

PRINCIPE DE CARNOT

Conditions de fonctionnement d'une machine thermique.

- Prenons le fonctionnement de la machine à vapeur : l' eau reçoit une quantité de chaleur Q_1 de la chaudière, en restitue une quantité Q_2 au condenseur et, seule, la différence (conservation de l' énergie) est transformée en travail ; c'est le travail indiqué :

$W_1 = (Q_1 - Q_2)$. Le rendement thermique est : $R_t = W_1 / Q_1 = (Q_1 - Q_2) / Q_1$ ou $R_t = 1 - Q_2 / Q_1$

Ce rendement est faible : sur **100 calories** reçues de la chaudière, **17** environ sont transformées **en travail**; **83 sont perdues** au condenseur ; démonstration avec un exemple :

soit une machine à vapeur dont la puissance indiquée est de 250 chevaux-vapeur (185 KW) consomme 1 530 kg de vapeur en une heure ; sachant que l'eau est prise au condenseur à 40 °C, portée à 180 °C et vaporisée à cette température, calculons le rendement thermique de la machine ; on rappelle que pour élever la température d'un gramme d'eau de 0 °C à t °C et pour la vaporiser à cette température (vapeur saturée), il faut lui fournir une quantité de chaleur $q = (607 + 0,3t)$ calories (formule de Regnault) ; pour chauffer un kilogramme d'eau de 0 °C à 180 °C et la vaporiser à cette température, il faut lui fournir une quantité de chaleur $q_1 = 607 + 0,3 \times 180 = 661$ kilocalories ; mais l' eau étant prise à 40 °C, il faut en retrancher 40 kilocalories nécessaires pour élever ce kilogramme d'eau de 0 °C à 40 °C ; un kilogramme d'eau chauffée et vaporisée à 180 °C absorbe donc : $Q' = 661 - 40 = 621$ kilocalories ; la chaleur Q_1 reçue pendant une heure par l' eau, agent thermique est donc : $Q_1 = 621 \times 1530 = 950\ 130$ kilocalories. Sachant que 1 cal = 4,18 Joules et 1 KWh = 3600 KJ , $Q_1 = 426 \times 950\ 130 = 1103$ KWh
Le travail indiqué pendant une heure est : $W_1 = 147 \times 1 = 185$ KWh
Le rendement thermique est donc : $R_t = W_1 / Q_1 = 147 / 1103 = 0,17$

C'est là que se pose le problème le plus important. Est-il possible et comment est-ce possible, d'améliorer le rendement thermique, donc de diminuer ou même d'annuler la quantité de chaleur Q_2 perdue au condenseur?

Carnot, en 1824, énonça le principe qui conditionne le fonctionnement de tout moteur thermique. Il constate que la quantité de chaleur Q_2 ne peut pas être nulle : il faut que la machine restitue à une source froide une partie de la chaleur qu'elle a empruntée à une source à température plus élevée. Ce principe a donc un caractère négatif; c'est un principe d'impossibilité. On pourrait par exemple, s'il était possible que la quantité de chaleur Q_2 fût nulle, « concevoir un navire qui marcherait tout seul, empruntant de la chaleur à une seule source, l' eau de mer, en laissant derrière lui un sillage de glace. Cela est trop beau pour être vrai » (Charles Fabry). Donc le rendement R_t ne peut jamais être égal à 1, même dans une machine théoriquement parfaite, puisque Q_2 doit exister.

Énoncé du principe de CARNOT

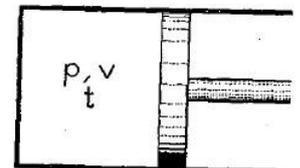
- l'idée de Carnot est donc qu'on ne peut produire du travail en prenant de la chaleur à une seule source; nous énoncerons alors le principe suivant : Une machine thermique ne peut, au cours d'un cycle complet, fournir de travail que si elle emprunte une quantité de chaleur Q_1 à une source chaude et si elle en restitue une partie Q_2 à une source froide, la différence $Q_1 - Q_2$ étant seule transformée en travail.
Il ne peut y avoir de travail sans qu'une partie de la chaleur à transformer subisse une chute de température.

THEOREME DE CARNOT

Transformations réversibles. - Ayant admis le principe de la nécessité d'une chute de température pour la production

de travail, Carnot introduit la notion de transformations réversibles et de rendement maximum.

Considérons un gaz enfermé dans un cylindre (fig) : il occupe un volume v sous la pression p , à la température t . Cet état va se modifier au cours des transformations subies par le gaz. Une transformation sera réversible si à chaque instant le gaz reste très sensiblement en équilibre mécanique et thermique avec le milieu ambiant. La réversibilité mécanique est donc réalisée si la pression du gaz à chaque instant diffère infiniment peu de la pression que le piston exerce sur ce gaz; il faut que ces deux pressions diffèrent, car aucune évolution mécanique du fluide ne se produirait si elles restaient égales ; mais la différence entre ces deux pressions reste très faible, ce qui entraîne un déplacement du piston très lent dans un sens ou dans l' autre, d'où le terme réversible. Supposons au contraire que nous fassions un trou dans le cylindre contenant le gaz comprimé ce gaz s'échappera violemment dans l' atmosphère par transformation irréversible; à chaque instant on est très loin d'un état d'équilibre, et il n'est pas question de modifier l' évolution dans un sens ou dans l' autre. Fixons les idées par un autre exemple mécanique. Si nous soulevons un poids à l' aide d'un treuil en tournant très doucement la manivelle : à chaque instant le couple moteur est à peine supérieur au couple résistant ; on peut s'arrêter, redescendre le poids, le remonter, etc., le mouvement est pratiquement réversible. Mais si on lâche la manivelle, le poids tombe, le treuil s'emballe : cette chute est irréversible. La réversibilité thermique implique des conditions analogues. On peut d'abord supposer que le cylindre est ou bien parfaitement conducteur de la chaleur ou bien totalement isolant. Dans le deuxième cas, il n'y a pas d'échange de chaleur avec le milieu extérieur, la transformation est dite adiabatique, et la question de réversibilité thermique ne se pose pas. Dans le premier cas, le gaz échange de la chaleur avec le milieu extérieur si sa température est différente de la température ambiante ;



l'échange sera réversible si la différence des températures est, à chaque instant, très faible. Selon le signe de cet écart, l'échange de chaleur se fera dans un sens ou dans l'autre. Ainsi, si dans une salle il y a un radiateur d'eau chaude à 90°C et si la température de la salle est 18°C, la chaleur passe irréversiblement du radiateur dans la pièce. Si le radiateur était à 18,1 °C, on pourrait admettre que l'échange de chaleur serait pratiquement réversible, mais il serait aussi très lent; il suffirait de modifier très peu la température du radiateur, en la faisant passer par exemple à 17,9 °C, pour que l'air de la salle réchauffe l'eau du radiateur : le sens de la transformation serait bien inverse. Les transformations rigoureusement réversibles sont des transformations idéales, pratiquement irréalisables, mais on peut s'en rapprocher.

Rendement thermique maximum, Théorème de Carnot.

- A partir du principe énoncé par Carnot admettant qu'une machine thermique ne peut fonctionner que par échange de chaleur entre une source chaude et une source froide, on démontre que :

Théorème. Le rendement thermique d'un moteur fonctionnant entre deux températures t_1 et t_2 est maximum si le moteur fonctionne d'une façon réversible (moteur théorique). Ce rendement théorique est alors indépendant de l'agent thermique et ne dépend que des températures t_1, t_2 des deux sources :

On démontre qu'il a pour valeur : $R_m = 1 - (T_2 / T_1)$
où T_1 est la température absolue de la source chaude, et T_2 la température absolue de la source froide.

Autre énoncé du Théorème : Toutes les machines dithermes réversibles (irréversibles) ont un rendement égal (inférieur) à celui du cycle de Carnot, indépendamment du système et de la forme du Cycle (démonstration en annexe).

On rappelle que la température absolue est $T = t + 273$.

On remarque que si t_1 et t_2 sont les températures centésimales,
 $t_1 = T_1 - 273$; $t_2 = T_2 - 273$, on peut écrire $R_m = (t_1 - t_2) / (t_1 + 273)$

Notons également qu'il est inutile de chercher à remplacer la vapeur par de l'air ou tout autre fluide; le rendement sera le même.

Remarque : Cette dernière proposition peut se démontrer par l'absurde, ainsi que le fit Carnot. Imaginons deux moteurs thermiques distincts réversibles fonctionnant entre les mêmes températures t_1 et t_2 , l'un d'eux ayant un rendement supérieur à l'autre. Associons de façon que celui qui a le meilleur rendement fournisse du travail, tandis que l'autre fonctionne en sens inverse (il est réversible), de façon à fournir de la chaleur à la source chaude en quantité égale à celle que lui prend le premier moteur, mais avec une dépense de travail moindre. La source chaude se trouve donc éliminée (il reste la source froide), et l'ensemble aura fourni du travail : ce qui est impossible avec une seule source d'après le principe de Carnot; donc les deux rendements sont les mêmes.

EXEMPLES :

- 1) Calculer le rendement thermique (théorique maximum) d'une machine à vapeur fonctionnant avec une chaudière à 227 °C et un condenseur à 57 °C
 $T_1 = t_1 + 273 = 227 + 273 = 500$ °K
 $t_1 - t_2 = 170$ °C ou $T_1 - T_2 = 170$ °K
le rendement maximum demandé est : $R_t = 170 / 500 = 0,34$
- 2) Même question pour un moteur à explosion en admettant que les gaz brûlés sont à une température maximum de 1527 °C et que les gaz d'échappement sortent à 527°C.
 $T_1 = t_1 + 273 = 1527 + 273 = 1800$ °K
 $t_1 - t_2 = 1000$ °C ou $T_1 - T_2 = 1000$ °K
 $R_t = 1000 / 1800 = 0,55$

Les deux exemples précédents montrent que les rendements réellement obtenus sont bien inférieurs aux rendements maxima que l'on vient de calculer.

Reprenons l'expression du rendement thermique :

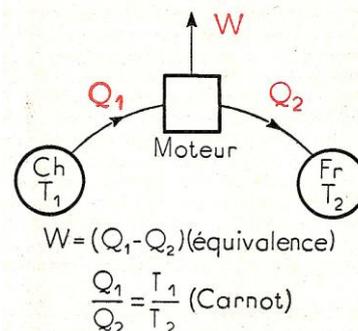
$$R_t = 1 - Q_2 / Q_1$$

Nous voyons tout de suite (se reporter au principe de Carnot) une autre forme du théorème de Carnot, souvent utile dans les problèmes :

$$Q_1 / Q_2 = T_1 / T_2$$

Nous pouvons résumer les conditions de fonctionnement et les échanges de chaleur d'un moteur thermique par le schéma ci-contre :

Echanges de chaleur et de travail dans un moteur thermique



Remarque : Lorsque l'échappement d'une machine à vapeur se fait à l'air libre (sans condenseur), on peut encore appliquer le théorème de Carnot en prenant $t_2 = 100^\circ\text{C}$ (ou $T_2 = 373^\circ$ absolu). En effet la vapeur s'échappe à la pression atmosphérique, et ceci équivaut à un condenseur à 100°C ; on sait que la tension de la vapeur d'eau à 100°C est de l'atmosphère (loi de l'ébullition).

Amélioration du rendement. - Il résulte de l'expression $R_t = 1 - (T_2 / T_1)$ les conclusions suivantes :

- La valeur du rendement maximum augmente si on élève la température de la source chaude, celle de la source froide restant fixe.
- La valeur du rendement maximum augmente si on abaisse la température de la source froide, celle de la source chaude restant fixe.

Dans les machines à vapeur le rendement thermique réel est plus petit que le rendement thermique maximum, car la machine ne fonctionne pas dans les conditions de réversibilité : augmentation brusque de pression lorsque l'on passe du condenseur à la chaudière. Cependant le rendement réel varie dans le même sens que le rendement maximum et ceci explique l'emploi de la surchauffe (T_1 plus élevée). L'abaissement de T_2 n'est pas simple à réaliser. Pour les moteurs à explosion, le cycle de Beau de Rochas est très différent d'un cycle réversible et son rendement n'est pas forcément augmenté quand la température atteinte T_1 est plus grande; ce rendement ne dépend que du taux de compression.

Limitation de la convertibilité de la chaleur en travail. – Supposons que nous disposions de 100 calories fournies par la source chaude au cours d'un cycle : le principe de l'équivalence nous indique qu'elles peuvent nous donner un travail de 418 joules si nous les transformons intégralement en travail.

Le principe de Carnot s'oppose à cette transformation totale au cours d'un cycle et attribue à ces 100 calories une valeur utilisable très différente selon la température de la source chaude qui les fournit, et celle de la source froide vers laquelle elles évoluent : si la source chaude est à 100°C et si on dispose d'une source froide à 0°C , 27 calories seulement sur 100 seront transformées en travail.

Si la source chaude est à 1000°C , avec la même source froide à 0°C , ce sont 79 calories qui seront transformées en travail. La calorie n'a donc pas la même qualité, en vue de sa transformation en travail, selon qu'on la prend à telle ou telle température. Des calories prises à la température du milieu ambiant ne peuvent être transformées en travail. Or dans toutes les transformations d'énergie, il y a apparition de chaleur, sous forme de calories qui se répandent dans le milieu ambiant, donc sont inutilisables. Il n'y a pas de travail mécanique réel sans frottements, donc sans chaleur ; il n'y a pas de courant électrique sans effet Joule, donc sans chaleur, etc. C'est dans ce sens que l'on peut dire que l'énergie se dégrade en évoluant. Ceci n'est pas contraire au principe de la conservation de l'énergie : dans un système isolé, l'énergie totale reste bien constante, mais en évoluant elle se transforme en partie en chaleur, et devient de moins en moins utilisable, c'est-à-dire de moins en moins transformable en travail.

Principe des machines frigorifiques. - Un moteur thermique transporte une quantité de chaleur Q_2 de la source chaude à la source froide en fournissant du travail. Est-il possible de transporter de la chaleur d'une source froide à une source chaude ? C'est le problème des machines frigorifiques. La solution est évidemment possible si l'on dispose d'une machine réversible, puisque chacune des transformations subies par le fluide peut se faire dans un sens ou dans l'autre ; mais cette machine consomme du travail; c'est en somme un moteur thermique fonctionnant à l'envers. Une machine frigorifique retire une quantité de chaleur Q_2 d'une source froide prise à la température T_2 ; elle consomme un travail W et fournit à la source chaude prise à la température T_1 une quantité de chaleur Q_1 .

L'application du principe de l'équivalence au cycle de cette machine nous donne :

chaleur reçue par le fluide : $Q_2 - Q_1$

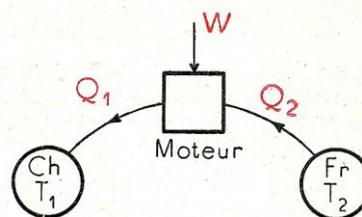
travail reçu par le fluide : W

donc $W + (Q_2 - Q_1) = 0$ ou $W = (Q_1 - Q_2)$

Si la machine est réversible, le théorème de Carnot s'exprime toujours par la formule : $Q_1 / Q_2 = T_1 / T_2$

On voit que ces relations sont les mêmes que dans le cas d'un moteur thermique. Seul le sens des échanges est modifié, ainsi que le précise le schéma de la figure ci-contre qui est à rapprocher de la figure précédente donnant le schéma de fonctionnement du moteur. Le but d'une telle machine est d'enlever le plus de calories possible à la source froide : Q_2 grand ; et ceci avec une dépense aussi minime que possible de travail W .

Echanges de chaleur et de travail dans une machine frigorifique.



$$W = (Q_1 - Q_2) \text{ (équivalence)}$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2} \text{ (Carnot)}$$

Le rapport $\eta = Q_2 / W$ s'appelle le coefficient de performance, Il doit être aussi grand que possible.

Comme $W = (Q_1 - Q_2)$ on a :

$\eta = Q_2 / (Q_1 - Q_2)$ et si la machine est réversible, on peut écrire

$\eta = T_2 / (T_1 - T_2)$; η est d'autant plus grand que T_1 et T_2 sont des températures plus voisines.

Une machine frigorifique est d'autant plus avantageuse que les températures des deux sources sont plus voisines.

EXEMPLE : Quelle masse de glace peut-on fabriquer en une heure avec une machine frigorifique idéale actionnée par un moteur de 10 cv et fonctionnant entre -5°C et $+15^\circ\text{C}$? Chaleur de fusion de la glace : 80 calories/gramme. Des relations établies précédemment :

$$W = (Q_1 - Q_2) \quad : \quad Q_1 / Q_2 = T_1 / T_2$$

Éliminons Q_1

$$Q_1 = (W + Q_2) \quad \text{et} \quad (W + Q_2) / Q_2 = T_1 / T_2$$

$$W / Q_2 = (T_1 / T_2) - 1 = (T_1 - T_2) / T_2 \quad \text{d'où} \quad Q_2 = (W T_2) / (T_1 - T_2)$$

Ici : $T_2 = -5 + 273 = 268^\circ\text{K}$ $T_1 - T_2 = t_1 - t_2 = 15 - (-5) = 20^\circ\text{K}$

$$W = 0,736 \times 10 \times 1 = 7,36 \text{ kWh}$$

$$Q_2 = 0,736 \times 10 \times 1 \times (268) / (20) = 98,6 \text{ kWh}$$

La masse de glace obtenue est $m = 98,6 \times 861 / 80 = 1061 \text{ kg}$ de glace

Remarquons que la chaleur cédée à la source chaude est : $Q_1 = Q_2 (T_1 / T_2) = 106 \text{ kWh} = 9,1 \cdot 10^4$ kilocalories

Remarque : L'expression $Q_1 / Q_2 = T_1 / T_2$ n'a plus de sens si on y fait $T_2 = 0$; il faudrait que Q_1 soit infini, ce qui entrainerait une dépense infinie de travail. Aucune machine thermique ne permet d'obtenir $T_2 = 0$; ce point est appelé le zéro absolu. On ne peut donc que s'en rapprocher indéfiniment, sans jamais l'atteindre.

Utilisation d'un cycle frigorifique pour le chauffage – Thermopompe ou Pompe à Chaleur

- Si on dispose d'une énergie W , énergie électrique par exemple, on peut, pour se chauffer, la transformer intégralement en chaleur par effet Joule dans un radiateur à résistance ; on dégage ainsi (par une transformation irréversible) une quantité de chaleur $q = W$.

Si, au contraire, on utilise cette énergie pour actionner une machine frigorifique, on pourra faire dégager dans le milieu ambiant pris comme source chaude, la quantité de chaleur $Q_1 = W + Q_2$ bien supérieure à W , Q_2 ayant été emprunté à une source froide. Tel est le principe du chauffage par thermopompe : la source froide est par exemple l'eau d'une rivière ou d'un lac; la source chaude est l'eau du radiateur de chaleur qui se trouve ainsi chauffée et peut par thermosiphon circuler dans les radiateurs d'un chauffage central. De nombreuses installations ont été réalisées en Suisse qui dispose de houille blanche, donc d'énergie électrique.

Citons l'installation de l'École Polytechnique Fédérale de Zurich; la chaleur est fournie par la rivière Limmat à 7°C , la source chaude étant à 60°C ; on obtient $Q = \sim 3$ fois W . L'installation chauffe 90 immeubles et on estime l'économie annuelle de charbon à 2800 tonnes.

Remarque : Dans les pays où l'énergie électrique W est fournie par une centrale thermique, à une quantité de chaleur Q fournie par le combustible correspond : $W = Q / 3$ (rendement de la centrale thermique).

Si on utilise W pour actionner une thermopompe, on aura : $Q_1 \sim 3W \sim Q$.

Pourquoi alors ne pas utiliser le charbon directement pour se chauffer ? N'oublions pas que le chauffage direct laisse perdre facilement 60 % des calories avec les chaudières usuelles. On a donc encore avantage à utiliser les deux transformations (centrale thermique + thermopompe).

En résumé :

Le rendement industriel R_i , d'un moteur thermique est le rapport du travail W disponible sur l'arbre de la machine pendant un temps déterminé à la quantité de chaleur Q fournie par le combustible pendant le même temps, exprimée en unités de travail.

$$R_i = W / Q$$

Le rendement thermique d'un moteur est le rapport du travail indiqué W_1 pendant un temps déterminé à la quantité de chaleur Q_1 reçue par l'agent thermique pendant le même temps : $R_t = W_1 / Q_1$

Le principe de Carnot indique les conditions de fonctionnement d'un moteur thermique : Une machine thermique ne peut fournir de travail que si elle échange de la chaleur avec deux sources de températures différentes; au cours d'un cycle complet, elle emprunte de la chaleur d'une source chaude, soit Q_1 ; elle en restitue une partie Q_2 à une source froide ; la différence $Q_1 - Q_2$ est transformée en travail : $W_1 = (Q_1 - Q_2)$

Une transformation réversible est une suite continue d'états d'équilibre : équilibre mécanique et équilibre thermique.

Le théorème de Carnot exprime que le rendement d'un moteur thermique est maximum si le moteur fonctionne d'une façon réversible ; ce rendement ne dépend que des températures t_1 et t_2 de la source chaude et de la source froide. Il s'exprime en fonction des températures absolues par la relation : $R_t = 1 - (T_2 / T_1)$

La valeur de ce rendement maximum augmente avec T_1 ; d'où l'intérêt de la surchauffe dans les machines à vapeur.

En faisant décrire à l' envers le cycle d'une machine thermique, on obtient une machine frigorifique qui prend de la chaleur d'une source froide pour en céder à une source chaude, en consommant du travail.

Propos sur le principe de Carnot et notion d'entropie : Sadi Carnot (1796-1832) était le fils aîné de Lazare Carnot, l'Organisateur de la Victoire ; entré à Poly technique à 16 ans, il en sortit officier du génie. Il abandonna d'ailleurs vite la carrière militaire pour se consacrer à ses études scientifiques. Frappé par les progrès de la machine à vapeur, réalisés en Angleterre,

Carnot étudie le fonctionnement des « machines à feu », et publie à 28 ans, en 1824, un ouvrage capital : les *Réflexions sur la puissance motrice du feu*. Rappelons qu'à cette époque la chaleur était encore considérée comme un fluide indestructible et sans masse, *le calorique*, malgré l' expérience et les idées de Rumford (1799). Etudiant le fonctionnement de la machine à vapeur, Carnot fut frappé par la nécessité d'avoir deux sources à des températures différentes. Pour lui, la production de travail est due à une chute de température subie par le calorique qui se conserve; il y a analogie complète entre cette chute du calorique et la chute de l' eau entre deux niveaux différents. « La production de la puissance motrice est donc due, dans les machines à vapeur, non à une consommation réelle du calorique, mais de son transport d'un corps chaud sur un corps froid. »

Carnot est ensuite amené à définir les transformations réversibles, à énoncer le théorème du rendement maximum, tout en en cherchant une vérification expérimentale directe : il calcule, avec les données alors connues, les rendements de deux moteurs à vapeur d'eau et à vapeur d'alcool pour une même chute de température, et les trouve égaux. L'énoncé du principe de l' équivalence par Robert Mayer en 1842 détruisant la théorie du calorique remit en question les idées de Carnot, basées sur l' indestructibilité du calorique. Ce fut le mérite de Clausius, physicien allemand (1822-1888) et de William Thomson (1824-1907), qui devint Lord Kelvin, d'exhumer le mémoire de Carnot, oublié, et d'adapter le principe de Carnot aux idées nouvelles sur l' équivalence. Le fait essentiel subsiste : nécessité de deux sources de chaleur à températures différentes, mais, contrairement aux idées de Carnot, une partie de la chaleur se transforme en travail. Clausius ne se contenta pas de concilier le principe de Carnot avec le principe de l' équivalence ; il en développa les conséquences et fonda ainsi la thermodynamique.

En particulier, il introduisit *la notion d'entropie* dont les variations permettent d'exprimer mathématiquement le principe de Carnot. Remarquons que le travail d'une force peut se mettre sous la forme d'un produit de deux variables, dont l' une exprime un état de tension, l' autre un déplacement ; ainsi le travail d'un ressort est $\Delta W = F\Delta x$, F tension du ressort ; Δx variation de longueur ; le travail d'un gaz est $\Delta W = p\Delta v$, p pression du gaz, Δv variation de volume. F, p,... sont des variables de tension; Δx , Δv correspondent à des variables de grandeur, de position. Or la chaleur n'est qu'une forme particulière de l' énergie : ΔQ correspond à ΔW . Lorsqu'il y a échange spontané de chaleur entre deux corps, cet échange ne se fait que s'il y a une différence de température entre les deux corps; cette différence est donc la cause qui produit cet échange, comme la force est la cause qui produit un travail. La température est donc la variable de tension correspondant à la quantité de chaleur. On doit poser, par analogie avec le travail : $\Delta Q = T\Delta S$ S étant la variable de position correspondante ; on l' appelle l' *entropie*.

On peut définir et calculer sa variation à température constante par $\Delta S = \Delta Q / T$

Pour un même échange de chaleur ΔQ , la variation d'entropie est d'autant plus grande que T est plus faible; or la valeur énergétique des calories diminue lorsque la température s'abaisse, donc l'augmentation d'entropie correspond à une dégradation de l' énergie. L'évolution spontanée d'un système isolé se traduit non seulement par la conservation de son énergie totale mais par sa dégradation : l' entropie de ce système isolé ne peut qu'augmenter. Ainsi le principe de Carnot apparait comme un principe d'évolution : il s'oppose à ce qu'un système isolé repasse deux fois par le même état.

Formules :

- Energie mécanique :
 - - variation énergie potentielle de pesanteur $E_{p1} - E_{p2} = P.h$.
 - - énergie cinétique de translation $E_C = \frac{1}{2} mv^2$
 - - énergie cinétique de rotation $E_C = \frac{1}{2} I\omega^2$
- Principe de l'état initial et de l'état final
 - 1 calorie = 4,18 joules
 - 1 Kcal = 426 kgm = 1,16 Wh_{th} = 1 mTh
 - Transformation non fermée $U_B - U_A = W + Q$
 - Cycle $W + Q = 0$
- Inertie de l'énergie
 - Relation d'Einstein : $W = mc^2$
- Machine à vapeur
 - Travail fourni par un gaz : $D.W = p.D.v$.
 - Pression maxima de la vapeur d'eau (Duperray) : $P_{kgp/Ciii} = , (-l.)' . " 100$
 - Puissance utile mesurée au frein de Prony : $P_u = 27t.N.p.l$
- Rendements des moteurs thermiques
 - $R_{i(industriel)} = W / Q$, $R_{t(thermique)} = W_1 / Q_1$, $R_{t(thermique \text{ max Carnot})} = 1 - T_2/T_1$