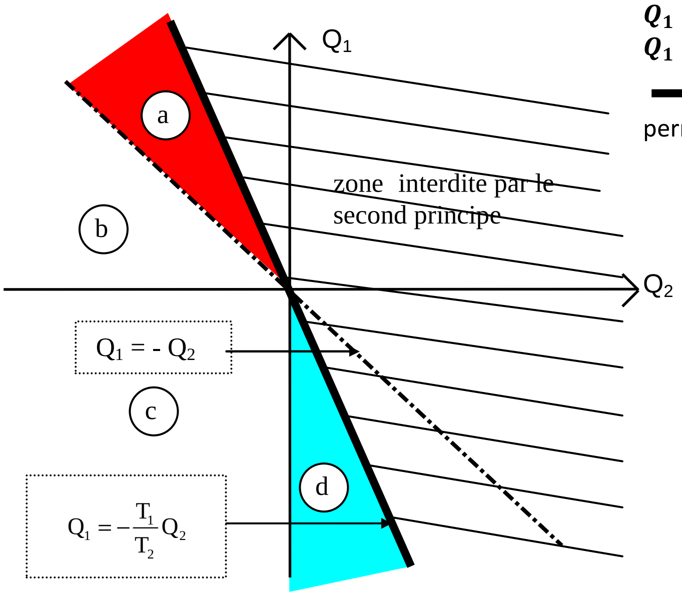
$\Delta S = S_e + S_c = 0$ soit $S_e = -S_c$ avec $S_c \geq 0$ et $\boldsymbol{S_e = \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2}}$.

Par conséquent $\boxed{\boldsymbol{\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} \leq 0}}$ **inégalité de Clausius.**

<u>Remarque</u> : Si le cycle est réversible ($S_c = 0$) alors $\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$ (voir le cycle réversible de Carnot du TD premier principe).

---

2) Diagramme de Raveau



-·-·-· Délimitation entre le comportement moteur (W < 0) soit $\boldsymbol{Q_1 + Q_2} > 0$ *(zone au dessus de la droite) et récepteur (W > 0) soit* $\boldsymbol{Q_1 + Q_2} < 0$ *(zone en dessous de la droite).*

━━ *Délimitation* ($T_1 > T_2$: pente plus importante) entre les zones permises et interdites par le second principe.

Moteurs dithermes (zone a): **W < 0** ; **Q_1 > 0 et Q_2 < 0**

Récepteurs dithermes (zone b, c, d): **W > 0**

- zone b : $Q_1 > 0$ et $Q_2 < 0$: sans intérêt (transfert thermique de la source chaude à la source froide - échange thermique spontané).

- zone c : $Q_1 < 0$ et $Q_2 < 0$: sans intérêt (équivalent à un récepteur monotherme).

- zone d : Q_1 < 0 et Q_2 > 0 : intéressant car transfert thermique de la source froide à la source chaude (contraire au transfert spontané).

3) Moteurs dithermes

a) Rendement

La définition générale d'un rendement est : $\boxed{r = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie coûteuse}}}$ (r>0)

Pour un moteur, c'est le travail fourni par le système au milieu extérieur (W<0) qui correspond à l'énergie utile. L'énergie thermique reçue par le système de la part de la source chaude ($Q_1 > 0$ - combustion d'un carburant par exemple -) constitue l'énergie coûteuse.

Ainsi le rendement d'un moteur thermique vérifie : $\boxed{r = -\frac{W}{Q_1}}$

Il est plus pratique de disposer d'une expression avec des données connues comme les températures.

A l'aide du premier principe : $W = -(Q_1 + Q_2)$ soit $r = \frac{Q_1+Q_2}{Q_1} = 1 + \frac{Q_2}{Q_1}$. Avec le second principe pour un cycle irréversible (inégalité de Clausius) : $\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} \leq 0$ soit $\frac{Q_2}{T_2} \leq -\frac{Q_1}{T_1}$ d'où $\frac{Q_2}{Q_1} \leq -\frac{T_2}{T_1}$ car $Q_1 > 0$.

Par conséquent $\boxed{\boldsymbol{r \leq 1 - \frac{T_2}{T_1}}}$ **(r<1)**

Remarque : Pour avoir le rendement le plus élevé possible, il faut des températures les plus éloignées possibles ($\frac{T_2}{T_1} \ll 1$).

b)Théorème de Carnot

Si le cycle est **réversible** (égalité de Clausius) alors $\boxed{\boldsymbol{r_{rév} = 1 - \frac{T_2}{T_1}}}$. Ce rendement, appelé **rendement de Carnot**, est le rendement maximal que puisse atteindre un moteur cyclique ditherme : $\boxed{\boldsymbol{r \leq r_{rév} = 1 - \frac{T_2}{T_1}}}$.

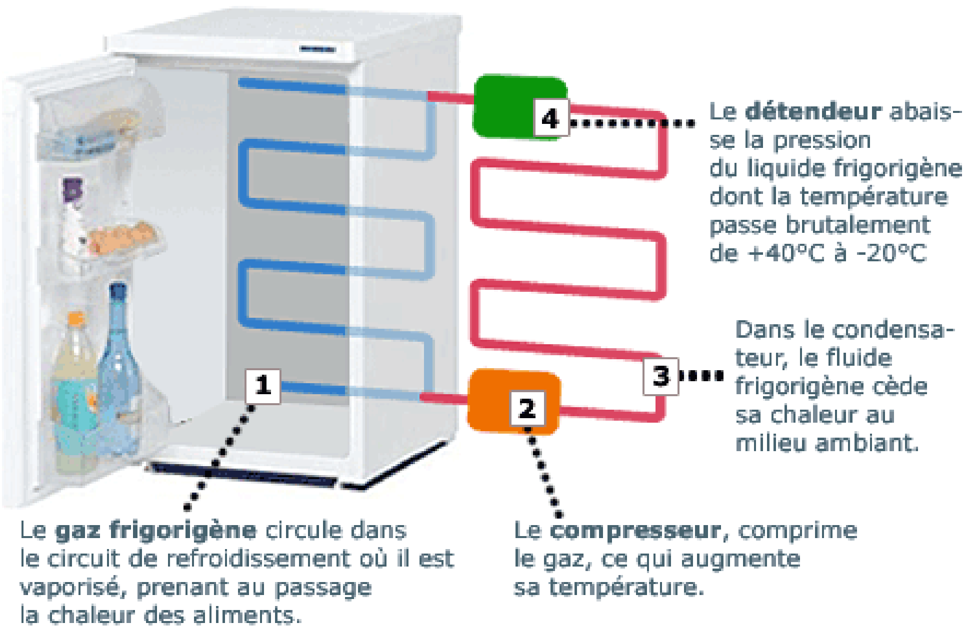
4) Récepteurs dithermes

Remarque : En ce qui concerne les récepteurs, on ne parle plus de rendement mais d'efficacité car le résultat trouvé peut être supérieur à 1.

a) Machine frigorifique

Pour une machine frigorifique (réfrigérateur, climatiseur...), l'énergie utile est la chaleur prise à la source froide (intérieur du frigo par exemple : $Q_2 > 0$) et l'énergie coûteuse est le travail (sous forme électrique par exemple : W>0) qui fait fonctionner la machine.

Exemple de fonctionnement d'un réfrigérateur



L'efficacité d'une machine frigorifique vérifie : $\boxed{e = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie coûteuse}} = \frac{Q_2}{W}}$

Comme pour les moteurs thermiques, il est plus commode d'exprimer l'efficacité en fonction des températures. A l'aide du premier principe $e = -\frac{Q_2}{Q_1+Q_2} = -\frac{1}{\frac{Q_1}{Q_2}+1}$ et d'après le second principe pour un cycle irréversible : $\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} \leq 0$ soit $\frac{Q_1}{T_1} \leq -\frac{Q_2}{T_2}$ d'où $\frac{Q_1}{Q_2} \leq -\frac{T_1}{T_2}$ car $Q_2 > 0$. Ainsi $1 + \frac{Q_1}{Q_2} \leq 1 - \frac{T_1}{T_2}$ d'où $\frac{1}{1+\frac{Q_1}{Q_2}} \geq \frac{1}{1-\frac{T_1}{T_2}}$ et $-\frac{1}{1+\frac{Q_1}{Q_2}} \leq \frac{1}{\frac{T_1}{T_2}-1}$

Par conséquent $\boxed{e \leq \frac{1}{\frac{T_1}{T_2}-1} = \frac{T_2}{T_1-T_2}}$

Remarques :

- Pour avoir l'efficacité le plus élevée possible, il faut des températures les plus proches possibles ($T_2 \sim T_1$).
- De plus, comme pour les moteurs thermiques, l'efficacité d'un récepteur thermique est maximale si le cycle est réversible soit $\boxed{e \leq e_{rév} = \frac{T_2}{T_1-T_2}}$

b) Pompe à chaleur

Pour une pompe à chaleur, l'énergie utile est la chaleur donnée à la source chaude (pièce à chauffer par exemple : $Q_1 < 0$) et l'énergie coûteuse est le travail (sous forme électrique par exemple : W>0) qui fait fonctionner la machine.

L'efficacité d'une pompe à chaleur vérifie : $\boxed{e = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie coûteuse}} = -\frac{Q_1}{W}}$

Comme pour les moteurs thermiques, il est plus commode d'exprimer l'efficacité en fonction des températures. A l'aide du premier principe $e = \frac{Q_1}{Q_1+Q_2} = \frac{1}{1+\frac{Q_2}{Q_1}}$ et d'après le second principe pour un cycle irréversible $\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} \leq 0$ soit $\frac{Q_2}{T_2} \leq -\frac{Q_1}{T_1}$ d'où $\frac{Q_2}{Q_1} \geq -\frac{T_2}{T_1}$ car $Q_1 < 0$. Ainsi $1 + \frac{Q_2}{Q_1} \geq 1 - \frac{T_2}{T_1}$ d'où $\frac{1}{1+\frac{Q_2}{Q_1}} \leq \frac{1}{1-\frac{T_2}{T_1}}$

Par conséquent $\boxed{e \leq \frac{1}{1-\frac{T_2}{T_1}} = \frac{T_1}{T_1-T_2}}$ **(e>1)**

Remarques : *identiques à machine frigorifique*

IV. Exemples de machines thermiques : le moteur à explosion

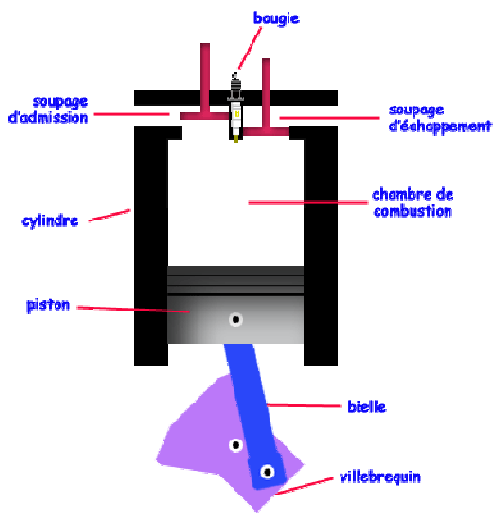
L'objectif de cette partie est de présenter une machine réelle et la modélisation de ses évolutions.

1) Le système réel

Le moteur à explosion est conçu pour transformer une énergie thermique (provenant de la combustion interne d'un carburant) en énergie mécanique d'abord linéaire (bielle) puis rotative (vilebrequin).

Le moteur est composé d'un ou plusieurs cylindres (cf. figure ci-contre). Chaque cylindre comprend un piston mobile lié à un système bielle-vilebrequin et deux soupapes, l'une d'admission (aspiration du mélange air-carburant) et l'autre d'échappement (évacuation du mélange après combustion).

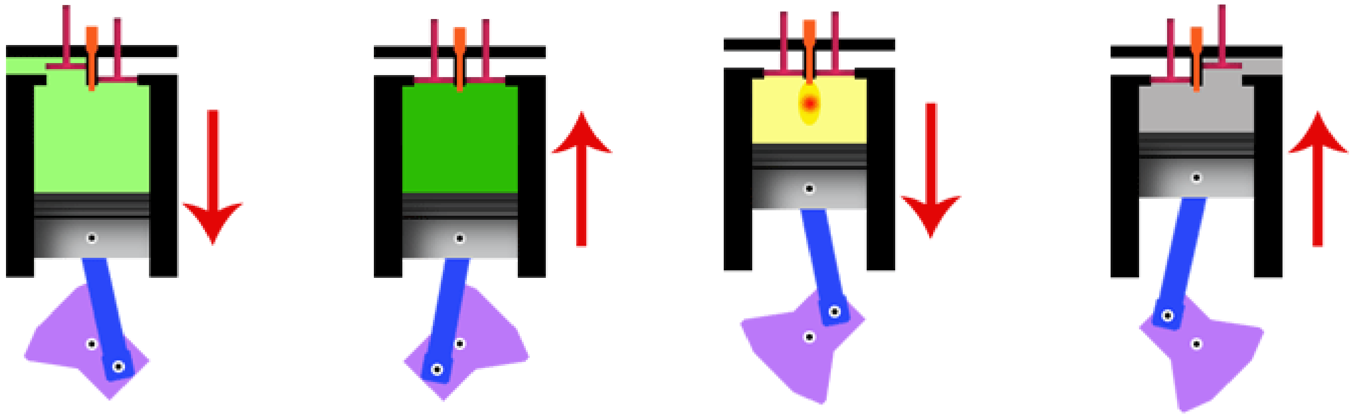
Ces moteurs, qu'ils soient à deux temps (scooter, tondeuse…) ou à quatre temps (moteur de voiture), sont dits « à explosion » car il est nécessaire de produire une étincelle à l'aide d'une bougie pour provoquer l'inflammation du mélange air-carburant (contrairement au moteur diesel).



<u>On va décrire le cycle à quatre temps d'un moteur à explosion</u>.

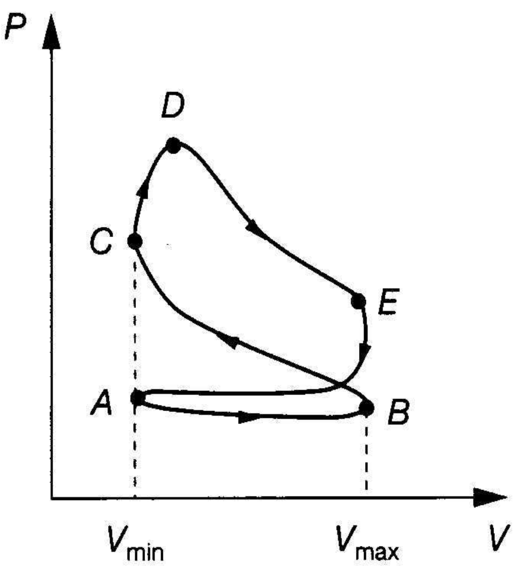
- *Voici un schéma illustrant le principe des 4 temps du moteur à explosion :*

<u>Temps 1</u> L'admission | **<u>Temps 2</u>** La compression | **<u>Temps 3</u>** L'explosion (ou détente) | **<u>Temps 4</u>** L'échappement



<u>Remarque</u> : le piston fait deux allers-retours pour décrire un cycle. Dans un moteur de voiture, les différents cylindres fonctionnement avec un décalage de manière à ce que le piston remonte dans certains cylindres quand il descend dans d'autres.

- *Le cycle réel du moteur à explosion est représenté dans le diagramme de Watt (ou de Clapeyron) ci-dessous (pression dans le cylindre en fonction du volume du cylindre) :*



- **<u>1er temps</u> : Admission AB.** La soupape d'admission s'ouvre et le piston descend, aspirant le mélange air-carburant. La quantité $V_{max} - V_{min}$ représente la cylindrée du moteur.
- **<u>2ème temps</u> : Compression BC.** Le piston remonte, les deux soupapes étant fermées, comprimant le mélange air-carburant.
- **<u>3ème temps</u> :**

- **Combustion CD.** Les deux soupapes fermées, la bougie émet une étincelle provoquant l'explosion du mélange air-carburant (le volume varie très peu et la pression devient maximale).
- **Détente DE.** La pression fournie par l'explosion permet de faire redescendre le piston jusqu'à V_{max}.

- **<u>4ème temps</u> : Echappement EA.** La soupape d'échappement s'ouvre et le piston remonte jusqu'à V_{min} évacuant les gaz brulés que l'on retrouve à la sortie du pot d'échappement.

<u>Remarque</u> : Différences entre moteurs à 4 temps et moteurs à 2 temps.

Les quatre phases, réparties sur deux tours dans un moteur à quatre temps, ne sont plus réparties que sur un tour dans le moteur à deux temps. Le diagramme de Watt est semblable à celui du quatre temps sans la partie horizontale (AB) : l'admission et l'échappement se font spontanément.

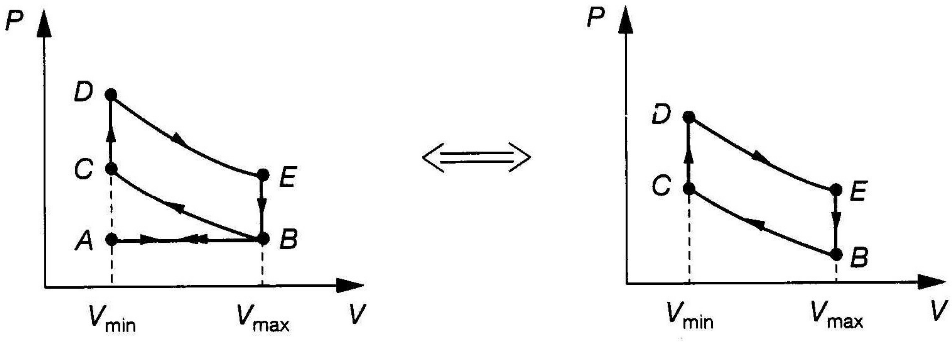
- <u>1er temps</u> (BCD) : Compression du mélange air-carburant (BC) puis combustion (CD).
- <u>2ème temps</u> (DEB) : Détente (DE) puis échappement et admission d'un nouveau mélange air-carburant (EB).

2) Modélisation : cycle Beau de Rochas

L'étude thermodynamique du moteur à explosion se fait grâce aux approximations suivantes :

- Le fluide initial (air-carburant) ou final (air-gaz de combustion) est assimilé à un même gaz parfait de quantité constante (n moles). Cela est presque vrai car l'air est en large excès et constitué à 80% de diazote qui ne réagit quasiment pas.
- On considère que le fluide ne subit aucune évolution chimique et que l'énergie thermique qu'il reçoit provient d'une source chaude fictive extérieure lors de l'isochore CD.
- Afin de raisonner sur un système fermé et d'éviter les étapes d'admission et d'échappement, on suppose que l'échappement EA passe par B et que les étapes AB et BA se compensent.

Le nouveau diagramme modélisé du moteur à quatre temps correspond alors au **cycle dit de Beau de Rochas constitué de deux isochores et de deux isentropiques** :



Modélisation   *Étude*

---

3) Rendement

On souhaite exprimer le rendement du moteur à explosion modélisé par le cycle de Beau de Rochas en fonction du taux de compression $\alpha = \frac{V_{max}}{V_{min}}$.

...Voir feuille.