

## SECOND PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE : PRINCIPE DE CARNOT

Au début, la thermodynamique était liée à la mise au point du moteur à vapeur. Dans l'une de ses premières applications, **Newcomen** utilisa un moteur à vapeur en 1712 pour pomper l'eau d'une mine. Après les améliorations considérables apportées par **James Watt** entre 1763 et 1782, le moteur à vapeur devint l'élément fondamental de la révolution industrielle. Impressionné par les pionniers britanniques, **Sadi Carnot**, jeune ingénieur à Paris, se rendit compte que la mise au point de ce moteur s'appuyait sur l'ingéniosité et l'adresse de ses inventeurs plutôt que sur une connaissance profonde des principes de son fonctionnement. Il entreprit donc d'en étudier les limites.



**Sadi CARNOT**

REFLEXIONS  
sur la  
PUISSANCE MOTRICE  
du feu

Pour étudier les moteurs à vapeur, Carnot établit une analogie avec un moulin à eau (fig. 1), dans lequel l'eau est recueillie par des gobelets à une certaine hauteur puis déversée plus bas dans un cours d'eau. En tombant, l'eau fait tourner une roue et cette rotation peut fournir un travail. À partir de cette image, Carnot fit une hypothèse fondamentale:

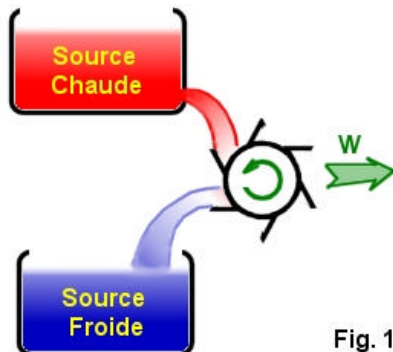


Fig. 1

### ÉNONCE DU PRINCIPE DE CARNOT

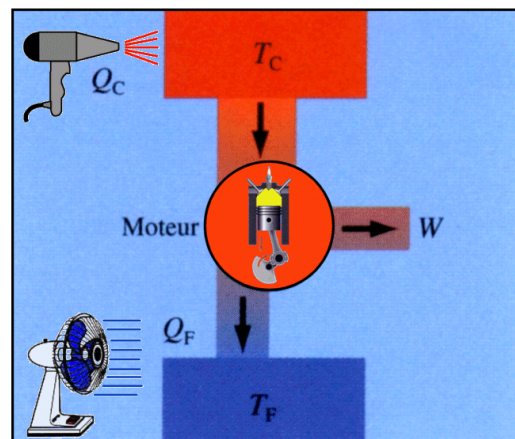
**LE MOTEUR A VAPEUR DOIT ET NE PEUT FONCTIONNER QU'ENTRE DEUX RESERVOIRS DE CHALEUR DONT LES «NIVEAUX» SONT DETERMINES PAR LEURS TEMPERATURES.**

Dans cette optique, c'était la « chute » du fluide calorifique du réservoir chaud au réservoir froid qui produisait le travail. Carnot supposait que le fluide calorifique lui-même

était conservé. Bien qu'il utilisât cette notion incorrecte qui fait de la chaleur une substance conservée, Carnot formula des théorèmes importants qui permirent l'évolution ultérieure de la thermodynamique. Il imagina en particulier un cycle idéal d'opérations thermodynamiques qui sert à déterminer les limites de rendement des moteurs réels.

Un **moteur thermique** est un dispositif qui convertit la chaleur en travail mécanique. Les moteurs à vapeur, les moteurs à essence et les moteurs diesel en sont des exemples. Nous allons nous intéresser en particulier aux moteurs thermiques qui fonctionnent selon un cycle de processus répétitif. Dans un tel moteur, un fluide de travail retrouve son état initial à la fin de chaque cycle. Les moteurs à vapeur utilisent l'eau comme fluide, alors que les moteurs à essence et les moteurs diesel utilisent un mélange de carburant et d'air.

La figure 2 est une représentation schématique d'un moteur thermique qui fonctionne entre un réservoir thermique chaud à la température  $T_C$  et un réservoir thermique froid à la température  $T_F$ . (Rappelons qu'un réservoir thermique chaud est un système dont la température n'est pas sensiblement modifiée par un transfert de chaleur) Durant chaque cycle, le moteur absorbe la quantité de chaleur  $Q_C$  fournie par le



Un moteur thermique absorbe une quantité de chaleur  $Q_C$  d'un réservoir thermique chaud, effectue un travail  $W$  et cède une quantité de chaleur  $Q_F$  au réservoir froid. Durant un cycle complet,

$$W = |Q_C| - |Q_F|.$$

Fig. 2

réservoir thermique chaud. Une partie de cette chaleur sert à accomplir un travail  $W$  et la chaleur restante  $Q_f$  est cédée au réservoir froid. Pour simplifier, nous allons, dans la discussion qui suit, faire figurer explicitement le signe de la quantité de chaleur transmise. La chaleur absorbée par le moteur est donc  $+|Q_c|$  et la chaleur cédée par le moteur s'écrit  $-|Q_f|$ . Durant un cycle complet, le système revient à son état initial, de sorte que l'énergie interne du fluide n'est pas modifiée. Selon le premier principe,  $\Delta U = W_{\text{cycle}} + Q_{\text{cycle}} = 0$

**LE TRAVAIL ACCOMPLI PAR LE MOTEUR DANS UN PROCESSUS CYCLIQUE EST EGAL A L'APPORT NET DE CHALEUR:**  
 $|W_{\text{CYCLE}}| = |Q_{\text{CYCLE}}| = |Q_c| - |Q_f|$

**LE RENDEMENT THERMIQUE  $h$  D'UN MOTEUR THERMIQUE EST DEFINI COMME ETANT LE TRAVAIL FOURNI DIVISE PAR LA CHALEUR ABSORBEE:**

$$h = \frac{W}{|Q_c|} = 1 - \frac{|Q_f|}{|Q_c|}$$

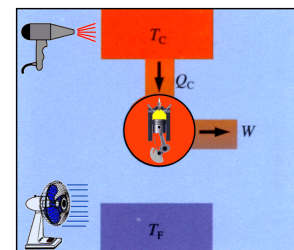
Le moteur ne pourrait avoir un rendement de 100 % ( $h = 1$ ) que si  $Q_f = 0$ . Dans ce cas, toute la chaleur absorbée serait convertie en travail. Mais, comme nous allons le voir plus bas, cela n'est pas possible: même un moteur « parfait » a un rendement toujours inférieur à 100 %. Un moteur à essence a un rendement voisin de 20 % et celui d'un moteur diesel est d'environ de 30 %.



**ÉNONCE DU DEUXIEME PRINCIPE (SELON KELVIN-PLANCK)**

**IL EST IMPOSSIBLE POUR UN MOTEUR THERMIQUE EFFECTUANT UN PROCESSUS CYCLIQUE DE CONVERTIR INTEGRALEMENT EN TRAVAIL LA CHALEUR QU'IL ABSORBE.**

Soulignons que l'énoncé parle d'un système « effectuant un processus cyclique ». Il est possible de convertir intégralement de la chaleur en travail lors de la détente isotherme d'un gaz parfait. Mais dans ce cas, le système ne reviendrait pas à son état initial: son volume serait plus grand et sa pression plus faible. L'énoncé du deuxième Principe affirme que  $Q_f$  est toujours différente de zéro; il doit toujours y avoir un réservoir froid pour recevoir la chaleur cédée par le moteur. La figure 3 représente un moteur thermique « parfait » (impossible à réaliser). Si l'énoncé de Kelvin Planck n'était pas vrai, il serait possible d'utiliser l'énorme quantité d'énergie interne de l'océan pour fournir de l'énergie à un navire sans avoir besoin d'un réservoir thermique à température plus basse.

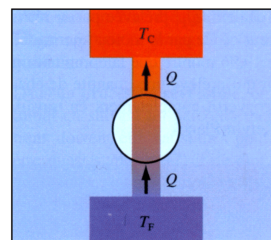


Moteur thermique parfait: IMPOSSIBLE à REALISER Fig. 3

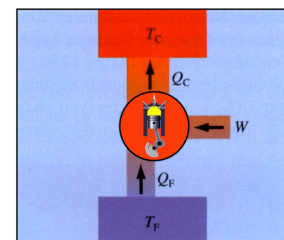
**ÉNONCE DU DEUXIEME PRINCIPE (SELON CLAUDIUS)**



La chaleur passe naturellement d'un corps chauds à un corps froid, mais elle ne passe pas spontanément d'un corps froid à un corps chaud. Partant de cette observation courante, R. Clausius présenta en 1850 l'énoncé qui porte maintenant le nom d'énoncé de Clausius du deuxième principe de la thermodynamique:



Réfrigérateur parfait: IMPOSSIBLE à REALISER Fig. 3



Lorsqu'on fournit un travail  $W$  à un réfrigérateur, il absorbe une quantité de chaleur  $Q_f$  d'un réservoir froid et cède une quantité de chaleur plus grande  $Q_c$  à un réservoir chaud. Fig. 4

**IL EST IMPOSSIBLE POUR UN SYSTEME CYCLIQUE DE FAIRE PASSER LA CHALEUR CONTINUELLEMENT D'UN RESERVOIR THERMIQUE FROID A UN RESERVOIR THERMIQUE CHAUD SANS APPORT DE TRAVAIL OU AUTRE EFFET SUR LE MILIEU ENVIRONNANT.**

La figure 4 représente un réfrigérateur « parfait », impossible à réaliser. Il est possible de faire passer la chaleur d'un réservoir thermique froid à un réservoir thermique chaud, à condition d'avoir un réfrigérateur. Un réfrigérateur (ou une pompe à chaleur) est un **moteur thermique qui fonctionne en sens inverse**. Le travail est fourni au système, qui absorbe la quantité de chaleur  $Q_f$  d'un réservoir thermique à basse température (le contenu du réfrigérateur) et qui cède une quantité de chaleur plus élevée  $Q_c$  à un réservoir thermique à température plus élevée (l'air ambiant) (figure 4). Une pompe à chaleur prélève de la chaleur à l'air extérieur froid et cède une quantité de chaleur plus grande à l'air chaud dans une pièce. Le processus étant cyclique, l'énergie interne du moteur ne varie pas et le premier principe permet donc d'écrire  $|Q_c| = W + |Q_f|$

## LES TRANSFORMATIONS REVERSIBLES ET IRREVERSIBLES

Dans un processus quasi statique, les variables d'état ( $P$ ,  $V$ ,  $T$ ) d'un système varient extrêmement lentement, de sorte que le système est toujours arbitrairement proche de l'équilibre thermique. Dans la pratique, un processus quasi statique n'a pas besoin d'être extrêmement lent. Pour tout système, il existe un temps, caractéristique nécessaire pour atteindre l'équilibre à partir d'un état initial qui n'est pas un état d'équilibre. Il suffit que le processus dure beaucoup plus longtemps que ce *temps de relaxation* pour que le processus soit effectivement quasi statique.

Dans un **processus réversible**, on peut aussi faire revenir le système à son état initial en suivant un parcours thermodynamique en sens inverse.

Trois conditions doivent être satisfaites pour qu'une transformation soit réversible:

1. Elle doit être quasi statique;
2. Elle ne doit pas y avoir de frottement;
3. Tout transfert de chaleur doit se faire à température constante ou doit correspondre à une différence de température infinitésimale.

Tout processus qui ne vérifie pas ces trois conditions est dit **irréversible**. Tous les processus naturels qui évoluent dans une seule direction sont des processus irréversibles; nous en avons cité plusieurs exemples dans l'introduction. Une détente et une compression brutales sont irréversibles parce que le système doit passer par une succession d'états qui ne sont pas des états d'équilibre. Les explosions, la diffusion, la conduction causée par une différence finie de température de même que les réactions chimiques sont également des exemples de processus irréversibles. Après un processus irréversible, le système ne peut pas revenir à son état initial sans que le milieu ambiant ne soit modifié.

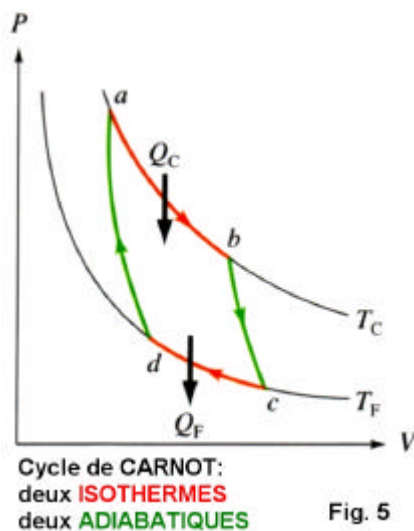
Puisque les variables d'état ont des valeurs bien définies dans un transformation quasi statique quelconque, on peut représenter un processus réversible sur un diagramme PV. Le travail accompli entre deux états d'équilibre peut s'exprimer en fonction des variables d'état. Par contre, un processus irréversible ne peut pas être représenté sur un diagramme PV

## LE CYCLE DE CARNOT

En 1824, Sadi Carnot imagina un cycle réversible d'opérations constituant un cycle idéal. Nous allons supposer que le fluide est un gaz parfait enfermé dans un cylindre par un piston sans frottement. En 1834, E. Clapeyron simplifia le cycle original de Carnot et le représenta sur un diagramme PV (figure 5). Le cycle de Carnot est formé de deux transformations **ISOTHERMES** et de deux transformations **ADIABATIQUES**.



Sadi CARNOT



1. Le système part du point « a » à la température  $T_c$ . Le gaz est soumis à une détente isotherme de « a » à « b » tout en restant en contact avec un réservoir chaud à la température  $T_c$ . Durant ce processus, l'énergie interne du gaz parfait, qui dépend uniquement de sa température, ne varie pas. Le gaz absorbe une quantité de chaleur  $|Q_c|$  et accomplit une quantité égale de travail  $W_{ab}$  sur le piston.

2. On supprime le réservoir chaud et on isole thermiquement le système du milieu extérieur. Le gaz est soumis à une détente adiabatique ( $Q = 0$ ) de « b » à « c ». Il effectue un travail positif  $W_{bc}$ , aux dépens de son énergie interne jusqu'à ce que la température tombe à  $T_f$ .

3. Le gaz est mis en contact avec un réservoir froid à la température  $T_f$  et il subit une compression isotherme de « c » à « d ». Le gaz effectue un travail négatif  $W_{cd}$  et cède une quantité égale de chaleur  $|Q_f|$  au réservoir froid.

4. La dernière étape est une compression adiabatique de « d » à « a » durant laquelle la température monte jusqu'à  $T_c$ . Le travail adiabatique effectué par le gaz est égal à l'opposé du travail de l'étape 2, c'est-à-dire  $W_{da} = -W_{bc}$ , parce que les variations d'énergie interne ont la même valeur absolue.

Le cycle étant fermé, l'énergie interne du gaz ne varie pas. Par conséquent le travail total effectué par le gaz sur le piston est égal à la quantité nette de chaleur absorbée:

$$W = |Q_c| - |Q_f|$$

Puisque  $dW = P \cdot dV$ , ce travail est représenté par l'aire délimitée par le cycle « abcd » à la figure 5.

## RENDEMENT DU CYCLE DE CARNOT

Nous allons maintenant déterminer le rendement d'un moteur thermique qui parcourt un cycle de Carnot et dont le fluide de travail est un gaz parfait. Le travail effectué par un gaz parfait dans une détente isotherme est connu. Ainsi, au cours de la transformation allant de « a » à « b », la chaleur absorbée au réservoir chaud est :

$$|Q_c| = n.R.T_c \ln\left(\frac{V_b}{V_a}\right) \quad \text{Alors que la chaleur cédée au réservoir froid est : } |Q_f| = n.R.T_f \ln\left(\frac{V_c}{V_d}\right)$$

D'après la relation  $PV^\gamma = \text{constante}$  pour une transformation adiabatique, on peut démontrer que  $TV^{\gamma-1} = \text{constante}$ .  
À l'aide de ce résultat, on peut écrire :

$$T_c.V_b^{\gamma-1} = T_f.V_c^{\gamma-1} \qquad T_c.V_a^{\gamma-1} = T_f.V_d^{\gamma-1} \qquad \text{D'où : } \frac{|Q_f|}{|Q_c|} = \frac{T_f}{T_c}$$

**LE RENDEMENT DE CARNOT  $h_c$  D'UN MOTEUR THERMIQUE EST DEFINI COMME ETANT LE TRAVAIL FOURNI DIVISE PAR LA CHALEUR ABSORBEE:**

$$h = \frac{W}{|Q_c|} = 1 - \frac{|Q_f|}{|Q_c|} = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

Le rendement de Carnot dépend uniquement des températures Kelvin des deux réservoirs. Le rendement est toujours inférieur à 100 %, sauf si  $T_f = 0$ .

### THEOREME DE CARNOT

Carnot énonça le théorème suivant:

- **TOUS LES MOTEURS REVERSIBLES FONCTIONNANT ENTRE DEUX RESERVOIRS DONNES ONT LE MEME RENDEMENT.**
- **AUCUN MOTEUR THERMIQUE CYCLIQUE N'A UN RENDEMENT PLUS ELEVE QU'UN MOTEUR REVERSIBLE FONCTIONNANT ENTRE LES DEUX MEMES RESERVOIRS THERMIQUES.**