

CHAPITRE E : MACHINES THERMIQUES

La fonction d'une machine thermique est de **transformer** chaleur en travail mécanique (moteur), ou travail en chaleur (chauffage, réfrigérateur, pompe à chaleur, ...).

Objectifs : utiliser les notions de thermodynamiques introduites aux chapitres précédents pour comprendre le fonctionnement et les limitations des machines thermiques. Une ouverture sur la problématique de la transformation et la gestion des énergies dans la société sera proposée.

I – Transformations cycliques

Dans une machine thermique, un fluide subit des transformations cycliques, appelées aussi **cycles**. En d'autres termes, les paramètres du fluide sont les mêmes à l'état final et à l'état initial du cycle. Sur le cycle, les variations d'entropie et d'énergie interne du fluide vérifient alors:

$$\Delta U = 0 \text{ et } \Delta S = 0$$

car U et S sont des fonctions d'états.

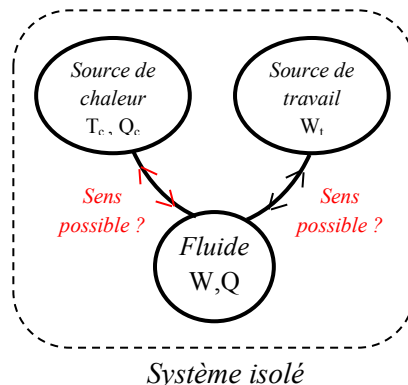
Au cours du cycle, le fluide échange néanmoins de la chaleur Q et du travail W avec les sources en contact avec lui. Le 1^{er} principe appliqué à un cycle du fluide s'écrit $W+Q=0$. Ainsi, on aura toujours $W = -Q$ pour un fluide qui subit un cycle.

Pour plus de simplicité, on raisonnera ensuite avec des thermostats plutôt que des sources de chaleur.

II – Cycles monothermes (où le fluide échange avec **un seul** thermostat)

Quel type de machine peut-on réaliser avec un cycle monotherme du fluide ?

- pour un **moteur**, le fluide fournit un travail ($W < 0$) à l'utilisateur, qui est la source de travail
- pour un **réfrigérateur**, le fluide prélève de la chaleur ($Q > 0$) à l'utilisateur, la source froide
- pour un **chauffage**, le fluide fournit ($Q < 0$) de la chaleur à l'utilisateur, la source chaude



Le fluide n'échange de la chaleur qu'avec la source de chaleur :
du travail qu'avec la source de travail :

$$\begin{aligned} Q_c &= -Q \\ W_t &= -W \end{aligned}$$

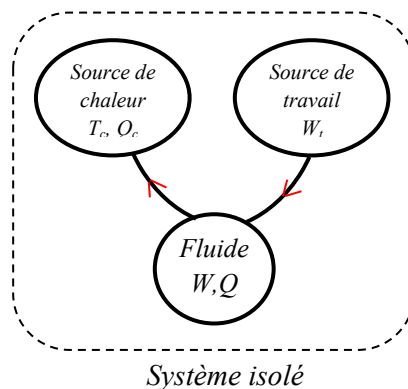
Le premier principe seul est insuffisant pour décrire le fonctionnement des machines thermiques, c'est le **second principe** qui va fixer leurs possibilités et leurs limitations.

Bilan entropique sur le système isolé: $\Delta S_{\text{isolé}} = \Delta S + \Delta S_t + \Delta S_c$
 or $\Delta S=0$ pour le fluide sur un cycle et $\Delta S_t=0$ pour une source de travail
 Ainsi $\Delta S_{\text{isolé}} = \Delta S_c = Q_c/T_c = -Q/T_c$

Avec un cycle monotherme, il est donc **impossible de réaliser un réfrigérateur** : $Q_c < 0$ impose $Q > 0$ dans un réfrigérateur, ce qui donnerait $\Delta S_{\text{isolé}} < 0$! Il est également impossible de réaliser **un moteur** ($W = -Q < 0 \Rightarrow Q > 0$ cela donnerait $\Delta S_{\text{isolé}} < 0$ aussi !)

Ce résultat est un des énoncés historiques du 2nd principe : « un cycle monotherme ne peut être moteur », Lord Kelvin, 1852.

Conclusion : un cycle monotherme n'est pas intéressant en pratique puisqu'il permet seulement de réaliser une machine chauffante qui transforme du travail mécanique en chaleur : $W > 0$ et $Q < 0$ selon le schéma ci-dessous :

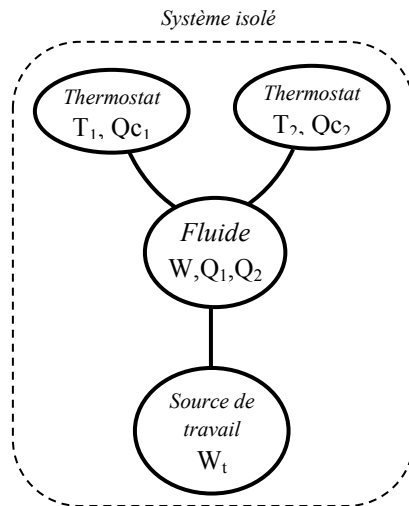


Pour réaliser un cycle moteur ($W < 0$) ou réfrigérateur ($Q > 0$), le fluide devra échanger avec au moins 2 sources de chaleur (cycle au moins **ditherme**).

II – Cycles dithermes (où le fluide échange avec **deux** thermostats)

1- Bilans énergétique et entropique :

De la même façon que précédemment, on se pose la question : dans quel sens peuvent se faire les échanges lorsque le fluide effectue une transformation cyclique ?



On définit du point de vue du fluide :

Q_1 la quantité de chaleur échangée avec le thermostat à la température T_1 : $Q_1 = -Q_{c1}$

Q_2 la quantité de chaleur échangée avec le thermostat à la température T_2 : $Q_2 = -Q_{c2}$

W le travail échangé avec la source de travail : $W = -W_t$

→ Le 1^{er} principe sur un cycle du fluide : $W + Q_1 + Q_2 = 0 \Rightarrow \boxed{Q_1 + Q_2 = -W}$

→ Le 2nd principe pour le système isolé : $\Delta S_{\text{isolé}} = \cancel{\Delta S} + \cancel{\Delta S_t} + \Delta S_{c1} + \Delta S_{c2} = \frac{Q_{c1}}{T_1} + \frac{Q_{c2}}{T_2} = -\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2}$

$$\Delta S_{\text{isolé}} \geq 0 \Rightarrow \boxed{\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} \leq 0}$$

(démonstrations à connaître)

2- Cycle moteur et son rendement :

a- sens des échanges

Si on veut que l'utilisateur (la source de travail) gagne de l'énergie mécanique, il faut que le fluide en perde. Cela signifie que $W < 0$ pour un fluide décrivant un cycle moteur.

Or $Q_1 + Q_2 = -W \Rightarrow Q_1 + Q_2 > 0$ (1)

On a aussi établi que $\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} \leq 0$ (2)

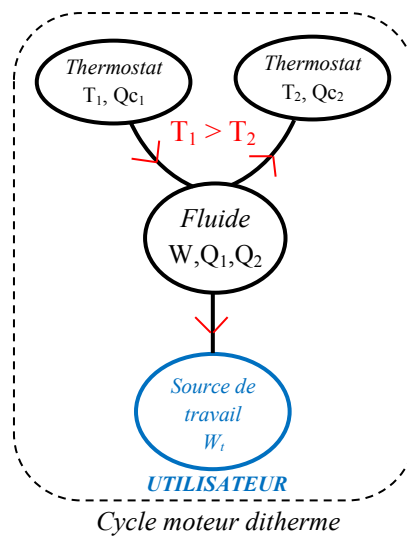
Pour que ces deux inégalités se réalisent simultanément, il est nécessaire que Q_1 soit du **signe opposé** à Q_2 . Faisons l'hypothèse que $Q_1 > 0$ et $Q_2 < 0$, ce qui s'écrit $Q_1 = |Q_1|$ et $Q_2 = -|Q_2|$.

Les inégalités (1) et (2) deviennent :

$$\begin{cases} |Q_1| - |Q_2| > 0 \\ \frac{|Q_1|}{T_1} - \frac{|Q_2|}{T_2} \leq 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{|Q_2|}{|Q_1|} < 1 \\ \frac{|Q_2|}{|Q_1|} \geq \frac{T_2}{T_1} \end{cases} \Rightarrow 1 > \frac{|Q_2|}{|Q_1|} \geq \frac{T_2}{T_1}$$

Ceci montre que $T_1 > T_2$ lorsqu'on suppose $Q_1 > 0$ et $Q_2 < 0$. Autrement dit,

Pour qu'un cycle ditherme soit moteur ($W < 0$), le fluide doit prélever de la chaleur ($Q_1 > 0$) à la source chaude ($T_1 > T_2$) et en restituer à la source froide ($Q_2 < 0$).



b- rendement du cycle moteur ditherme : théorème de Carnot

On définit de façon générale un rendement énergétique $r = \frac{|\text{énergie utile}|}{|\text{énergie fournie}|}$.

C'est une grandeur positive, comprise entre 0 et 1, qu'on exprime souvent en %.

Pour un moteur ditherme, $r = \frac{W_t}{Q_1} = \frac{-W}{Q_1} = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} = 1 + \frac{Q_2}{Q_1}$

→ cas d'un cycle réversible (= dans le 2nd principe) : $\left| \frac{Q_2}{Q_1} \right| = \frac{-Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow r_{\text{rev}} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$

On retient ce résultat sous la forme $r_{\text{rev. dith.}} = 1 - \frac{T_F}{T_C}$

où T_F est la température de la source froide et T_C , celle de la source chaude.

→ cas d'un cycle irréversible (> dans le 2nd principe) : $\frac{-Q_2}{Q_1} > \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow r_{\text{irrev}} < 1 - \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow r_{\text{irrev.}} < r_{\text{rév.}}$

Théorème de Carnot : le rendement d'un moteur **ditherme** est maximum si le cycle est effectué de manière réversible. Il vaut alors :

$$r_{\text{rev. dith.}} = 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

où T_F et T_C sont respectivement les températures des sources froides et chaudes.

Commentaires :

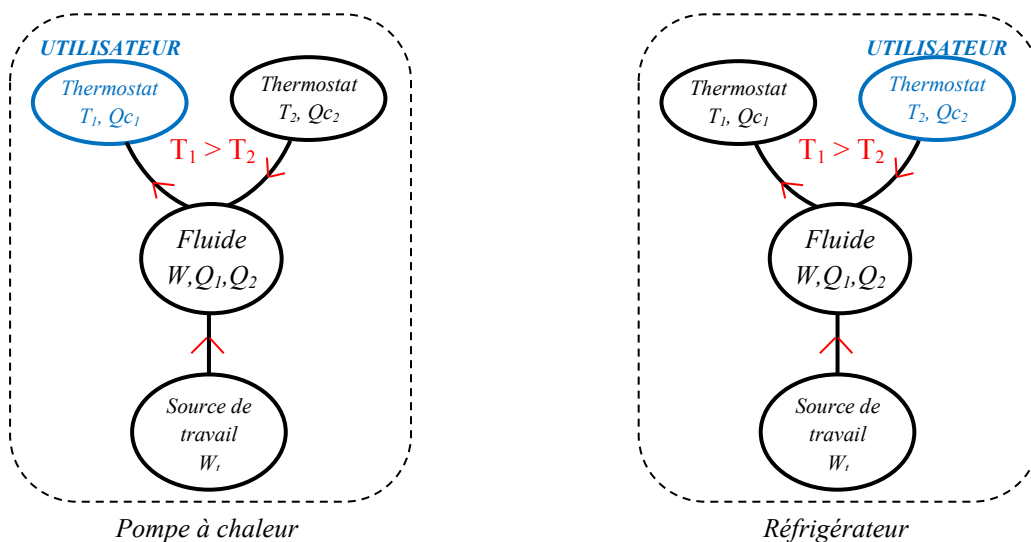
- C'est historiquement le premier énoncé du second principe par Sadi Carnot en 1824.
- Plus l'écart de température entre la source chaude et la source froide est important, meilleur est le rendement du moteur.
- En général une des deux sources est l'atmosphère à environ 300K. La température de la source chaude est limitée en pratique par la résistance des matériaux aux hautes températures. Le rendement d'un moteur réversible sera donc bien inférieur à 100 % (ex : $T_C = 900\text{K}$, $T_F = 300\text{K}$ donne $r = 70\%$).
- Les cycles réels seront répétés à haute cadence, de façon irréversible : $r \ll 70\%$

3- Réfrigérateur et pompes à chaleur : efficacités

Pour les mêmes sources de chaleur ($T_1 > T_2$), si on fournit au gaz un travail $W > 0$ (avec un moteur électrique par exemple), il est possible d'inverser le sens des échanges de chaleur (non démontré ici, c.f. diagramme de Raveau): le fluide prélève alors de la chaleur à la source froide ($Q_2 > 0$) pour en donner à la source chaude ($Q_1 < 0$).

→ Si l'utilisation est de chauffer la source chaude, on parlera de **pompe à chaleur** (dans ce cas, de la chaleur est effectivement « pompée » à la source froide grâce au travail fourni).

→ Si l'utilisation est de refroidir la source froide, on parlera de **réfrigérateur**, ou de climatiseur.



Ces machines thermiques sont caractérisées par leur efficacité énergétique

$$e = \frac{|\text{énergie utile}|}{|\text{énergie fournie}|}$$

C'est la même définition que le rendement, mais on l'appelle efficacité car on peut avoir $e > 1$ (et c'est l'intérêt !).

→ Efficacité d'un réfrigérateur : $e = \frac{Q_2}{W} = -\frac{Q_2}{Q_1+Q_2} = -\frac{1}{1+Q_1/Q_2}$

(source chaude = atmosphère de la cuisine)

(source froide = aliments dans le frigo)

Si le cycle est réversible $\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$, alors $\frac{Q_1}{Q_2} = -\frac{T_1}{T_2}$, et l'efficacité vaut $e_{\text{rev}} = \frac{T_2}{T_1-T_2}$

On retiendra avec les notations usuelles, l'efficacité du réfrigérateur réversible : $e_{\text{rev}} = \frac{T_F}{T_C-T_F}$

→ Efficacité d'une pompe à chaleur : $e = \frac{-Q_1}{W} = \frac{Q_1}{Q_1+Q_2} = \frac{1}{1+Q_2/Q_1}$

(source froide = extérieur de la maison)

(source chaude = intérieur de la maison)

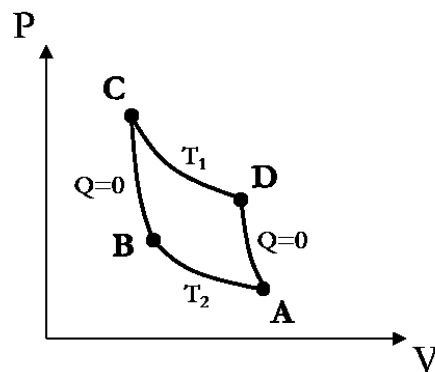
Si le cycle est réversible $\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$, alors $\frac{Q_2}{Q_1} = -\frac{T_2}{T_1}$, d'où l'efficacité $e_{\text{rev}} = \frac{T_1}{T_1-T_2}$

On retiendra avec les notations usuelles, l'efficacité de la pompe à chaleur réversible : $e_{\text{rev}} = \frac{T_C}{T_C-T_F}$

Comme pour les moteurs, l'efficacité des pompes à chaleur ou réfrigérateurs **dithermes** est maximum pour les cycles réversibles : $e_{\text{irrev.}} < e_{\text{rev.}}$

III – Etudes de cycles particuliers

1- Cas d'école : le cycle de Carnot réversible = 2 isothermes + 2 adiabatiques (c.f. TD)



Comptabilisons les sources de chaleur utilisées au cours de ce cycle :

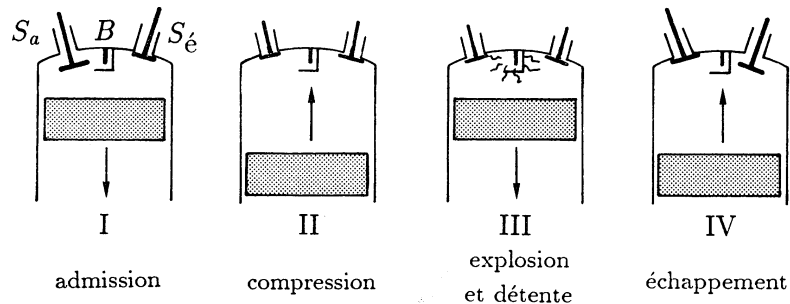
- pour les parties de cycles BC et DA adiabatiques : pas besoin de thermostat
- isotherme : AB échange avec un thermostat à la température T_1
CD échange avec un thermostat à la température $T_2 < T_1$

Conclusion : au cours de ce cycle, le fluide échange avec 2 thermostats, c'est bien un cycle dithérme.

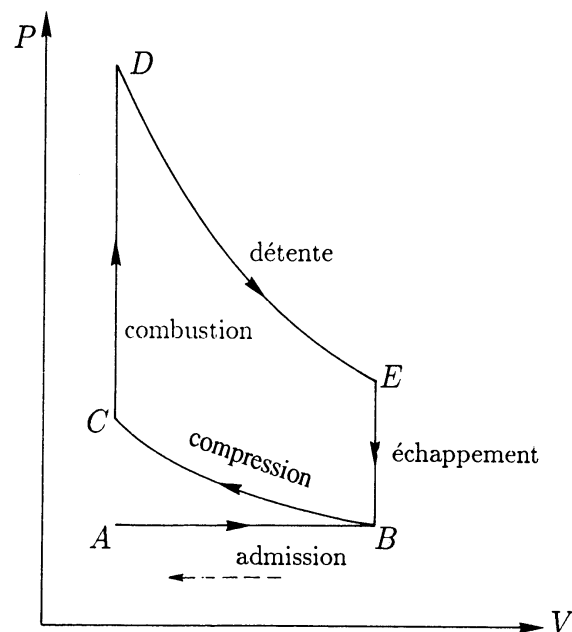
Si le cycle est effectué dans le sens ABCDA, $W < 0$, il est moteur.

Si le cycle est effectué dans le sens ADCBA, $W > 0$ il réalise une pompe à chaleur, ou un réfrigérateur.

2- Moteur 4 temps à explosion (essence): concept Beau de Rochas (1862), réalisation Otto (1876)



$\begin{cases} S_a & = \text{soupape d'admission} \\ S_e & = \text{soupape d'échappement} \end{cases}$
 B bougie



Le cycle est décrit par la modélisation suivante :

1^{er} temps : AB : admission du mélange air-essence. En B, la soupape d'admission se ferme.

2^e temps : BC : compression rapide, qu'on modélise par une adiabatique (les échanges thermiques n'ont pas le temps de se faire à la cadence élevée du moteur). L'explosion CD provoquée par l'étincelle de la bougie est supposée instantanée. Elle réalise un chauffage supposé isochore.

3^e temps : détente DE rapide => adiabatique. C'est le **temps moteur** du cycle.

4^e temps : EB : le gaz se refroidit à T_{ext} à $V=\text{cst}$ au contact de l'air atmosphérique pendant l'échappement.

En toute rigueur, le système est ouvert à l'admission AB et lors de l'échappement EBA. Néanmoins on peut raisonner sur le système fermé du cycle BCDEB. La combustion est considérée comme un apport de chaleur.

→ Calcul du rendement du cycle 4T réversible:

Le rendement réversible s'écrit $r_{4T \text{ rév.}} = -\frac{W}{Q_{CD}}$ et d'après le premier principe $W + Q_{EB} + Q_{CD} = 0$,

$$D'où $r_{4T \text{ rév.}} = \frac{Q_{EB} + Q_{CD}}{Q_{CD}} = 1 + \frac{Q_{EB}}{Q_{CD}}.$$$

Lors des transformations EB et CD qui sont isochores, les chaleurs échangées s'expriment simplement avec la capacité calorifique molaire à volume constant c_v comme :

$$Q_{EB} = n c_v (T_B - T_E)$$

$$Q_{CD} = n c_v (T_D - T_C)$$

On déduit alors que $r_{4T \text{ rév.}} = 1 + \frac{T_B - T_E}{T_D - T_C}$, le rapport des températures restant à évaluer.

Pour les transformations adiabatiques réversibles BC et DE, la loi de Laplace s'écrit $PV^\gamma = \text{cst}$ ou sous la forme équivalente $TV^{\gamma-1} = \text{cst}$. En sachant que $V_C = V_D = V_A$ et $V_B = V_E$ et en introduisant le **taux de compression** $\alpha = \frac{V_B}{V_A} = \frac{V_E}{V_D} = \frac{V_B}{V_C}$, cela donne :

$$\text{pour la transformation BC : } T_B V_B^{\gamma-1} = T_C V_C^{\gamma-1} \Rightarrow T_C = T_B \left(\frac{V_B}{V_C}\right)^{\gamma-1} \Rightarrow T_C = T_B \alpha^{\gamma-1}$$

$$\text{pour la transformation DE : } T_D V_D^{\gamma-1} = T_E V_E^{\gamma-1} \Rightarrow T_D = T_E \left(\frac{V_E}{V_D}\right)^{\gamma-1} \Rightarrow T_D = T_E \alpha^{\gamma-1}$$

On en déduit que $T_D - T_C = \alpha^{\gamma-1} (T_E - T_B)$ et le rendement du cycle 4T réversible s'écrit finalement :

$$\boxed{r_{4T \text{ rév.}} = 1 - \frac{1}{\alpha^{\gamma-1}}}$$

→ Applications numériques et discussion:

Pour avoir le meilleur rendement, on cherche donc à obtenir un taux de compression α maximum. Dans un moteur à essence, on ne peut augmenter α sans risquer une explosion spontanée du mélange air-essence, phénomènes non-contrôlés appelés aussi auto-allumage. C'est pourquoi le pétrole est raffiné, pour obtenir des supercarburants qui supportent la compression (essence à haut indice d'octane C_8H_{18}) sans s'enflammer avant l'allumage de la bougie.

Typiquement pour du super, $\alpha \approx 10$ et en prenant $\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{7/2}{5/2} = 1,4$ pour un gaz parfait bi-atomique, on trouve $r_{4T \text{ rév.}} = 60\%$.

Commentaire 1 : Le rendement réversible du moteur 4T est différent du rendement de Carnot du cycle ditherme réversible étudié au §II qu'on pourrait être tenté d'estimer à 75 % avec une source froide à 300K (température ambiante) et une source chaude à 1220K (température typique du gaz après

explosion). Cependant, le théorème de Carnot ne s'applique pas ici puisque le cycle 4T n'est pas ditherme : en effet, on vient de voir que T_B , T_C , T_D , T_E sont différentes. Pour réaliser la transformation isochore CD de façon réversible, une infinité de thermostats est nécessaire.

Commentaire 2 : la modélisation proposée ici du moteur à essence à 4 temps est optimiste. En particulier un moteur fonctionne en pratique à grande cadence, d'une manière peu réversible. Le gaz travaille à haute pression, si bien que le modèle du gaz parfait ne s'applique plus,... Les rendements mesurés dans l'automobile ou dans les centrales électriques sont en réalité bien plus faibles. On retiendra que $r \approx 30\%$ en pratique.

Le rendement de conversion chaleur \rightarrow énergie mécanique est faible en pratique : typiquement 30 %.

Les machines thermiques sont présentes dans notre quotidien pour la transformation chaleur \rightarrow énergie mécanique (voitures, transports,...) ou électrique (centrales électriques,...). Le bilan thermodynamique montre que leur rendement est faible dans les conditions atmosphériques. 70 % de la chaleur utilisée sert à chauffer la source froide : l'atmosphère ou la rivière.

Commentaire 3 : La fabrication d'un moteur nécessite une ingénierie complexe avec différentes technologies: synchronisation de l'ouverture/fermeture des soupapes, allumage de la bougie au bon moment du cycle, résistance des matériaux aux hautes températures et hautes pressions, ...

Pour permettre l'étape de compression, on associe en général plusieurs cylindres dont les cycles sont déphasés. Il faut aussi un démarreur pour amorcer le cycle, ...

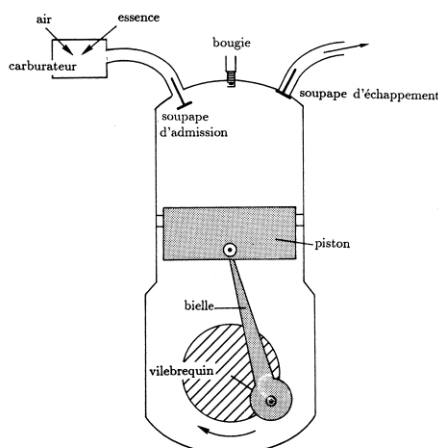
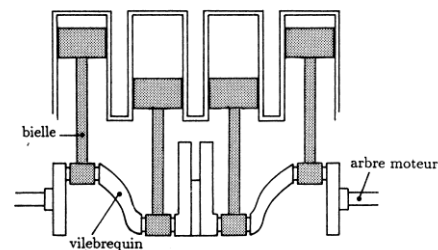


Schéma de principe d'un cylindre de moteur à explosion : le vilebrequin transforme le mouvement rectiligne d'aller et retour du piston en mouvement circulaire de l'arbre moteur



Moteur à explosion à 4 cylindres

Commentaire 4 : Les moteurs diesel ont un meilleur rendement, car ils fonctionnent à des taux de compression plus élevés que les moteurs à essence. Ces forts taux de compression sont atteints en comprimant l'air seul. Le carburant est introduit seulement en fin de compression à l'aide d'injecteurs et il explose alors spontanément (pas de bougies, pas de carburateur). Le carburant ne nécessite pas de raffinement et est donc moins cher. Cependant, le rejet des produits de combustion du moteur diesel pose plus de problèmes que le moteur à essence.

SAVOIR

- *Variation énergie interne et entropie pour une transformation cyclique*
- *Schéma du système isolé pour un cycle ditherme : cas du moteur, réfrigérateur, pompe à chaleur. Qui est l'utilisateur ?*
- *Théorème de Carnot : expression du rendement du moteur ditherme réversible.*
- *Rendement et efficacité*

SAVOIR-FAIRE

- *Signe du travail et des quantités de chaleurs échangées par le fluide dans un cycle moteur, ou réfrigérateur/pompe à chaleur*
- *Faire le bilan de la variation d'entropie du système isolé en le décomposant en sous-systèmes*
- *Redémontrer l'expression du rendement d'un moteur ditherme (théorème de Carnot)*
- *Redémontrer les expressions de l'efficacité du réfrigérateur et de la pompe à chaleur dans le cas d'un cycle ditherme.*
- *Evaluer le nombre de sources de chaleurs impliquées dans un cas concret de cycle ABCDA.*
- *Evaluer le rendement/efficacité d'un cycle dans un cas concret (ex : ABCDA).*