I GÉNÉRALITÉS SUR LES MACHINES THERMIQUES

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux *machines thermiques*. Ce sont des dispositifs qui permettent de convertir de l'énergie thermique en énergie mécanique (moteurs) ; ou bien, à l'aide de travail, de provoquer des transferts thermiques (pompes à chaleur, machines frigorifiques). Les machines thermiques sont présentes dans de nombreux processus industriels et dans la vie quotidienne (moteurs de voiture notamment).

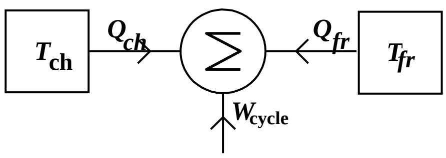
Dans le chapitre précédent, nous avons vu que le moteur monotherme n'existe pas. La plus simple façon de concevoir un moteur thermique est donc d'utiliser un fluide qui effectue des cycles au contact de *deux thermostats*, une source dite chaude et une source froide. L'objet de ce chapitre est donc l'étude théorique des machines thermiques *dithermes*.

I.1) Le fluide effectue un cycle

On étudiera dans ce chapitre les machines thermiques dont le fonctionnement repose sur les échanges énergétiques d'un *système fermé* avec le milieu extérieur ; c'est-à-dire un système dont la quantité de matière ne varie pas. Le système considéré est un fluide effectuant des *cycles*. A l'issue de chaque cycle, le bilan en travail est positif (récepteur) ou négatif (moteur). Grâce au fonctionnement cyclique, il s'établit un régime permanent au cours duquel la machine échange du travail de manière continue avec le milieu extérieur.

I.2) Le second principe appliqué au moteur

D'après l'énoncé de Kelvin, le fluide doit échanger de la chaleur avec au moins *deux* sources de chaleur pour pouvoir fournir du travail au milieu extérieur : nous étudierons les *machines dithermes*.
Le système fermé noté Σ évolue de manière cyclique. Il échange successivement de la chaleur avec une source chaude (température T_{ch}) et une source froide (température T_{fr}). On a donc $T_{ch} > T_{fr}$.
On représente souvent le fonctionnement d'une machine thermique par un diagramme du type de celui ci-contre.
Rappelons la signification du sens des flèches : si Q_{ch} est *positif*, la flèche indique que le transfert thermique s'effectue de la source chaude vers le système Σ : l'énergie de Σ augmente.



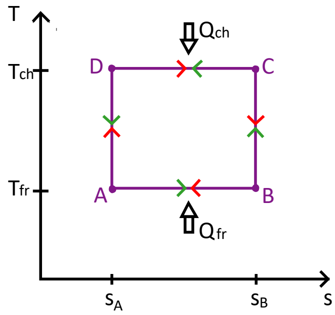
II MACHINE DITHERME IDÉALE : LA MACHINE DE CARNOT

Recherchons la machine thermique idéale. L'exercice de TD Gaz parfait dans un cylindre qui n'est pas calorifugé a montré que l'énergie fournie au système est utilisée de manière plus efficace si le transfert s'effectue de manière réversible : le déplacement du piston est alors plus important. *La machine idéale est fondée sur un cycle réversible*.

Les transferts thermiques s'effectuent lors des contacts système Σ / thermostat. Ils sont spontanés (et donc irréversibles) si Σ et le thermostat sont à des températures différentes. Les transformations devant toutes être réversibles, on en déduit :

- Les transferts thermiques s'effectuent au contact des thermostats, au cours de *transformations isothermes*, tour à tour aux températures T_{ch} et T_{fr}.
- Les autres transformations constituant le cycle sont *adiabatiques*.

Cycle de Carnot dans le diagramme entropique :
Deux isentropiques (adiabatiques réversibles) : B↔C et D↔A.
Deux isothermes : A↔B et C↔D.

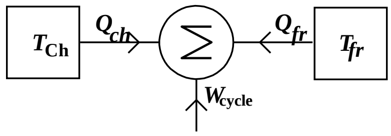


Une machine ditherme idéale fonctionne selon le cycle de Carnot. C'est un cycle réversible. Il est constitué de deux isothermes reliées par deux isentropiques.

Cycle de Carnot dans le diagramme de Clapeyron ***uniquement pour un gaz parfait***
Deux isentropiques : B↔C et D↔A.
Deux isothermes : A↔B et C↔D.

Rappel : dans un diagramme (P,V), les isentropiques sont plus inclinées que les isothermes pour un gaz parfait.

III ÉTUDE DE LA MACHINE DE CARNOT



Le système fermé (masse *m* de fluide) subit une suite de transformations cycliques.
Au cours du cycle :

- Il est successivement au contact d'une source chaude, puis d'une source froide.
  Il s'effectue alors des transferts thermiques Q_{ch} et Q_{fr}.
  Q_{ch} (respectivement Q_{fr}) est le transfert thermique de la source chaude (respectivement froide) vers le système au cours d'un cycle.
- Il échange du travail W_{cycle} avec le milieu extérieur.

III.1) Bilan d'énergie et bilan entropique

Soient *U, S, W, Q* les grandeurs relatives au système de masse *m*. Appliquons les principes de la thermodynamique :

III.2)Classification des machines thermiques

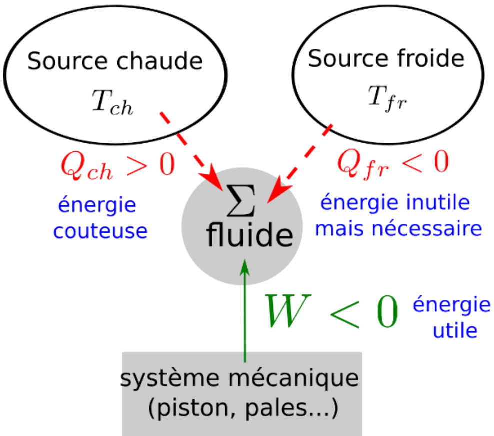
Les machines thermiques usuelles sont les moteurs d'une part, les machines frigorifiques et pompes à chaleur d'autre part.
Les *moteurs* produisent du travail utilisé pour faire tourner des pièces mécaniques (pistons, pales d'hélice…). Les autres en consomment ; ce sont des *récepteurs thermiques*.
L'analyse des transferts thermiques va nous permettre de comprendre concrètement le fonctionnement de ces systèmes.

- Les moteurs :
  Par définition le transfert mécanique cyclique s'effectue du système Σ vers le milieu extérieur : $W_{cycle} < 0$.

Sens des transferts thermiques :

D'où le principe de fonctionnement des moteurs :

> Un moteur produit du travail. Au cours du cycle, le fluide prélève de la chaleur à la source chaude ($Q_{ch} > 0$), en convertit une partie en travail ($W_{cycle} < 0$), et il rejette le reste à la source froide ($Q_{fr} < 0$).



Cycle d'un moteur de Carnot dans le diagramme (T,S) *:*

Au paragraphe II, il a été montré que le cycle de Carnot est rectangulaire. Déterminons le sens de parcours.

> Le cycle moteur dans le diagramme (T,S) est décrit dans le sens horaire (voir paragraphe II page 1).

- Récepteurs :

Par définition le transfert mécanique cyclique s'effectue du milieu extérieur vers le système Σ : $W_{cycle} > 0$.

Sens des transferts thermiques :

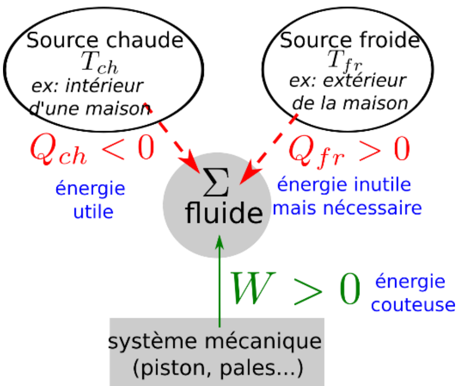
Les équations **E1**, **E2**, **E3** sont identiques. Il suffit donc de changer les signes : $W_{cycle} > 0$; $Q_{fr} > 0$; $Q_{ch} < 0$.
D'où le fonctionnement des récepteurs thermiques.

> Grâce au travail reçu par le fluide ($W_{cycle} > 0$), celui-ci prélève de la chaleur à la source froide ($Q_{fr} > 0$), et en rejette à la source chaude ($Q_{ch} < 0$).
> Le cycle récepteur est décrit dans le sens trigonométrique (voir diagramme (T,S) au paragraphe II).

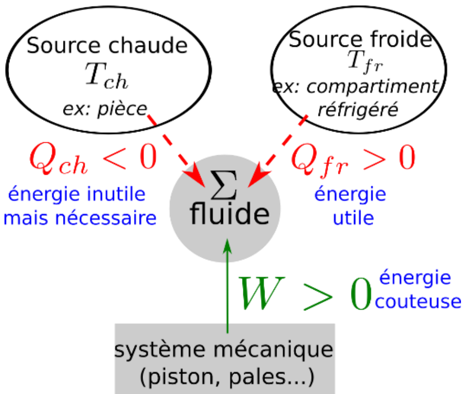
Un récepteur permet donc *d'inverser le sens naturel des transferts thermiques*.

En pratique, on utilise deux types de récepteur, le cycle décrit pouvant être identique, mais le but de chaque dispositif est différent :

la pompe à chaleur : Le fluide cède de la chaleur à la source chaude. Une pompe à chaleur est une installation de chauffage ; la zone chauffée (intérieur de la maison) est la source chaude.



la machine frigorifique : Le fluide prélève de la chaleur à la source froide ; la zone réfrigérée (compartiment du réfrigérateur) est la source froide.



IV ÉTUDE GÉNÉRALE DES MACHINES THERMIQUES

IV.1) Inégalité de Carnot-Clausius

Pour une machine réelle, le cycle décrit par le gaz présente des irréversibilités :

Bilan d'énergie : $W_{\text{cycle}} + Q_{fr} + Q_{ch} = 0$ **(E4)**

Bilan d'entropie : $\frac{Q_{fr}}{T_{fr}} + \frac{Q_{ch}}{T_{ch}} + (S^{cr})_{cycle} = 0$ **(E5)**

D'où l'*inégalité de Carnot-Clausius* : $\boxed{\frac{Q_{fr}}{T_{fr}} + \frac{Q_{ch}}{T_{ch}} \leq 0}$ *à savoir démontrer*

IV.2) Efficacité d'un moteur ditherme

L'efficacité d'une machine thermique compare, de manière très concrète, l'énergie utile réellement obtenue, à l'énergie réellement dépensée pour atteindre ce but : $e = \left|\frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie coûteuse}}\right|$

Dans le cas d'un moteur (voir schéma page 3), l'énergie utile est le travail W_{cycle} (transmis aux pièces mécaniques), l'énergie coûteuse est l'énergie prélevée à la source chaude Q_{ch} (énergie thermique libérée par la combustion d'un combustible par exemple).

Efficacité d'un moteur : $\boxed{\rho = \frac{|W|_{cycle}}{Q_{ch}}}$ *à savoir démontrer*

Seule, une partie de Q_{ch} est convertie en travail. L'efficacité d'un moteur s'identifie donc à un rendement (inférieur à 100%).

$$\boxed{\rho = 1 - \frac{T_{fr}}{T_{ch}} - \frac{T_{fr}S^{cr}_{cycle}}{Q_{ch}}}$$

La valeur maximale de l'efficacité d'un moteur ditherme est obtenue pour un moteur fonctionnant de façon *réversible* $\left(S^{cr}_{cycle} = 0\right)$, donc pour un moteur de Carnot.

Efficacité d'un moteur de Carnot (le fluide effectue un cycle de Carnot) : $\boxed{\rho_{max} = 1 - \frac{T_{fr}}{T_{ch}}}$. *à savoir démontrer*

On en déduit le théorème suivant :

Théorème de Carnot : **L'efficacité d'une machine de Carnot est l'efficacité maximale d'une machine ditherme fonctionnant entre deux sources de chaleur données T_{fr} et T_{ch}.**
Cette efficacité maximale ne dépend que des températures des sources T_{fr} et T_{ch}.

Remarques :

- L'efficacité maximale ne dépend pas de la nature du fluide.
- L'efficacité maximale est d'autant plus grande que la source froide est froide et la source chaude est chaude.
- Un rendement de 100% n'est pas envisageable, *même pour un moteur idéal*.
- En pratique les rendements des moteurs thermiques réels sont très faibles (moins de 40%) et très inférieurs aux rendements théoriques en raison des pertes thermiques, des frottements …

IV.3) Efficacité d'une machine frigorifique

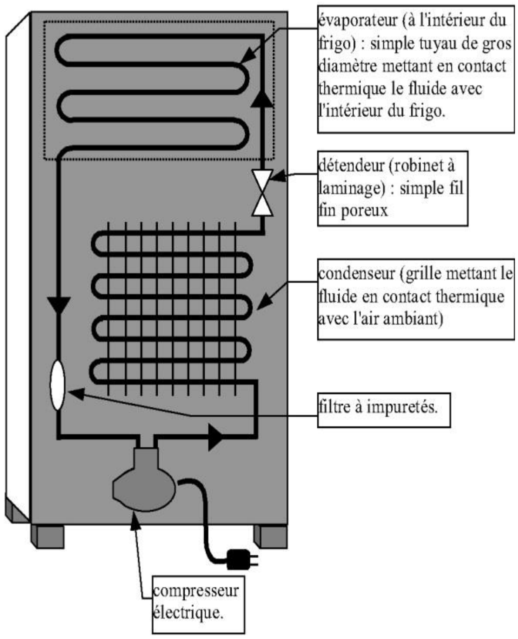
Concrètement un réfrigérateur est muni d'un compresseur qui absorbe de l'énergie électrique, et d'un serpentin dont la partie à l'intérieur du réfrigérateur (évaporateur) provoque le refroidissement. C'est grâce à l'énergie fournie au fluide par le compresseur que celui-ci peut prélever de la chaleur à la source froide.
L'énergie utile dans une machine frigorifique est l'énergie prélevée à la source froide Q_f, l'énergie coûteuse est le travail W_{cycle}.

Efficacité frigorifique : $\boxed{e_f = \frac{Q_{fr}}{W_{cycle}}}$ *à savoir démontrer*

Efficacité d'une machine frigorifique de Carnot :

$$\boxed{(e_f)_{max} = \frac{T_{fr}}{T_{ch}-T_{fr}}}$$ *à savoir démontrer*

En effet, d'après le premier principe, on a $e_f = \frac{Q_{fr}}{-Q_{fr}-Q_{ch}} = \frac{1}{-1-\frac{Q_{ch}}{Q_{fr}}}$ et d'après le second principe, $\frac{Q_{fr}}{T_{fr}} + \frac{Q_{ch}}{T_{ch}} = 0$ et donc $\frac{Q_{ch}}{Q_{fr}} = -\frac{T_{ch}}{T_{fr}}$.
Ce qui donne la valeur annoncée de l'efficacité frigorifique maximale.

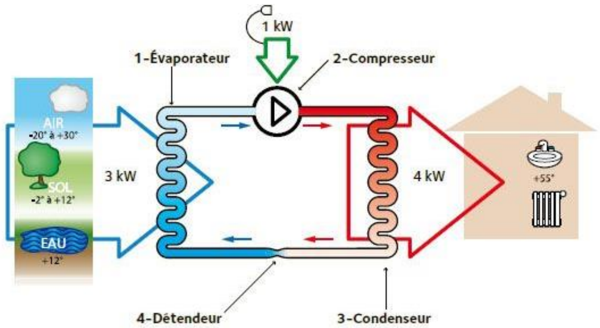


En pratique l'efficacité des machines frigorifiques est entre 3 et 5 selon la destination de l'installation. e_f est supérieure à 100%. *Ce n'est donc pas un rendement*.

IV.4) Efficacité d'une pompe à chaleur

Une pompe à chaleur fonctionne exactement comme une machine frigorifique : grâce au compresseur, de la chaleur est prélevée à la source froide, et de la chaleur est cédée à la source chaude. L'unique différence est qu'une pompe à chaleur est optimisée pour le chauffage de la source chaude alors qu'une machine frigorifique est optimisée pour le refroidissement de la source froide.

Efficacité thermique : $\boxed{e_T = \frac{|Q_{ch}|}{W_{cycle}}}$ *à savoir démontrer*



Efficacité d'une pompe à chaleur de Carnot (même technique de calcul) :

$$\boxed{(e_T)_{max} = \frac{T_{ch}}{T_{ch}-T_{fr}}}$$ *à savoir démontrer*

En pratique l'efficacité des pompes à chaleur est de l'ordre de 4.

Comparaison des performances de deux installations de chauffage :

- Chauffage électrique : Toute l'énergie électrique est convertie en énergie thermique (effet Joule) → e_T = 100% (= 1).
- Pompe à chaleur : e_T = 4 → L'énergie thermique obtenue est 4 fois plus importante que l'énergie coûteuse.

Il est donc quatre fois plus efficace d'utiliser l'énergie électrique pour alimenter le compresseur d'une pompe à chaleur, plutôt que de la dissiper dans un radiateur électrique.

V EXEMPLES DE MOTEUR

V.1) Cycle de Beau de Rochas

Dans la pratique, on ne fabrique pas de moteur de Carnot. En effet, les transformations isothermes nécessitent qu'on laisse le temps (très long !) aux transferts thermiques de s'effectuer complètement. Les moteurs de Carnot sont donc à rendement maximal (le pourcentage d'énergie convertie en énergie motrice est maximal) mais à puissance très faible (très peu d'énergie motrice produite chaque seconde).
Dans la vie réelle, il faut donc trouver un compromis entre rendement élevé et puissance élevée.
C'est pourquoi on utilise des cycles irréversibles : Beau de Rochas, Diesel, notamment.

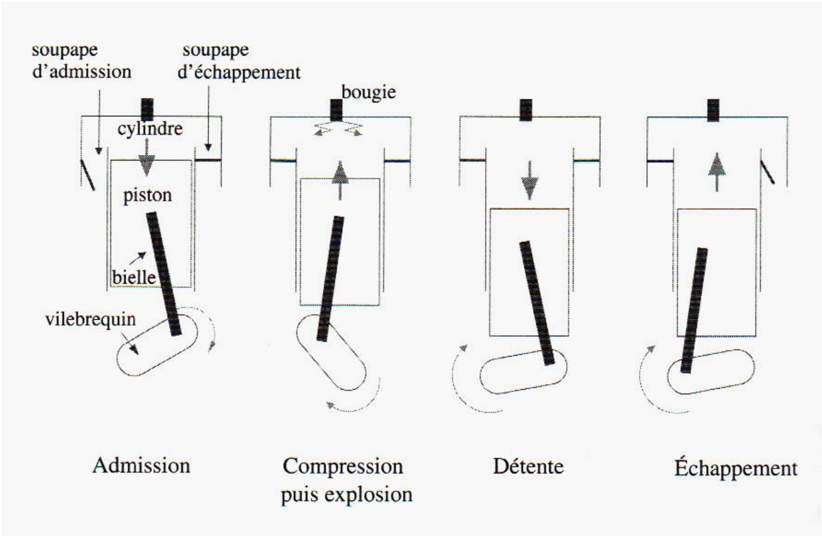
Le cycle de Beau de Rochas (1862) est celui du moteur à essence à quatre temps, il fut fabriqué en 1876 par l'ingénieur Otto (fondateur de Deutz AG). C'est un moteur à combustion interne, aussi appelé *moteur à explosion* car il est nécessaire de produire une étincelle entre les électrodes d'une bougie pour provoquer l'inflammation du mélange air-carburant.

V.1.a Description du fonctionnement

Les quatre temps : admission, compression, combustion-détente, échappement

Un seul temps est moteur : la détente. Les trois autres temps consomment du travail.
Le temps moteur se produit tous les deux tours. Le piston effectue donc deux allers et retours pour décrire un cycle.

De manière à éviter les à-coups, on couple quatre cylindres décalés d'un temps les uns par rapport aux autres : Ainsi, à chaque instant, l'un des cylindres produit du travail.



Source : Physique, MPSI, Dunod

V.1.b Le cycle théorique

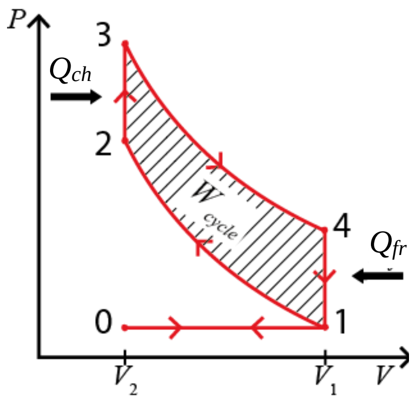
Admission 0→1 : le piston descend en aspirant le mélange air – essence. Il est admis de façon isobare à la pression atmosphérique jusqu'au volume maximum V_1. La proportion d'essence dans le mélange étant très faible, celui-ci est assimilable à de l'air pur modélisé en gaz parfait de rapport isentropique $\gamma = 1{,}4$.

Compression adiabatique réversible 1→2*:* Le piston remonte et comprime adiabatiquement le gaz jusqu'en 2. En 2 une étincelle est produite entre les électrodes de la bougie, provoquant la combustion.

Combustion 2→3*:* Elle se produit au point haut du piston. De très courte durée, le piston n'a pas le temps de se déplacer. Il s'agit donc d'un échauffement isochore.

Détente adiabatique réversible 3→4 *:* Les gaz brûlés **chauds et comprimés** repoussent le piston. C'est le **temps moteur.**

Echappement 4→1→0 *:* Il débute quand le piston est au point bas. A l'ouverture de la soupape, la pression chute brutalement jusqu'à la pression atmosphérique : phase isochore (4→1*)*; puis le piston remonte et chasse les gaz brûlés : phase isobare (1→0*)*.



V.1.c Calcul du rendement théorique

Identification des transferts d'énergie

- Comme deux transformations sont adiabatiques, les transferts thermiques s'effectuent pendant les transformations isochores :

  De 2 à 3 : échauffement isochore $Q_{23} = Q_{ch} > 0$

  De 4 à 1 : refroidissement isochore au contact de l'atmosphère : $Q_{41} = Q_{fr}$

  Le cycle est décrit dans le sens horaire : le cycle est donc bien *moteur*.
- De plus : $W_{cycle} = W_{01} + W_{12} + W_{23} + W_{34} + W_{41} + W_{10}$; or $W_{01} = -W_{10}$ et $W_{23} = W_{41} = 0$; d'où $W_{cycle} = W_{12} + W_{34}$.

  W_{cycle} est égal à l'opposé de l'aire du cycle hachuré.

Remarques :

- La masse *m* de gaz emprisonné dans le cylindre subit tour à tour les quatre transformations du cycle. Même si le gaz est renouvelé après chaque cycle, tout se passe comme si un système fermé de masse *m* décrivait un cycle.
- Le travail mécanique produit est égal au travail des forces de pression.

Rendement théorique :

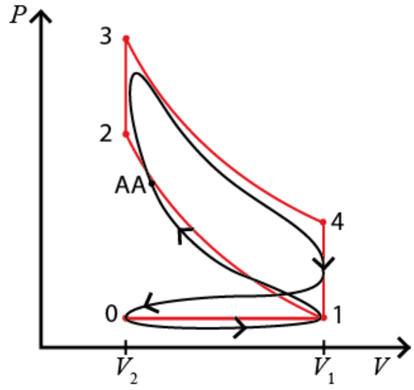
Commentaires :

- Le rendement est très mauvais. La moitié de l'essence brûlée ne produit que de la chaleur qui se dissipe dans l'atmosphère.
- Le rendement est d'autant plus élevé que le taux de compression est élevé. Il est en pratique de 6 à 9.
- Ce qui limite le taux de compression est le phénomène de combustion spontanée : à haute pression, le mélange air-essence s'enflamme spontanément, ce qui engendre des contraintes mécaniques destructrices pour le moteur, qui se manifestent par des cognements secs et métalliques dans le cylindre.

V.1.d Etude du cycle réel

Commentaires :

- L'admission crée une dépression.
- L'étincelle à la bougie se produit avant que le piston n'atteigne le point haut, de manière à prendre en compte la durée de la combustion. C'est l'avance à l'allumage AA.
- Le temps d'échappement est le plus rebelle à la modélisation. La pression décroît progressivement pendant toute la phase, et non à volume constant, ce qui se traduit par une boucle décrite dans le sens trigonométrique, donc consommatrice de travail : Le rendement s'en trouve sensiblement diminué.
  Dans la pratique, en prenant en compte le rendement thermodynamique, mais aussi les rendements mécaniques, le rendement global est inférieur à 40%.



V.2) Cycle de Diesel

Ce moteur fut mis au point en 1893 par l'ingénieur allemand Rudolf Diesel, quelques années seulement après le moteur d'Otto – Beau de Rochas (1876). Ce moteur à combustion interne se différencie du moteur de Beau de Rochas par l'absence de bougies d'allumage : Grâce à un taux de compression volumétrique supérieur à 14, le mélange air – carburant s'enflamme spontanément au moment de l'injection.

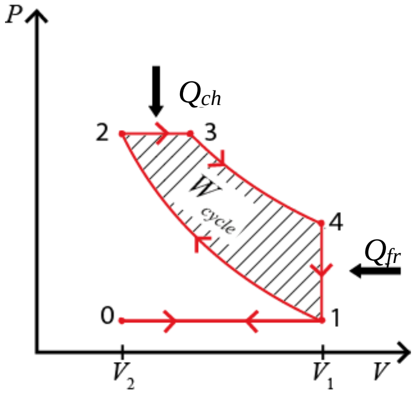
L'avantage du moteur Diesel réside dans un rendement plus élevé que celui d'un moteur à essence ; sans parler de la moindre taxation du gazole, qui ne résulte que de choix politiques.

Les inconvénients sont de deux ordres :

- A puissance égale, un moteur Diesel est plus lourd qu'un moteur à essence, ce qui limite ses performances en vitesse, et en fait un moteur plutôt adapté aux grosses machines (camions, navires, machines industrielles).
- Les moteurs Diesel contribuent fortement à la pollution de l'air par les transports, car ils émettent des particules cancérigènes.

V.2.a Le cycle théorique

Seul le temps de combustion diffère de celui du cycle de Beau de Rochas. La combustion s'effectue *pendant* l'injection du gazole, ce qui justifie qu'elle soit isobare.



V.2.b Calcul du rendement théorique

Exprimons ce rendement en fonction des *taux de compression* $a = \frac{V_1}{V_2}$ et $b = \frac{V_1}{V_3}$.

D'après **E7** : $\rho = 1 + \frac{Q_{fr}}{Q_{ch}}$.

4→1 isochore : $Q_{fr} = mc_v(T_1 - T_4)$ *2→3* isobare : $Q_{ch} = mc_p(T_3 - T_2)$

d'où $\frac{Q_{fr}}{Q_{ch}} = \frac{1}{\gamma}\frac{T_1 - T_4}{T_3 - T_2}$ **(E9)**.

Des relations de Laplace pour *1→2 et 3→4*, et sachant que $V_1 = V_4$, on déduit : $\begin{cases} T_1 = T_2\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1} = T_2.a^{1-\gamma} \\ T_4 = T_3\left(\frac{V_3}{V_1}\right)^{\gamma-1} = T_3.b^{1-\gamma} \end{cases}$

E9 devient $\frac{Q_{fr}}{Q_{ch}} = \frac{1}{\gamma}\frac{T_2.a^{1-\gamma} - T_3.b^{1-\gamma}}{T_3 - T_2} = \frac{1}{\gamma}\frac{a^{1-\gamma} - \frac{T_3}{T_2}.b^{1-\gamma}}{\frac{T_3}{T_2} - 1}$ **(E10)**

De la loi des gaz parfaits appliquée aux états 2 et 3, et sachant que $P_2 = P_3$, on obtient : $nR = \frac{P_2V_2}{T_2} = \frac{P_3V_3}{T_3} \Leftrightarrow \frac{T_3}{T_2} = \frac{V_3}{V_2} = \frac{a}{b}$

E10 devient : $\frac{Q_{fr}}{Q_{ch}} = \frac{1}{\gamma}\frac{a^{-\gamma} - b^{-\gamma}}{b^{-1} - a^{-1}}$ et $\boxed{\rho = 1 - \frac{1}{\gamma}\frac{b^{-\gamma} - a^{-\gamma}}{b^{-1} - a^{-1}}}$

Application numérique : $\gamma = 1{,}4$; avec $a = 16$ et $b = 12$, on obtient $\rho = 1 - \frac{1}{1{,}4}\frac{12^{-1,4} - 16^{-1,4}}{12^{-1} - 16^{-1}} \approx 65\%$

Le rendement du cycle Diesel est supérieur au rendement du cycle de Beau de Rochas.