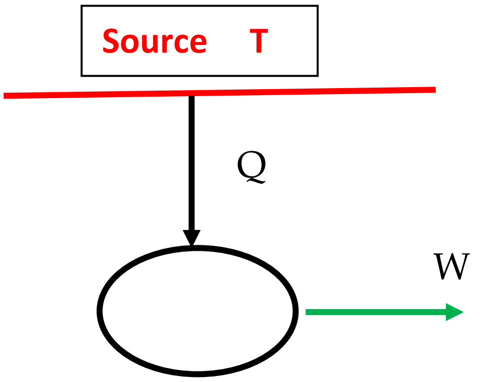
CHAPITRE VI : APPLICATIONS DES DEUX PRINCIPES DE LA THERMODYNAMIQUE

VI.1 DEFINITIONS DES MACHINES THERMIQUES

Une machine thermique un système qui échange de l'énergie sous forme de travail ou de chaleur avec l'extérieur.
L'**énoncé mathématique du deuxième principe** de la thermodynamique s'applique à toutes les transformations et tous les cycles fonctionnant avec une source de chaleur : cycle monotherme (énoncés de Clausius et Kelvin précédents) ou polythermes comme par exemple les cycles **dithermes** (cycle de Carnot par exemple). Un cycle monotherme ne fait intervenir des échanges d'énergie sous forme de chaleur Q ou de travail qu'avec une source unique de chaleur. D'après l'énoncé de Kelvin

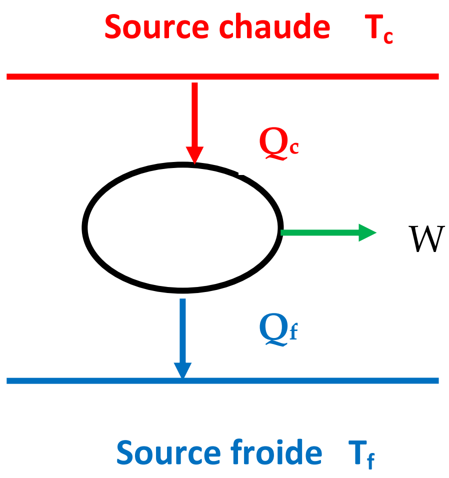
Il est impossible de prélever une quantité de chaleur Q d'une source d'énergie et de la transformer intégralement en travail.



Impossible

En effet, sur un cycle réversible ΔS = 0, , il faut nécessairement deux quantités de chaleur de signes opposés pour que le second principe soit vérifié. Ces deux quantités de chaleur doivent être échangées nécessairement entre au moins deux sources de chaleur de températures différentes.

$$\Delta S = 0 = \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f}$$

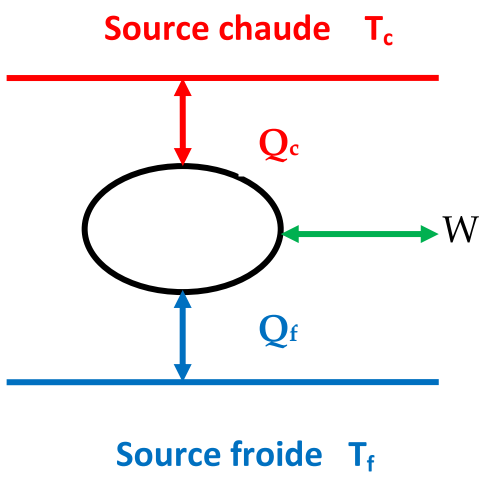


La transformation de la chaleur Q_c en travail W à partir d'une **source chaude** de température T_c n'est possible qu'à la condition **d'échanger** une partie de cette chaleur Q_c à une autre **source froide** de température T_f dans le cas d'un cycle à deux sources ou cycle ditherme. Cette quantité de chaleur est rejetée dans la source froide, elle est perdue et ne sera donc jamais transformée en travail. Cette perte va influencer le rendement de la machine.

VI.2 DIAGRAMME DE RAVEAU

Afin de d'interpréter le travail d'une machine thermique ditherme en fonction des transferts de chaleur entre la source chaude et la source froide, on utilise un diagramme appelé diagramme de Raveau, dû au physicien Camille Raveau.

	Camille Raveau (1867–1953) est un physicien français, entré à l'École normale supérieure en 1886, connu pour le diagramme de Raveau qui est un diagramme thermodynamique permettant de classer les machines thermiques dithermes. De 1904 à 1946, il est secrétaire de la rédaction des Comptes Rendus de l'Académie des sciences.



T_c : Température de la source chaude (positive).

T_f : Température de la source froide (positive).
Q_c : Quantité de chaleur échangée entre le système et la source chaude (valeur algébrique).
Q_f : quantité de chaleur échangée entre le système et la source froide (valeur algébrique).
W : travail fournit ou reçu par le système (valeur algébrique).

En utilisant le premier et le deuxième principe sur un cycle thermodynamique, on peut écrire :

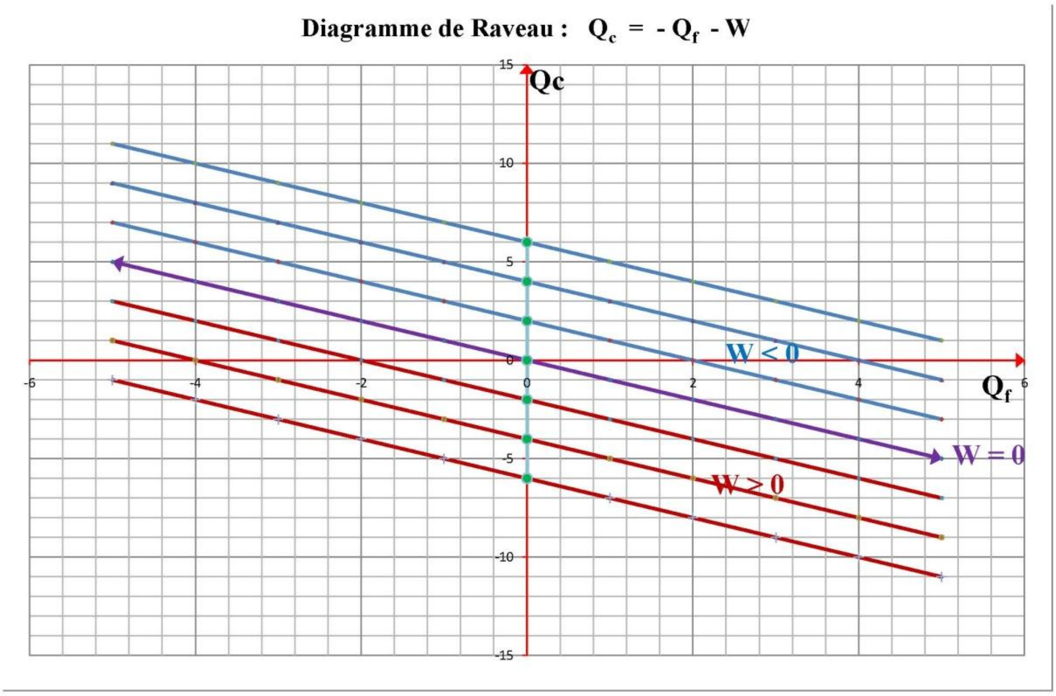
$$\Delta U = 0 \quad et \quad \Delta S = 0$$

Pour une machine ditherme, on peut donc écrire :

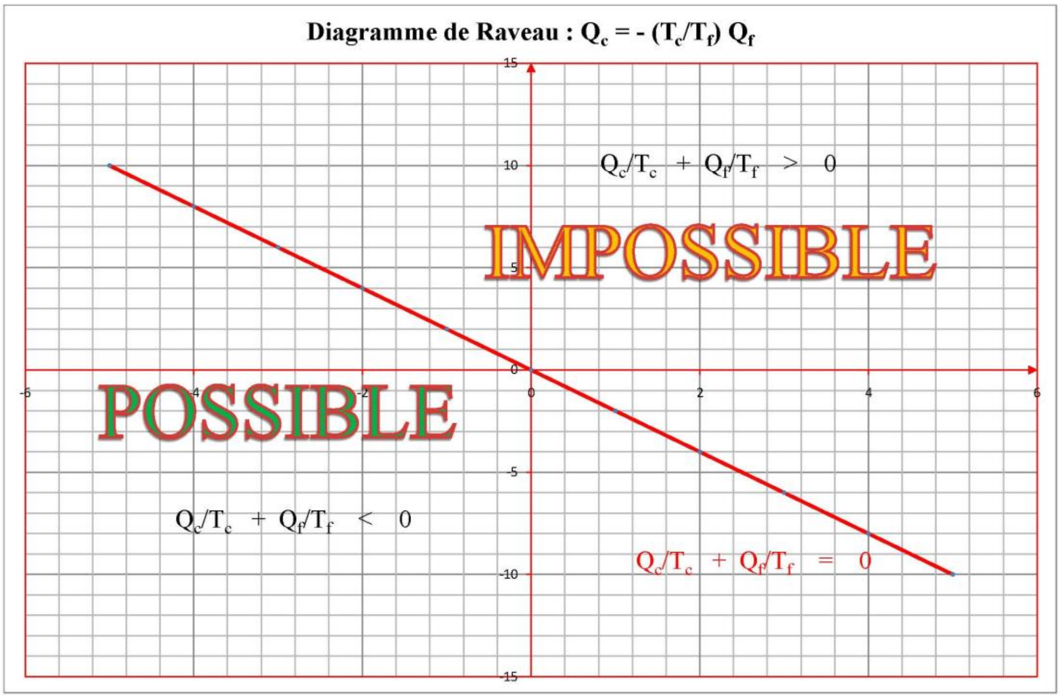
$$Qc + Qf + W = 0 \quad et \quad \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0$$

Le diagramme de Raveau représente Qc en fonction de Qf.

En utilisant le premier principe, on a : $Qc = -Qf - W$: c'est une droite de coefficient directeur -1 et ayant –W pour abscisse à l'origine. On obtient alors un ensemble de droites ayant le même coefficient directeur mais des abscisses à l'origine variables.

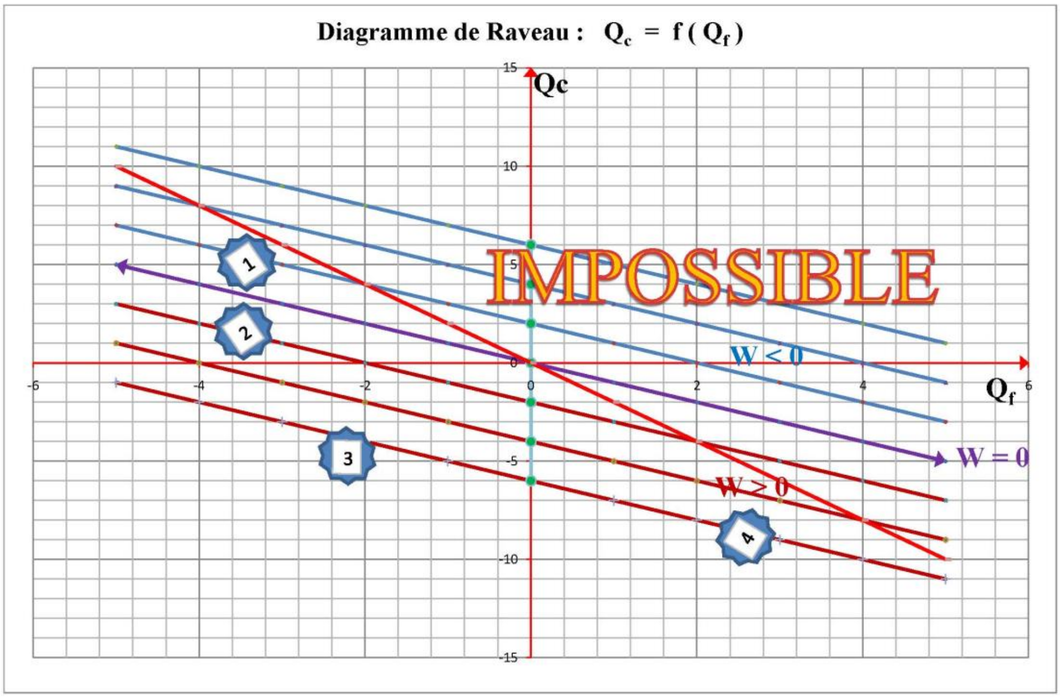


En utilisant le second principe, on a : $Q_c \quad \leq -\frac{T_c}{T_f}\ Q_f$ c'est une droite dans le cas de l'égalité, de coefficient directeur $-\frac{T_c}{T_f} < 0 \quad et \quad \frac{T_c}{T_f} > 1$ et passant par l'origine. On obtient alors la figure suivante :



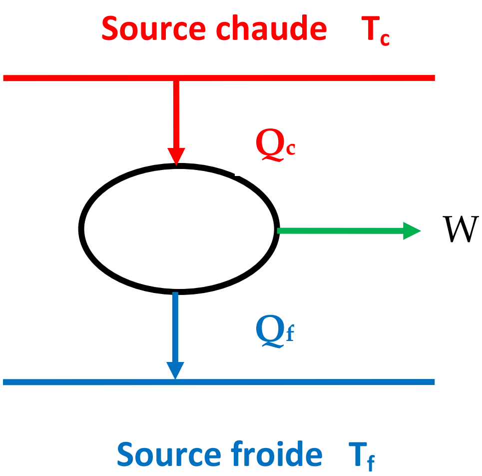
La partie « impossible » ne vérifie pas l'inégalité et donc le second principe, il n' ya pas de machines thermodynamiques fonctionnant dans cette zone.

Représentons les droites obtenues qui vérifient les deux principes.

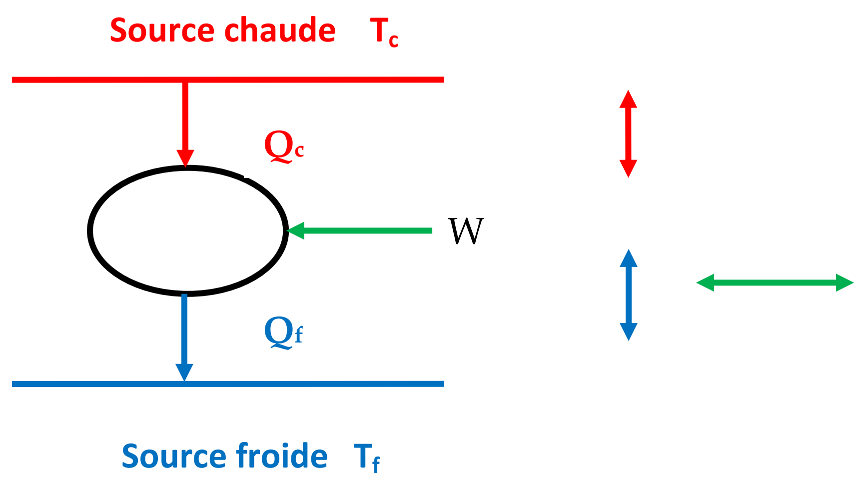


On obtient alors différentes zones suivants les signes des quantités de chaleur Q_c ; Q_f et le travail W.

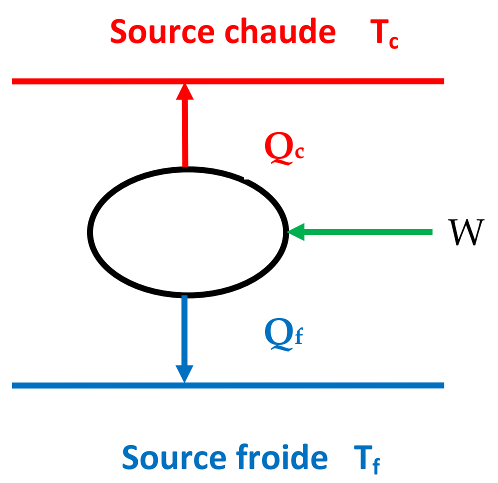
Zone	Signe des grandeurs	Type de machine : moteur
1	✓ $Q_c > 0$ ✓ $Q_f < 0$ ✓ $W < 0$	La machine reçoit de la chaleur à la source chaude, fournit du travail et cède une certaine quantité de chaleur à la source froide : c'est un **moteur thermique.**



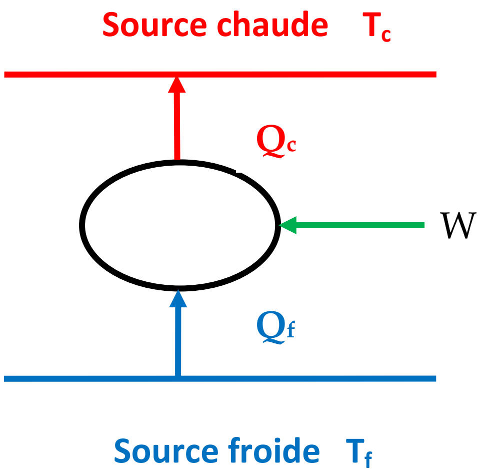
Zone	Signe des grandeurs	Types de machine : récepteur
2	✓ $Q_c > 0$ ✓ $Q_f < 0$ ✓ $W > 0$	La machine reçoit de la chaleur à la source chaude, consomme du travail et cède une certaine quantité de chaleur à la source froide, pour passer du chaud au froid, on n'a pas besoin de travail mais cela peut permettre d'accélérer les transferts thermiques



Zone	Signe des grandeurs	Types de machines : récepteur
3	✓ $Q_c < 0$ ✓ $Q_f < 0$ ✓ $W > 0$	La machine consomme du travail et cède une certaine quantité de chaleur à la source froide et à la source chaude, peu d'intérêt.



Zone	Signe des grandeurs	Type de machine : récepteur
4	✓ $Qc < 0$ ✓ $Qf > 0$ ✓ $W > 0$	La machine consomme du travail en prenant de la chaleur à la source froide et en cédant une certaine quantité de chaleur à la source chaude. C'est une machine frigorifique ou une pompe à chaleur.



On définit en thermodynamique deux types de machine :

- ✓ les moteurs qui fournissent du travail à partir de la chaleur.
- ✓ Les récepteurs qui déplacent des quantités de chaleur d'une source à l'autre à condition de leur fournir du travail.

- On définit le rendement d'un moteur par :

$$r = \frac{|gain|}{|dépense|} < 1$$

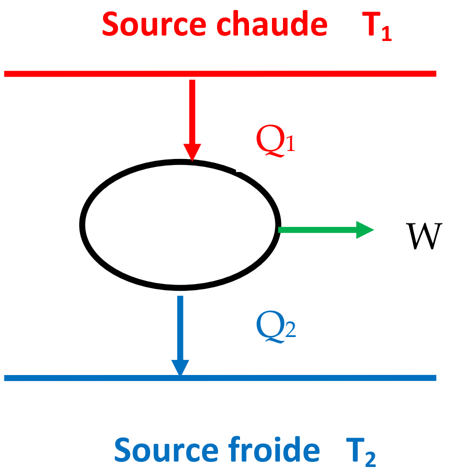
Le rendement n'a pas de dimension, ni d'unités.
Le gain étant l'énergie qui nous intéresse, ce qui est utile c'est-à-dire le travail total pour un moteur et la dépense c'est l'énergie qui est consommé par la machine.

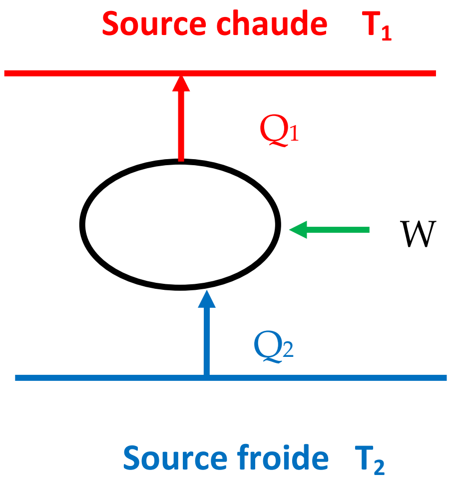
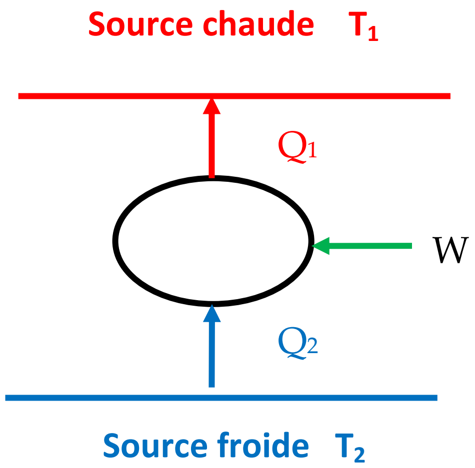
- Dans le cas d'un récepteur, on définit l'efficacité de la machine e ou son coefficient de performance COP par :

$$COP = \frac{|gain|}{|dépense|} > 1$$

Le COP n'a pas de dimension, ni d'unités.

Le gain étant l'énergie qui nous intéresse : la quantité de chaleur à la source chaude pour la pompe à chaleur ; ou la quantité de chaleur à la source froide pour les machines frigorifiques, ce qui est utile en un mot et la dépense c'est l'énergie qui est consommé par la machine.

MACHINES	SCHEMAS
MOTEURS : moteur à combustion interne (essence, diesel…), turbines à gaz, machines à vapeur, moteur Stirling ….. **$Q_1 > 0$; $Q_2 < 0$ et $W < 0$.** 1er principe : $Q_1+Q_2+W = 0$ 2eme principe : $Q_1/T_1 + Q_2/T_2 = 0$ **Rendement** : **$r = -W/Q_1$ (< 1)**	

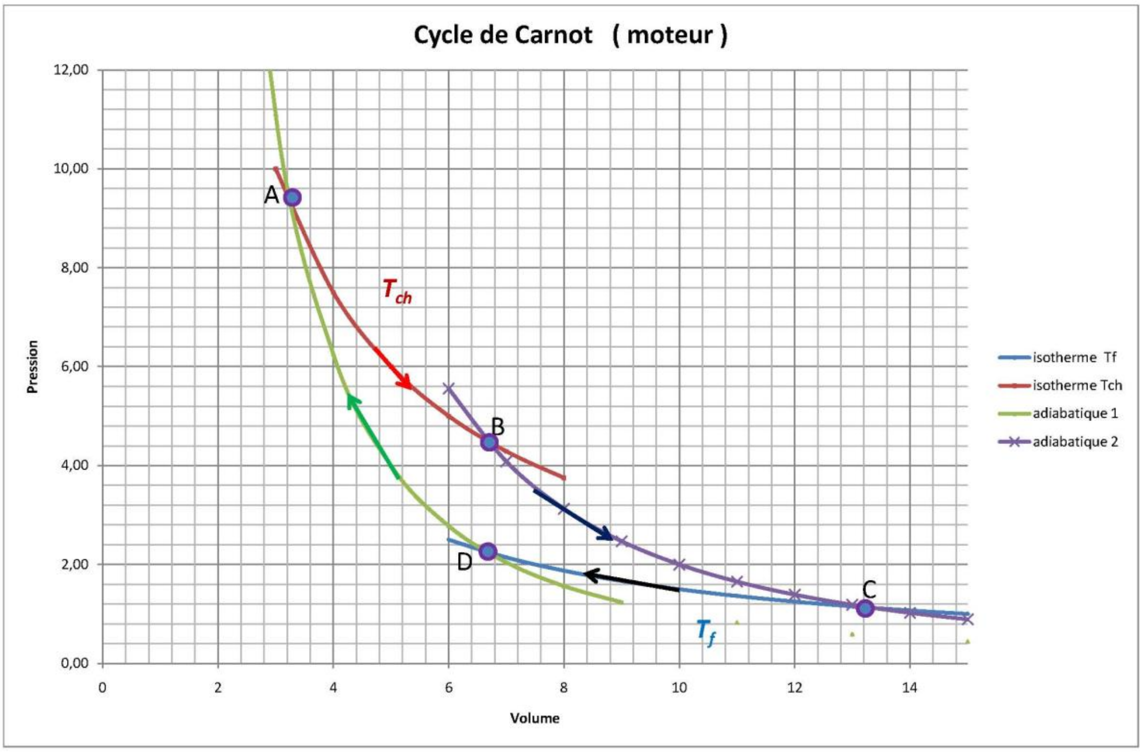
MACHINES	SCHEMAS
RECEPTEURS : ✓ Les pompes à chaleur **$Q1 > 0$; $Q2 < 0$; $W > 0$** 1er principe : $Q_1+Q_2+W = 0$ 2eme principe : $Q_1/T_1 + Q_2/T_2 = 0$ **Efficacité** ou **coefficient de performance** COP $e = -Q_1/W$	
✓ Les réfrigérateurs, les climatiseurs, les congélateurs, les chambres froides… $Q1 < 0$; $Q2 > 0$; $W > 0$ 1er principe : $Q_1+Q_2+W = 0$ 2eme principe : $Q_1/T_1 + Q_2/T_2 = 0$ **Efficacité** ou **coefficient de performance** COP $e = -Q_2/W$	

VI.3 LE CYCLE DE CARNOT

Le cycle de Carnot est un cycle ditherme **réversible**, il comporte quatre transformations : deux transformations isothermes AB et CD et de deux transformations adiabatiques réversibles appelées isentropes ou transformations isentropiques BC et DA.

Le cycle de Carnot est le cycle qui a le **rendement maximum,** c'est un cycle idéal, aucun autre cycle fonctionnant entre deux sources d'une machine thermodynamique ne peut avoir un rendement plus grand. Tous les cycles thermodynamiques sont alors comparés à ce cycle qui sert de référence.

	En 1824, Nicolas Léonard Sadi Carnot (physicien français, 1796-1832) développe les premières réflexions sur «la puissance motrice du feu et des machines propres à développer cette puissance». Ces machines servent alors de support expérimental à une réflexion scientifique et à une ébauche de théorie. En 1831, Carnot propose que la chaleur se conserve: un moteur thermique ne peut fournir du travail que s'il emprunte de la chaleur à la source chaude et en restitue à la source froide.



Pour calculer les différentes grandeurs de ce cycle, on supposera que le système comporte un **gaz parfait** qui parcourt le cycle **réversible** dans le sens indiqué par la figure : sens moteur. On utilisera les formules suivantes que l'on devra intégrer sur chaque transformation.

- ✓ Loi des gaz parfait : $PV = RT$
- ✓ Formule du travail :$\delta W = -\int PdV$
- ✓ Premier principe : $dU = \delta W + \delta Q$
- ✓ Deuxième principe :$dS = \frac{\delta Q}{T}$
- ✓ Première loi de Joule : $dU = C_V dT$
- ✓ Deuxième loi de Joule : $dH = C_P dT$

De plus chacun des quatre points A, B, C et D appartient à une isotherme et une adiabatique et donc vérifie l'équation d'une isotherme et d'une adiabatique d'un gaz parfait.

$$P_A V_A = P_B V_B = RT_{Ch} \quad (1)$$

$$P_C V_C = P_D V_D = RT_f \quad (2)$$

$$P_A V_A^{\gamma} = P_D V_D^{\gamma} \quad (3)$$

$$P_B V_B^{\gamma} = P_C V_C^{\gamma} \quad (4)$$

$$\frac{V_B}{V_A} = \frac{P_A}{P_B} \; d'après \quad (1)$$

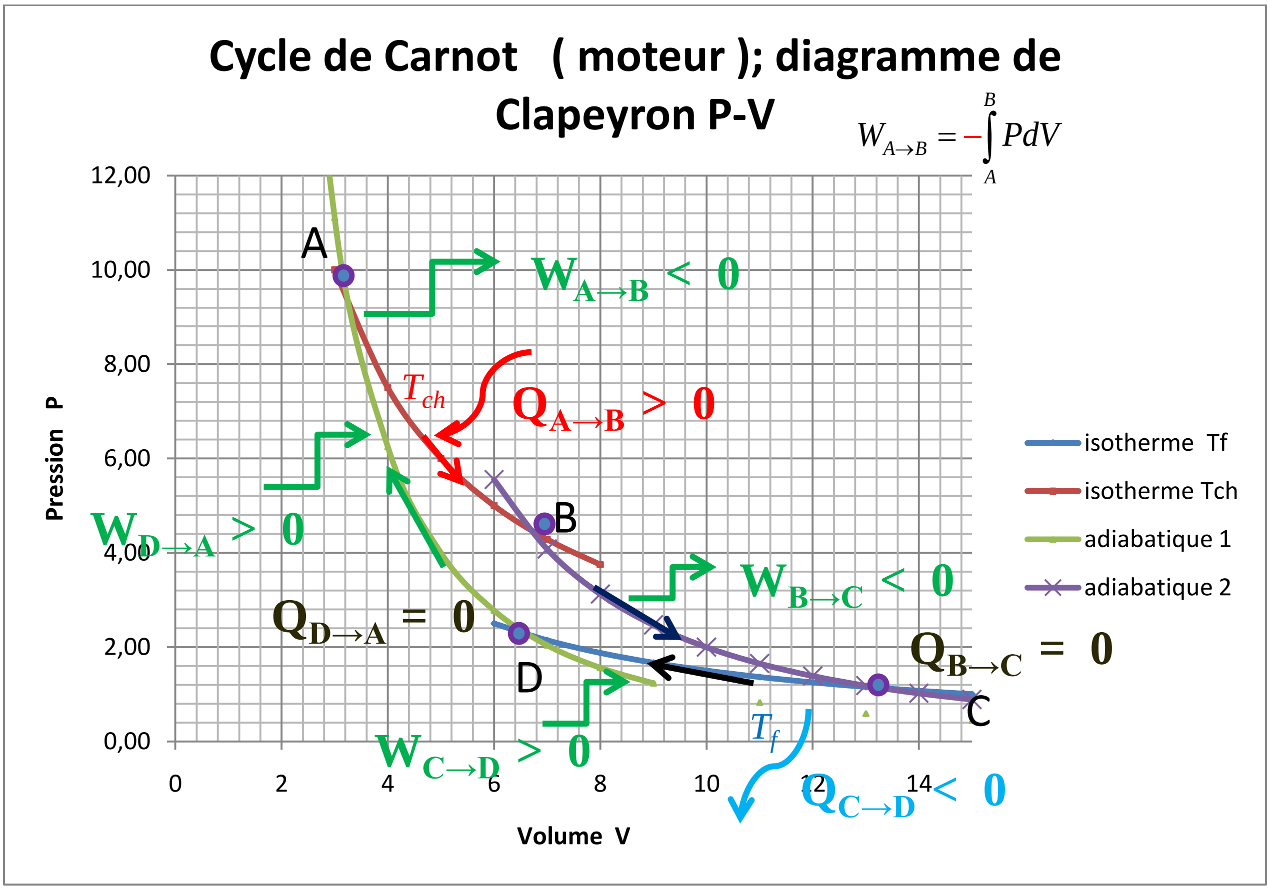
$$P_A = P_D \frac{V_D^{\gamma}}{V_A^{\gamma}} \quad d'après (3)$$

$$P_B = P_C \frac{V_C^{\gamma}}{V_B^{\gamma}} \quad d'après (4)$$

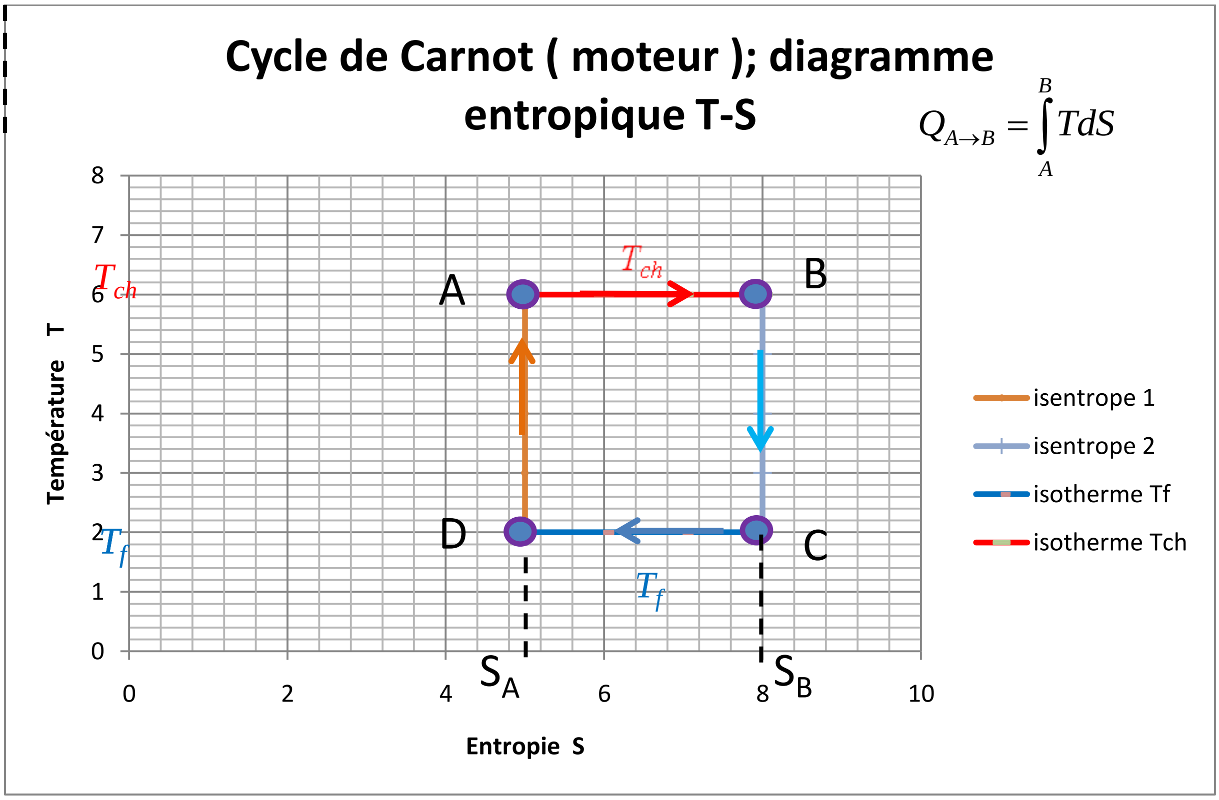
D'où : $\frac{V_B}{V_A} = \frac{P_A}{P_B} = \frac{P_D \frac{V_D^{\gamma}}{V_A^{\gamma}}}{P_C \frac{V_C^{\gamma}}{V_B^{\gamma}}} \quad avec \; \frac{P_D}{P_C} = \frac{V_C}{V_D} \; d'après (2)$

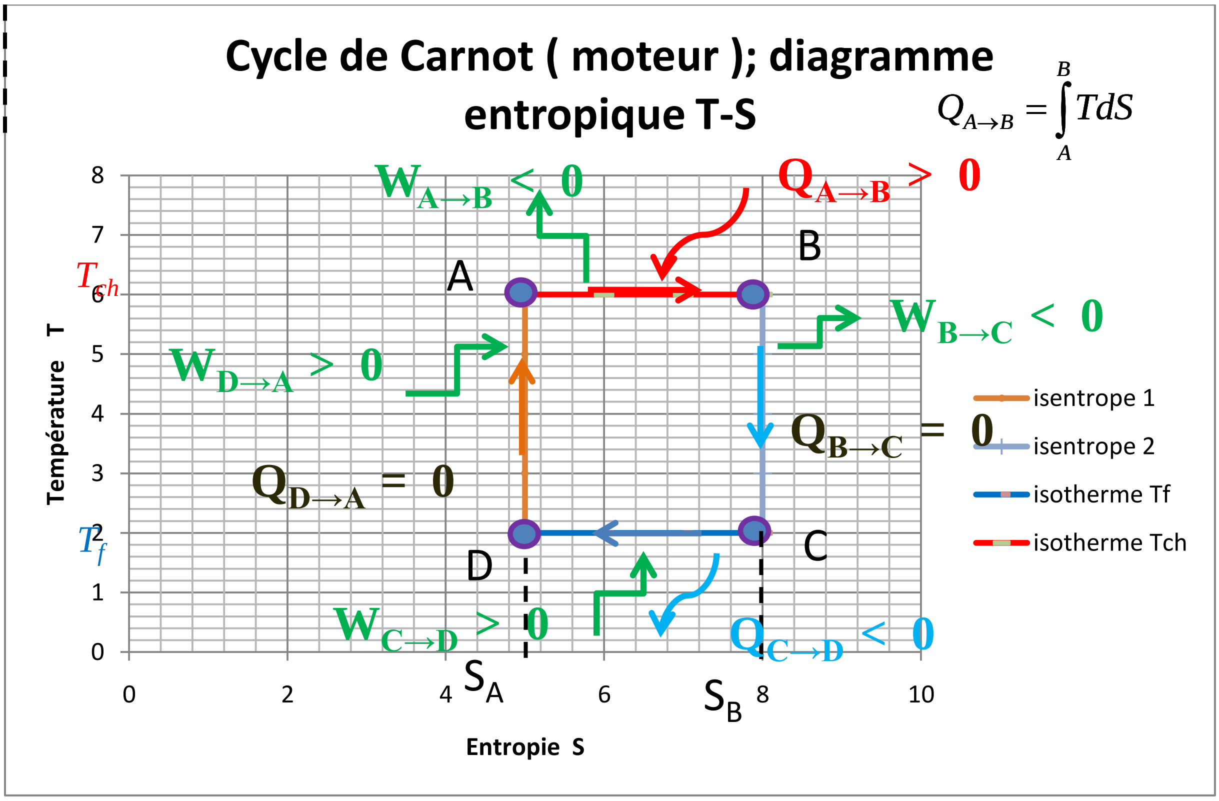
On obtient alors :

$$\frac{V_B}{V_A} = \frac{V_C}{V_D}$$



Ce diagramme représente le cycle de Carnot moteur, on a aussi représenté les quantités de chaleur échangées avec l'extérieur avec leurs signes.




Cycle de Carnot (moteur); diagramme entropique T-S
$Q_{A\to B} = \int_A^B TdS$
$W_{A\to B} < 0$
$Q_{A\to B} > 0$
A
B
C
D
T_{ch}
T_f
$W_{D\to A} > 0$
$W_{B\to C} < 0$
$Q_{B\to C} = 0$
$Q_{D\to A} = 0$
$W_{C\to D} > 0$
$Q_{C\to D} < 0$
S_A
S_B
Température T
Entropie S
isentrope 1
isentrope 2
isotherme Tf
isotherme Tch

Grandeur → Transformation ↓	ΔU	ΔH	ΔS	W	Q
Isotherme ***AB*** $T = T_{ch}$	0	0	$+R\ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)$ $+(S_B - S_A)$	$-RT_{ch}\ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)$ $-T_{ch}(S_B - S_A)$	$+RT_{ch}\ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)$ $+T_{ch}(S_B - S_A)$
Adiabatique ***BC*** $\delta Q = 0$	$-C_V(T_{ch} - T_f)$ $-\frac{1}{\gamma - 1}(P_C V_C - P_B V_B)$	$-C_P(T_{ch} - T_f)$	0	$-C_V(T_{ch} - T_f)$ $-\frac{1}{\gamma - 1}(P_C V_C - P_B V_B)$	0
Isotherme ***CD*** $T = T_f$	0	0	$-R\ln\left(\frac{V_C}{V_D}\right)$ $-(S_C - S_D)$	$+RT_f\ln\left(\frac{V_C}{V_D}\right)$ $+T_f(S_C - S_D)$	$-RT_f\ln\left(\frac{V_C}{V_D}\right)$ $-T_f(S_C - S_D)$
Adiabatique ***DA*** $\delta Q = 0$	$+C_V(T_{ch} - T_f)$ $+\frac{1}{\gamma - 1}(P_A V_A - P_D V_D)$	$+C_P(T_{ch} - T_f)$	0	$+C_V(T_{ch} - T_f)$ $+\frac{1}{\gamma - 1}(P_A V_A - P_D V_D)$	0
Cycle	0	0	0	$-R(T_{ch} - T_f)\ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)$	$+R(T_{ch} - T_f)\ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)$

$$\frac{V_B}{V_A} = \frac{V_C}{V_D}$$

VI.4 RENDEMENT DE CARNOT

VI.4.1 RENDEMENT DE CARNOT MOTEUR

Le rendement de Carnot r est défini comme étant le rapport entre le gain et la dépense. Le gain correspond à ce que fournit la machine, du travail dans le cas d'un moteur, et la dépense la quantité de chaleur utilisé par la machine et donc dépensé et consommé. L rendement est toujours inférieur à 1 et il est toujours positif.

$$r = \frac{gain}{dépense} = \frac{travail\ total}{quantité\ de\ chaleur\ à\ la\ source\ chaude} = \frac{|W_T|}{Q_{A\to B}}$$

$$\boldsymbol{r = \frac{|W_T|}{Q_{A\to B}} = \frac{\left|-R(T_{ch} - T_f)ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)\right|}{+RT_{ch}ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)} = \frac{T_{ch} - T_f}{T_{ch}} = 1 - \frac{T_f}{T_{ch}}}$$

VI.4.2 RENDEMENT DE CARNOT RECEPTEUR

Dans le d'un récepteur, on a deux possibilités suivant la destination de la machine : machine frigorifique et donc produisant du froid ou pompe à chaleur produisant de la chaleur. Les deux machines fonctionnent suivant le même principe. Dans le cas d'un récepteur, on ne parle plus de rendement mais d'efficacité e ou de coefficient de performance COP. L'efficacité d'un récepteur est toujours supérieure à 1.

$$e = \frac{gain}{dépense} = \frac{chaleur\ à\ la\ source\ froide\ ou\ chaude}{travail\ total} = \frac{|Q_{ch\ ou\ f}|}{W_T}$$

- ✓ Machine frigorifique

$$\boldsymbol{e == \frac{|Q_f|}{W_T} = \frac{\left|+RT_f ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)\right|}{R(T_{ch} - T_f)ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)} = \frac{T_f}{T_{ch} - T_f}}$$

- ✓ Pompe à chaleur

$$\boldsymbol{e == \frac{|Q_{ch}|}{W_T} = \frac{\left|+RT_{ch} ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)\right|}{R(T_{ch} - T_f)ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)} = \frac{T_{ch}}{T_{ch} - T_f}}$$