

LES MACHINES THERMIQUES

« Je préfère emprunter aux langues anciennes les noms des quantités scientifiques importantes, afin qu'ils puissent rester les mêmes dans toutes les langues vivantes; je proposerai donc d'appeler la quantité S l'entropie du corps, d'après le mot grec η τροπή une transformation. C'est à dessein que j'ai formé ce mot entropie, de manière qu'il se rapproche autant que possible du mot énergie; car ces deux quantités ont une telle analogie dans leur signification physique qu'une analogie de dénomination m'a paru utile ». (cité dans *Dictionnaire d'histoire et de philosophie des sciences* de Dominique Lecourt, PUF, 1999).

Rudolf Julius Emmanuel Clausius (Koszalin, 1822 - Bonn, 1888) est un physicien allemand connu pour ses contributions majeures à la thermodynamique.

I-POSITION DU PROBLEME : INEGALITE DE CLAUSIUS

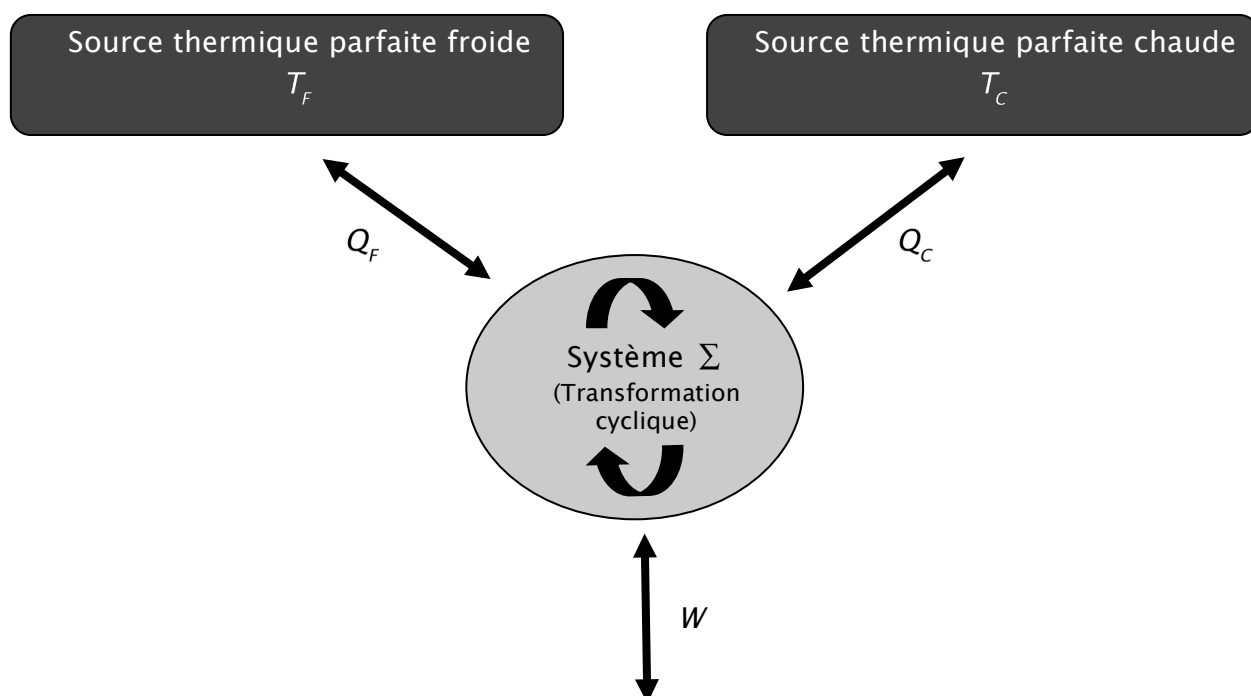
1-1 introduction

Notre société de la technologie repose sur sa capacité à utiliser les sources d'énergie. Parfois l'énergie mécanique est directement disponible (chutes d'eau, moulins à vent). Mais la plupart de l'énergie utilisée provient de la combustion des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz), ressources limitées comme nous le savons tous, et de l'énergie nucléaire. Ces énergies sont très souvent converties en énergie thermique pour chauffer les bâtiments, pour la combustion des aliments, pour les processus chimique. Mais très souvent, nous devons transformer ces énergies en énergie mécanique pour faire fonctionner nos machines, propulser nos véhicules etc...

Il est fondamental de savoir comment convertir une forme d'énergie en une autre forme et ceci de la façon la plus efficace. La conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique est au cœur du fonctionnement des machines qui font « tourner » notre société.

On appelle **machine thermique** tout dispositif capable de **convertir de l'énergie thermique en énergie mécanique** (et inversement) et subissant une **transformation cyclique**. Cela suppose que le système revient, après divers transformations, dans son état initial. Nous allons restreindre notre étude aux cas particulier mais fondamental des machines thermiques **dithermes**. Il s'agit de machines thermiques qui au cours d'un cycle vont être en contact successivement avec deux sources thermiques parfaites, une source dite froide à T_F et une source dite chaude à T_C .

1-2 L'inégalité de Clausius



Le système Σ (notre machine thermique) subit une transformation cyclique. Il reçoit au cours du cycle algébriquement Q_F (échange avec la source froide), Q_C (échange avec la source chaude) et W .

On suppose que $T_C > T_F$.

Nous allons, comme à chaque fois, appliquer le premier et le deuxième principe à Σ ce qui va nous fournir des résultats très généraux sur le fonctionnement des machines thermiques.

1^{er} principe: $\underbrace{\Delta U = 0}_{\text{car cyclique}} = W + Q_C + Q_F$

2^{ème} principe: $\underbrace{\Delta S = 0}_{\text{car cyclique}} = \underbrace{S_{\text{créée}}}_{>0} + S_{\text{échange}}$ avec $S_{\text{échange}} = \frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} < 0$

On obtient l'inégalité de Clausius :

$$\frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} < 0$$

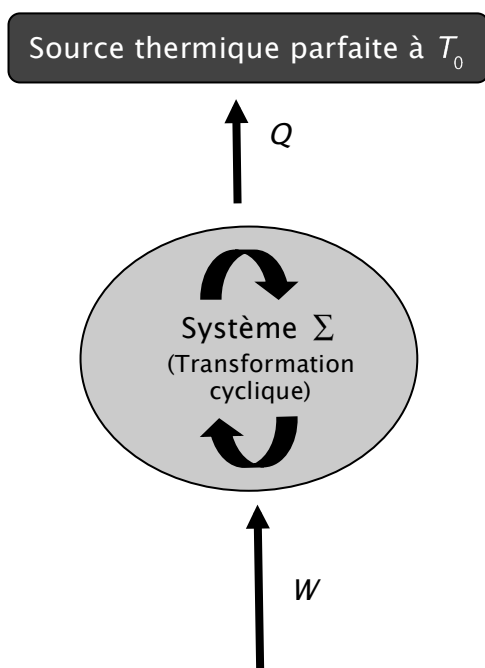
C'est sous cette forme que nous allons utiliser le second principe dans ce chapitre. $\frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} = 0$

uniquement pour le cas limite des transformations réversibles. Dans le cas particulier où $W = 0$,

$Q_C = -Q_F$ (1^{er} principe) donc $Q_C \left(\frac{1}{T_C} - \frac{1}{T_F} \right) < 0$ (2^{ème} principe). Comme $T_C > T_F$, $Q_F < 0$ et $Q_C > 0$. On

retrouve (et on justifie) l'énoncé historique de Clausius (1850) qui dit que la chaleur passe spontanément du corps chaud (qui cède de la chaleur à Σ car $Q_C > 0$) au corps froid (qui reçoit de la chaleur de Σ car $Q_F < 0$).

1-2 Cas particulier d'une machine thermique monotherme



1^{er} principe: $\underbrace{\Delta U = 0}_{\text{car cyclique}} = W + Q$

2^{ème} principe: $\underbrace{\Delta S = 0}_{\text{car cyclique}} = \underbrace{S_{\text{créée}}}_{>0} + S_{\text{échange}}$ avec $S_{\text{échange}} = \frac{Q}{T_0} < 0$

On obtient :

$$W > 0 \text{ et } Q < 0$$

On retrouve (et on justifie) l'énoncé historique de Clausius (1852) qui dit qu'il n'existe pas de machine thermique monotherme motrice. Cette machine ne peut que recevoir du travail ($W > 0$) et céder de la chaleur ($Q < 0$). Il s'agit par exemple d'un radiateur électrique.

Comme nous l'avons déjà signalé, un bateau ne peut avancer (céder du travail) en gelant la mer (en recevant de la chaleur de la mer).

II-THEOREME DE CARNOT

2-1 Le moteur ditherme $\Rightarrow W < 0$

a) Détermination du signe des transferts thermiques (chaleur échangée)

On souhaite que la machine thermique cède du travail c'est-à-dire $W < 0$. Cela va imposer des conditions sur le signe de Q_C et de Q_F que nous allons déterminer. L'exemple type de cette machine est le moteur à explosion qui sert à propulser les voitures.

1^{er} principe: $\underbrace{\Delta U = 0}_{\text{car cyclique}} = W + Q_C + Q_F$ donc $Q_F = -Q_C - W$

2^{ème} principe: $\underbrace{\Delta S = 0}_{\text{car cyclique}} = \underbrace{S_{\text{créée}}}_{>0} + S_{\text{échange}}$ avec $S_{\text{échange}} = \frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} < 0$

$$\frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} < 0 \Leftrightarrow \underbrace{\frac{-Q_C - W}{T_F}}_{>0} + \frac{Q_C}{T_C} < 0 \Leftrightarrow \underbrace{-\frac{W}{T_F}}_{>0} < \underbrace{Q_C \left(\frac{1}{T_F} - \frac{1}{T_C} \right)}_{>0} \Rightarrow Q_C > 0.$$

$$W = -Q_C - Q_F \Rightarrow \frac{Q_C + Q_F}{T_F} < Q_C \left(\frac{1}{T_F} - \frac{1}{T_C} \right) \Leftrightarrow \frac{Q_F}{T_F} < -\frac{Q_C}{T_C} \Leftrightarrow Q_F < -Q_C \frac{T_F}{T_C} < 0$$

On retiendra les résultats suivants :

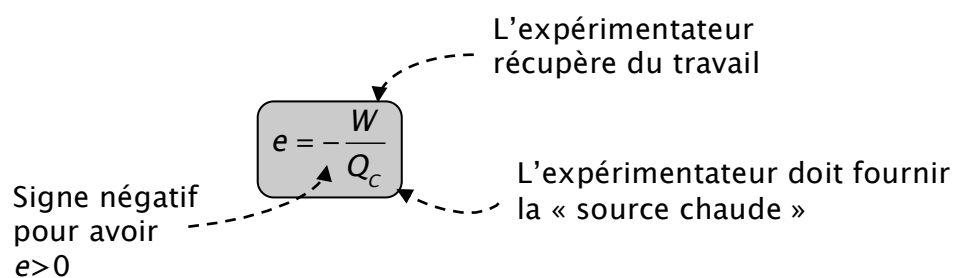
$$W < 0 \Rightarrow Q_F < 0 \text{ et } Q_C > 0$$

Pour que la machine cède du travail, elle doit recevoir de la chaleur de la source chaude et céder de la chaleur à la source froide.

Pour un moteur à explosion (nous allons en reparler plus en détail), le système Σ est l'air admis dans les cylindres par les soupapes d'admission, la source chaude est créée in situ par injection et combustion d'un carburant et la source froide est l'atmosphère ambiante.

b) L'efficacité thermodynamique

L'efficacité thermodynamique (grandeur définie toujours positive et notée e) est le rapport de ce que l'expérimentateur gagne sur ce qu'il perd. Dans le cas présent, elle vaut, par définition :



Cherchons à trouver une valeur maximale de e en fonction des seules températures des sources thermiques.

$$-W = Q_F + Q_C \Leftrightarrow \frac{-W}{Q_C} = \frac{Q_F}{Q_C} + 1 \text{ et } \frac{Q_F}{Q_C} < -\frac{T_F}{T_C} \Rightarrow \frac{-W}{Q_C} < 1 - \frac{T_F}{T_C} \text{ ce qui donne :}$$

$$e < 1 - \frac{T_F}{T_C} \text{ et } e_c = 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

L'égalité est obtenue quand la machine est réversible ce qui correspond à l'efficacité maximale théorique que l'on peut atteindre. On appelle cette efficacité l'efficacité de Carnot, physicien et ingénieur (polytechnicien) Français (1796–1832).

Sadi Carnot ne publia qu'un seul livre, *les Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* (Paris, 1824), à l'âge de 27 ans. Il ne venait pas moins que de poser les bases d'une nouvelle discipline, la thermodynamique.



Le résultat obtenu par Carnot est fondamental et d'une portée universelle. En effet, quelle que soit la technologie utilisée, on ne peut pas obtenir une efficacité plus grande que celle de Carnot. Ce résultat connu comme le **théorème de Carnot** (1824) peut être résumé ainsi :

L'efficacité d'un moteur ditherme cyclique réel est inférieure à l'efficacité de Carnot correspondant au cycle réversible. L'efficacité de Carnot est indépendante du système thermodynamique qui évolue, elle ne dépend que de la température des sources.

Par exemple si $T_F = 300 \text{ K}$ et $T_C = 1500 \text{ K}$, $e_c = 80 \%$. Il s'agit de l'efficacité maximale que l'on pourrait atteindre, autorisé par la nature. Dans la réalité, l'efficacité est seulement de 25 % environ.

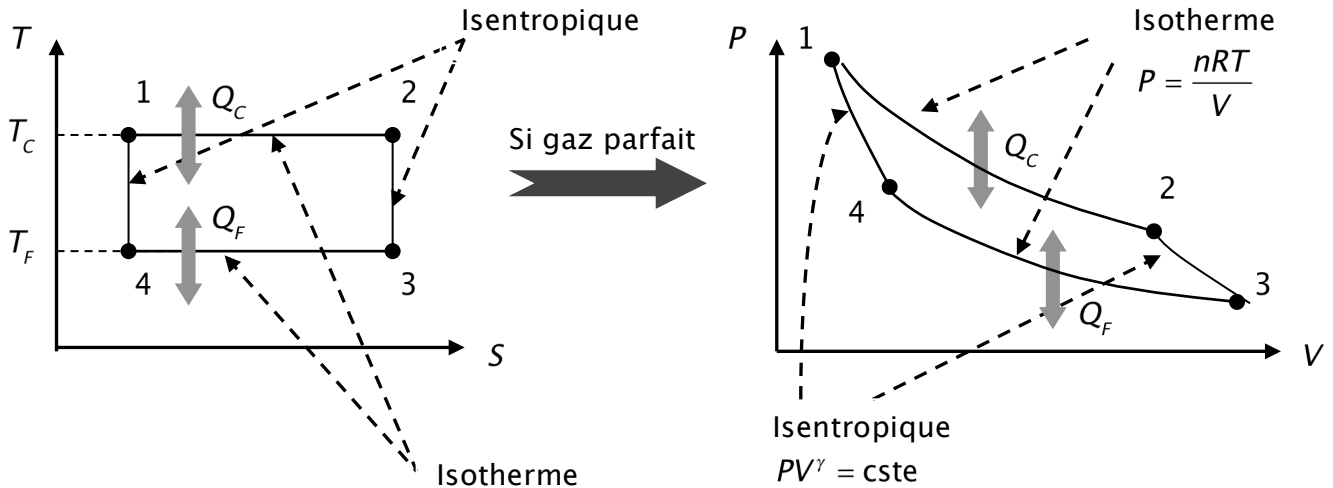
2-2 Comment obtenir un cycle réversible ? Le cycle de Carnot

$\Rightarrow$ Au cours de l'échange de Q_C entre Σ et la source chaude à T_C , l'évolution de Σ doit être **isotherme et réversible** à T_C .

⇒ Au cours de l'échange de Q_F entre Σ et la source froide à T_F , l'évolution de Σ doit être **isotherme et réversible** à T_F .

⇒ En dehors de ces échanges, le système Σ ne subit aucun n'échange thermique, l'évolution est **adiabatique et réversible** c'est-à-dire **isentropique**.

On peut traduire ces résultats sur un diagramme (T,S) et (P,V) .



Dans le diagramme (P,V) , le cycle est en réalité très plat, l'aire du cycle est faible.

$$\underbrace{\Delta U = 0}_{=0 \text{ car cycle}} = W + Q \Rightarrow W = -Q$$

$$Q_C = \int_1^2 T dS = T_C (S_2 - S_1) \text{ et } Q_F = \int_3^4 T dS = T_F (S_4 - S_3)$$

$$W = -(Q_C + Q_F) = -\underbrace{[T_C (S_2 - S_1) - T_F (S_3 - S_4)]}_{\text{aire sous la courbe}} \Rightarrow |W| = \text{aire sous la courbe}$$

Si $W < 0$, le cycle est moteur, il est décrit dans le sens horaire.

Si $W > 0$, le cycle est récepteur, il est décrit dans le sens trigonométrique.

Les aires sous les courbes, pour les deux diagrammes, sont identiques.

III-AUTRES MACHINES THERMIQUES

3-1 Le réfrigérateur ditherme $\Rightarrow Q_F > 0$

a) Détermination du signe des transferts thermiques (chaleur échangée) et du travail

On souhaite que le réfrigérateur capte de la chaleur à la source froide (le compartiment du réfrigérateur) pour que sa température reste « froide ». Cela va imposer des conditions sur le signe de Q_C et de W que nous allons déterminer.

$$\text{1er principe: } \underbrace{\Delta U = 0}_{\text{car cyclique}} = W + Q_C + Q_F \text{ donc } Q_C = -Q_F - W$$

2^{ème} principe: $\underbrace{\Delta S = 0}_{\text{car cyclique}} = \underbrace{S_{\text{créée}}}_{>0} + S_{\text{échange}}$ avec $S_{\text{échange}} = \frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} < 0$

$$\underbrace{Q_F}_{>0} \underbrace{\left(\frac{1}{T_F} - \frac{1}{T_C} \right)}_{>0} < \frac{W}{T_C} \Rightarrow W > 0. \text{ Comme } Q_C = -Q_F - W, Q_C < 0.$$

On retiendra les résultats suivants :

$$Q_F > 0 \Rightarrow Q_C < 0 \text{ et } W > 0$$

La machine reçoit du travail ce qui lui permet de recevoir de la chaleur de la source froide et de céder de la chaleur à la source chaude. On constate que la chaleur passe de la source froide à la source chaude ce qui n'est pas spontané. Cela est possible grâce au travail reçu par le système.

Dans un réfrigérateur, le système Σ est le fluide réfrigérant, la source chaude est la pièce dans laquelle se trouve le réfrigérateur et la source froide le compartiment intérieur du réfrigérateur dans lequel on entrepose les aliments.

b) L'efficacité thermodynamique

L'efficacité thermodynamique (grandeur définie toujours positive et notée e) est le rapport de ce que l'expérimentateur gagne sur ce qu'il perd. Dans le cas présent, elle vaut, par définition :

$$e = \frac{Q_F}{W}$$

Cherchons à trouver une valeur maximale de e en fonction des seules températures des sources thermiques.

$$Q_F \left(\frac{1}{T_F} - \frac{1}{T_C} \right) < \frac{W}{T_C} \Rightarrow \frac{Q_F}{W} < \frac{1}{T_C} \left(\frac{T_F T_C}{T_C - T_F} \right) \text{ ce qui donne :}$$

$$e < \frac{T_F}{T_C - T_F} \text{ et } e_c = \frac{T_F}{T_C - T_F}$$

Par exemple si $T_F = -5^\circ\text{C}$ et $T_C = 20^\circ\text{C}$ (il faut convertir en Kelvin), $e_c = 10,7 > 1$. Il ne faut pas s'étonner du fait que $e_c > 1$ car la chaleur cédée par la source froide au système est ensuite cédée par le système à la source chaude.

Le cycle de Carnot est le même que celui d'un moteur ditherme mais il est décrit à l'envers, cela a pour effet de transformer un système moteur, $W < 0$, en un système récepteur, $W > 0$.

3-2 La pompe à chaleur $\Rightarrow Q_C < 0$

a) Détermination du signe des transferts thermiques (chaleur échangée) et du travail

On souhaite que la pompe à chaleur cède de la chaleur à la source chaude (la pièce que l'on souhaite chauffer). Cela va imposer des conditions sur le signe de Q_F et de W que nous allons déterminer.

1^{er} principe: $\underbrace{\Delta U = 0}_{\text{car cyclique}} = W + Q_C + Q_F$ donc $Q_F = -Q_C - W$

2^{ème} principe: $\underbrace{\Delta S = 0}_{\text{car cyclique}} = \underbrace{S_{\text{créée}}}_{>0} + S_{\text{échange}}$ avec $S_{\text{échange}} = \frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} < 0$

$$\underbrace{-Q_C}_{>0} \underbrace{\left(\frac{1}{T_F} - \frac{1}{T_C} \right)}_{>0} < \frac{W}{T_F} \Rightarrow W > 0.$$

On conçoit la pompe à chaleur pour que $|-Q_C| > W$ donc $Q_F > 0$.

On retiendra les résultats suivants :

$$Q_C < 0 \Rightarrow Q_F > 0 \text{ et } W > 0$$

On retrouve les mêmes résultats que pour le réfrigérateur. D'un point de vue thermodynamique, il s'agit de la même machine ditherme. C'est le point de vue de l'utilisateur qui distingue la pompe à chaleur du réfrigérateur.

Dans la pompe à chaleur, le système Σ est le fluide réfrigérant, la source chaude est la pièce que l'on désire chauffer et la source froide est l'atmosphère extérieure à laquelle on prélève de l'énergie thermique de façon « gratuite » (pas pour l'environnement..).

b) L'efficacité thermodynamique

L'efficacité thermodynamique (grandeur définie toujours positive et notée e) est le rapport de ce que l'expérimentateur gagne sur ce qu'il perd. Dans le cas présent, elle vaut, par définition :

$$e = -\frac{Q_C}{W}$$

Cherchons à trouver une valeur maximale de e en fonction des seules températures des sources thermiques.

$$-Q_C \left(\frac{1}{T_F} - \frac{1}{T_C} \right) < \frac{W}{T_F} \Rightarrow \frac{-Q_C}{W} < \frac{1}{T_F} \left(\frac{T_F T_C}{T_C - T_F} \right) \text{ ce qui donne : } e < \frac{T_C}{T_C - T_F} \text{ et } e_c = \frac{T_C}{T_C - T_F}$$

Par exemple si $T_F = 5^\circ\text{C}$ et $T_C = 17^\circ\text{C}$ (il faut convertir en Kelvin), $e_c = 24,2 > 1$. Il ne faut pas s'étonner du fait que $e_c > 1$ car la chaleur reçue par la pièce à chauffer est prélevée sur l'atmosphère extérieure.

Le cycle de Carnot est le même que celui du réfrigérateur.

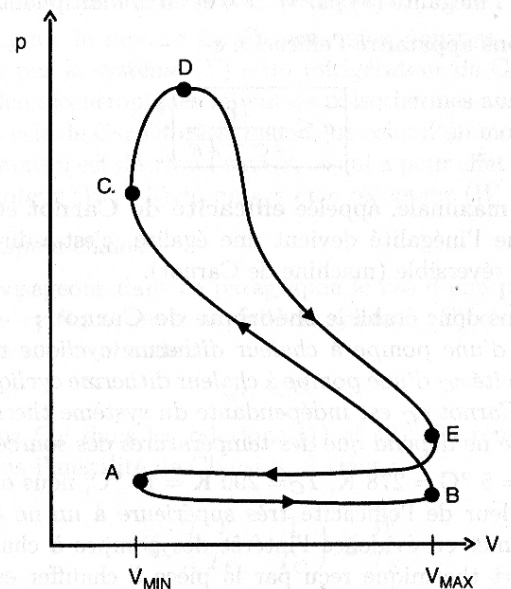
On peut comparer (de façon sommaire) l'efficacité de la pompe à chaleur à celle d'un radiateur monotherme (radiateur électrique, chauffage au fioul, au gaz...) pour chauffer un bâtiment. Pour un radiateur monotherme $Q < 0$, $W > 0$ et $0 = Q + W$. L'efficacité vaut $e = -\frac{Q}{W} = 1$. Ainsi une pompe à chaleur est environ 20 fois plus efficace qu'un radiateur monotherme. C'est donc plus économique (sauf à l'installation) et plus écologique...

VI-EXEMPLE DE MACHINES THERMIQUES : LE MOTEUR A EXPLOSION

4-1 Description du moteur à explosions (ME)

Le moteur à explosions est constitué d'un piston mobile dans un cylindre muni de soupapes d'admission et d'échappement. L'allure de son diagramme de Watt (P, V) est présenté ci-dessous. Les points A, B, C, D, E correspondent aux extrema de la pression et du volume.

On peut décomposer le cycle du ME en quatre phases successives correspondant chacune à un aller simple du piston, deux des quatre phases correspondant à un volume croissant et les deux autres à un volume décroissant, on parle couramment des **quatre temps** du ME.



1^{er} temps : Admission AB.

Le cylindre ayant son volume minimal (point A), la soupape d'admission s'ouvre, le mélange (air-carburant) entre dans le cylindre quasiment à pression atmosphérique constante et le piston se déplace jusqu'à ce que le volume du cylindre soit maximal (point B).

2^e temps : Compression BC

La soupape d'admission se ferme et le piston comprime le mélange jusqu'à ce que le volume du cylindre soit minimal (point C)

3^e temps : Explosion et détente CDE

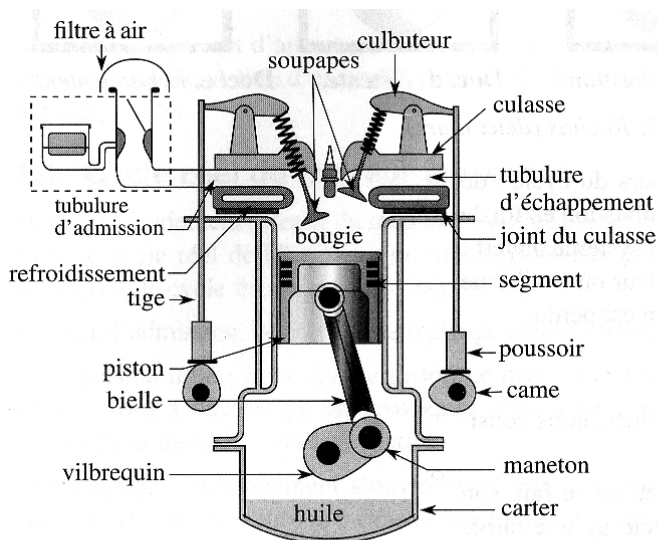
Au point C, une étincelle électrique provoque l'inflammation puis la combustion exothermique du mélange ; ceci a pour effet d'augmenter fortement la pression jusqu'à atteindre la pression

maximale (point D). Les gaz d'échappement (produits de la combustion) se détendent ensuite, le piston se déplaçant jusqu'à ce que le volume du cylindre soit maximal (point E).

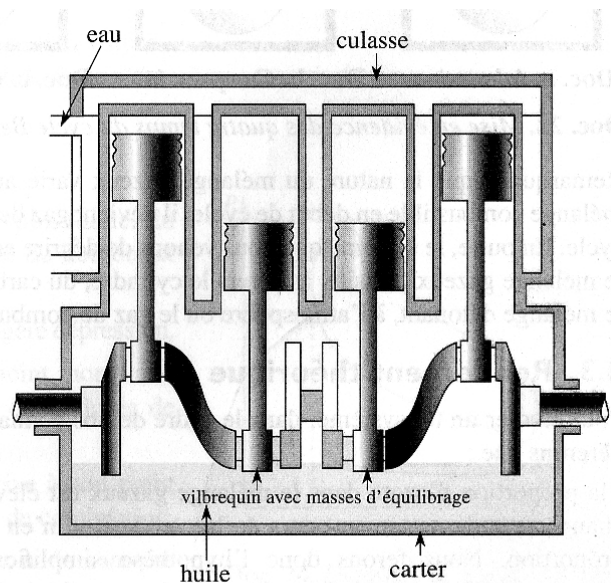
4^e temps : Echappement EA

Au point E, la soupape d'échappement s'ouvre sur l'atmosphère, l'expulsion des gaz d'échappement s'accompagne d'une baisse de la pression et du volume, jusqu'à ce que le volume du cylindre soit de nouveau minimal (point A). Alors la soupape d'échappement se ferme, la soupape d'admission s'ouvre et on est ramené au début du premier temps.

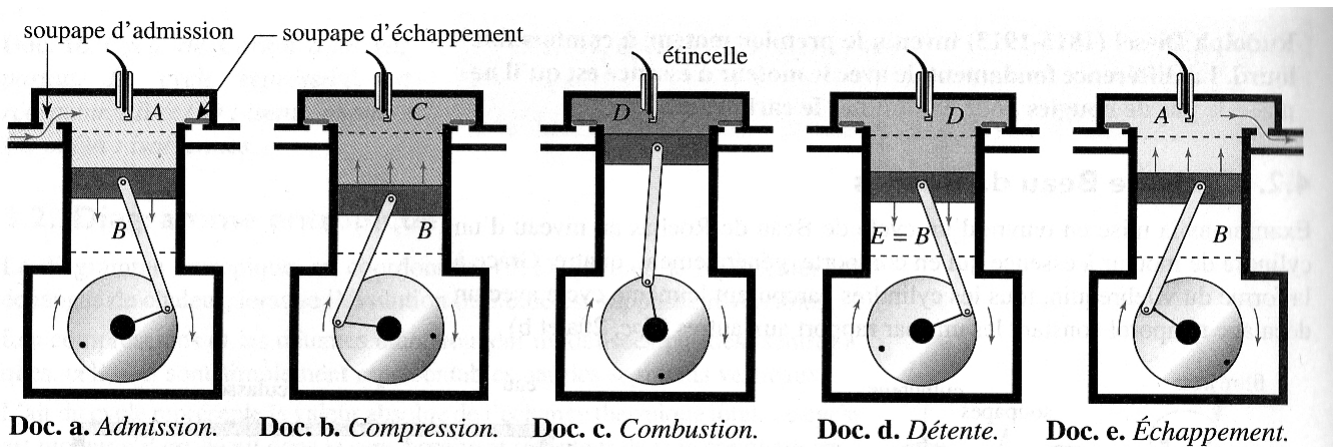
Sur les quatre temps du moteur à explosion, deux temps sont moteurs (évolution AB et CDE) et deux sont récepteurs (évolutions BC et EA). En couplant quatre cylindres dont les temps sont décalés, on obtient globalement un système qui est moteur à tout instant.



Doc. 20a. Cylindre d'un moteur à essence.



Doc. 20b. Coupe d'un moteur à essence à quatre cylindres.



Doc. a. Admission.

Doc. b. Compression.

Doc. c. Combustion.

Doc. d. Détente.

Doc. e. Echappement.

4-2 Modélisation du moteur à explosions

Nous souhaitons exprimer le rendement thermodynamique du ME, pour cela il va falloir faire certaines hypothèses simplificatrices et utiliser le modèle suivant :

i) :Le mélange initial (air-carburant) et les gaz d'échappement sont assimilés à un même gaz parfait (G) de coefficient $\gamma = C_p / C_v = 1,40$ (les gaz diatomiques de l'air sont en excès dans le mélange donc l'hypothèse est raisonnable).

ii) :Le (G) ne subit aucune évolution chimique. La chaleur qui est effectivement dégagée par la combustion du carburant dans l'air est supposée fictivement fournie par une source chaude fictive.

iii) : Le diagramme de Watt précédent est remplacé par le diagramme modèle ci-contre. Plus précisément :

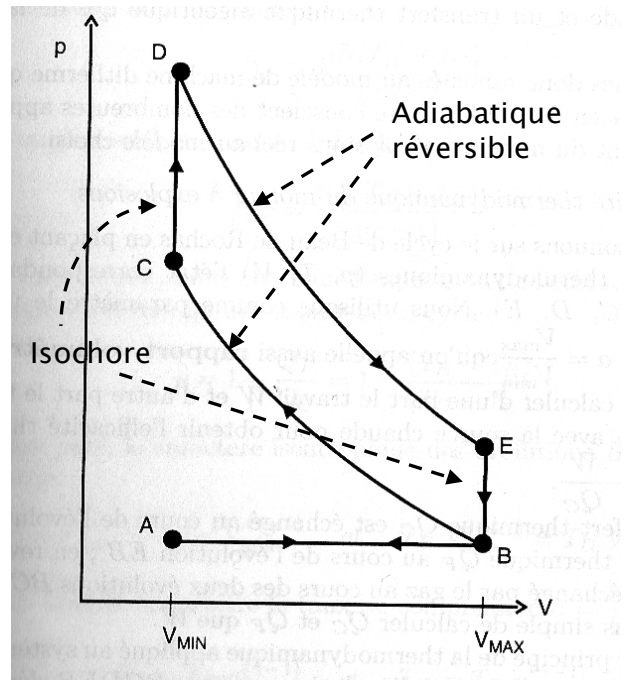
⇒ L'admission est supposée isotherme et isobare à la pression atmosphère.

⇒ La compression BC et la détente DE sont supposées adiabatiques (on néglige les pertes de chaleur à travers les parois du cylindre) et réversibles (on néglige notamment le frottements) : ces évolutions sont donc isentropiques.

⇒ La combustion est assez rapide pour que le piston n'ait pas le temps de se déplacer, l'évolution CD est donc modélisée par une évolution isochore.

⇒ L'ouverture de la soupape est rapide et ramène le gaz à pression atmosphérique sans que le piston ait le temps de se déplacer. L'évolution EB est donc isochore.

⇒ Le gaz est enfin expulsé dans l'atmosphère à pression et température constantes.



On remarque que les travaux au cours des évolutions AB et BA se compensent, on peut oublier ces étapes au cours desquelles le système Σ constitué du gaz contenu dans le cylindre est un système ouvert. Pour les évolutions BC, CD, DE et EB en revanche, Σ est un système fermé évoluant au contact de deux sources de chaleur : la source chaude fictive et la source froide qu'est l'atmosphère. Dans le modèle adopté, le transfert thermique reçu par le fluide n'est plus issu d'une réaction chimique interne mais provient d'une source chaude fictive. Il n'est donc plus nécessaire de renouveler le fluide.

Il en résulte que tout se passe comme si une certaine quantité de (G) constituant un système fermé Σ décrivait indéfiniment le cycle de la figure ci-dessus, appelé **CYCLE DE BEAU DE ROCHAS**, en recevant un travail W de l'extérieur, un transfert algébrique Q_c de la source chaude et un transfert thermique algébrique Q_f de la source froide.

On est ramené au modèle de la **machine thermique ditherme** (il faut garder en mémoire les nombreuses approximations faites pour cela).

4-3 Efficacité thermodynamique du moteur à explosions

Soit $a = \frac{V_{\max}}{V_{\min}}$ le taux de compression ou rapport volumique. On cherche à calculer l'efficacité

$$e = -\frac{W}{Q_C} \text{ du ME.}$$

Evolution CD $\rightarrow$ transfert thermique Q_C

Evolution EB $\rightarrow$ transfert thermique Q_F

Evolution BC et DE $\rightarrow$ échange de W

Il est plus facile de calculer Q_C et Q_F que W .

$\Rightarrow$ 1^{er} principe de la thermodynamique appliqué au système fermé Σ qui décrit un cycle BCDEB:

$$\Delta U = U_B - U_B = 0 = W + Q_C + Q_F$$

$$\text{donc } e = 1 + \frac{Q_F}{Q_C}.$$

Au cours de l'évolution isochore CD, le travail reçu est nul. On applique le 1^{er} principe au système fermé Σ pour l'évolution CD :

$$\Delta U = U_D - U_C = 0 + Q_C$$

comme le gaz est parfait :

$$U_D - U_C = C_V(T_D - T_C) = \frac{nR(T_D - T_C)}{(\gamma - 1)}$$

Cela nous donne :

$$Q_C = \frac{nR(T_D - T_C)}{(\gamma - 1)} \text{ et } Q_F = \frac{nR(T_B - T_E)}{(\gamma - 1)}$$

$\Rightarrow$ En substituant, nous obtenons l'expression de l'efficacité en fonction des températures aux quatres sommets du cycle :

$$e = 1 + \frac{Q_F}{Q_C} = 1 - \frac{(T_E - T_B)}{(T_D - T_C)}$$

$\Rightarrow$ On utilise le caractère isentropique des évolutions BC et DE, cela donne :

$$T_B V_{\max}^{\gamma-1} = T_C V_{\min}^{\gamma-1} \text{ et } T_E V_{\max}^{\gamma-1} = T_D V_{\min}^{\gamma-1}$$

On fait apparaître le taux de compression ce qui donne :

$$T_C = T_B a^{\gamma-1} \text{ et } T_D = T_E a^{\gamma-1}$$

On obtient finalement :

$$e = 1 - \frac{1}{a^{\gamma-1}}$$

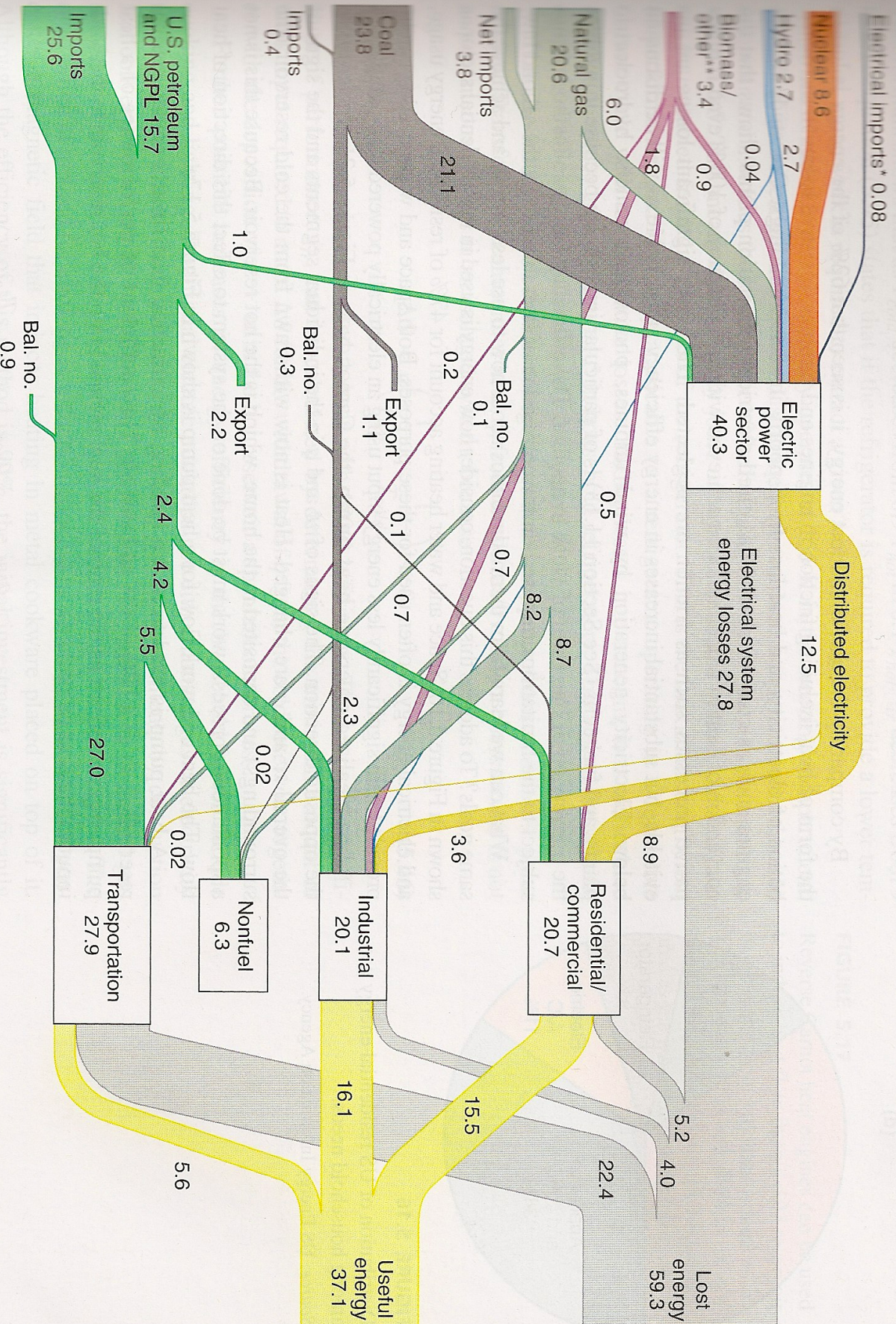
⇒ Avec $\gamma = 1,40$, on obtient par exemple $e=36\%$ pour $a=3$, $e=59\%$ pour $a=9$

Du fait du modèle trop parfait, ces valeurs surestiment nettement les efficacités effectivement obtenues qui sont de 10 à 20 % moins élevées. Cependant, l'évolution de l'efficacité avec le taux de compression prévue par le modèle est conforme à la réalité. L'augmentation à priori souhaitable du taux de compression est limitée par le phénomène d'auto-allumage ; le mélange s'enflamme spontanément avant la fin de la compression ; l'explosion violente du mélange provoque alors un choc préjudiciable sur les pièces mécaniques, on dit que le moteur *cogne*.

ANNEXE : La « taxe » énergétique universelle de la nature



U.S. Energy Flow Trends – 2002 Net Primary Resource Consumption ~103 Exajoules



Source: Production and end-use data from Energy Information Administration, *Annual Energy Review 2002*.
 *Net fossil-fuel electrical imports.
 **Biomass/other includes wood, waste, alcohol, geothermal, solar, and wind.