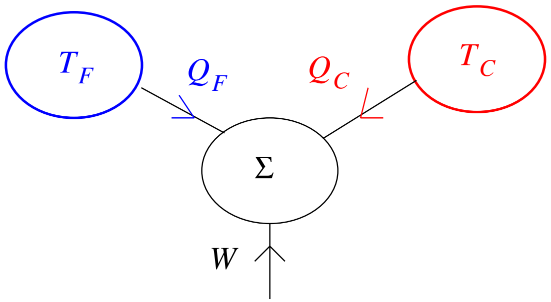
Machines thermiques

1 Thermodynamique des machines cycliques dithermes

On s'intéresse à un système (Σ) fermé évoluant de façon **cyclique** en recevant un travail W, un transfert thermique Q_c d'une source chaude à la température T_c et un transfert thermique Q_F d'une source froide à la température T_F.



1.1 Que disent les deux premiers principes ?

On applique les deux premiers principes au système (Σ) au cours de son évolution cyclique.

⋆ ***Le premier principe*** : $\Delta U = W + Q_c + Q_F = 0 \quad$ (cycle)

⋆ ***Le deuxième principe*** : $0 = \Delta S \geq \dfrac{Q_c}{T_c} + \dfrac{Q_F}{T_F} \quad$ (= si réversible)

On en déduit le système d'équations imposé par les deux premiers principes :

$$\boxed{W + Q_c + Q_F = 0 \quad \text{et} \quad \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0}$$

1.2 Énoncé historique du deuxième principe

Le système précédent conduit à l'énoncé historique du deuxième principe proposé par Kelvin :

Il n'existe pas de moteur **cyclique** monotherme.

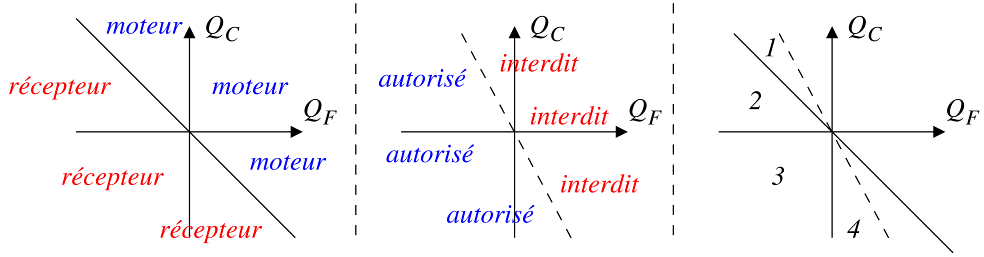
Démonstration : avec une seule source de chaleur, le système d'équations donne :

$$Q + W = 0 \quad \text{et} \quad \frac{Q}{T_0} \leq 0$$

Ce qui impose $W \geq 0$, un travail positif est reçu, le système (Σ) est un récepteur.

1.3 Les différentes machines envisageables

À partir de ce système d'équations, on envisage les machines (motrices ou réceptrices) qui présentent un intérêt pratique. Pour cela, on considère le « **diagramme de Raveau** » qui représente Q_c en fonction de Q_F :



On représente deux droites dans ce diagramme :

— $Q_c + Q_F = 0$ (trait plein) soit $Q_c = -Q_F$ qui sépare les moteurs des récepteurs.

— $Q_c/T_c + Q_F/T_F = 0$ (trait pointillé) soit $Q_c = -Q_F T_c/T_F$ qui indique les fonctionnements compatibles avec le deuxième principe.

On identifie quatre fonctionnements possibles selon les signes de W, Q_c et Q_F ; seuls les cas 1 (moteur) et 4 (machines frigorifiques, pompe à chaleur) présentent un intérêt pratique.

1.4 Rendements limites des machines thermiques

De manière générale le rendement r est défini par : $\boxed{r = \dfrac{\text{énergie utile}}{\text{énergie dépensée}}}$

Le cas 1 : fonctionnement moteur, $W < 0$, $Q_c > 0$, $Q_F < 0$.

$W < 0$ (Σ fournit un travail à l'extérieur), $Q_c > 0$ (le coût) et $Q_F < 0$ (les pertes, on chauffe la source froide).
L'extérieur reçoit un travail grâce au transfert thermique cédée par la source chaude.
On définit le rendement du moteur $r = \dfrac{-W}{Q_c}$.

Grâce au deux premiers principes, on en déduit :

$$\boxed{r_{moteur} = \frac{-W}{Q_c} = \frac{Q_c + Q_F}{Q_c} = 1 + \frac{Q_F}{Q_c} \leq \left(1 - \frac{T_F}{T_c}\right) = r_{Carnot}}$$

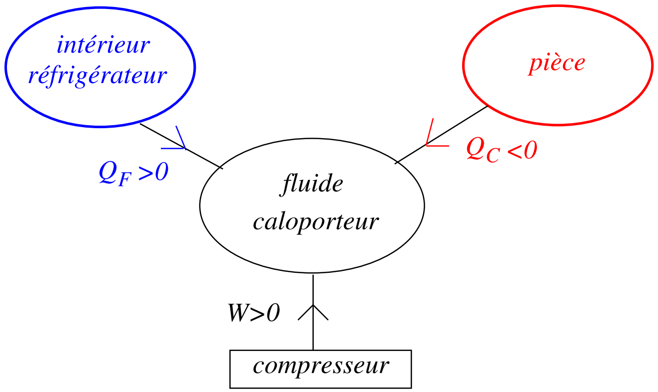
Remarques :

⋆ r_{Carnot} est le rendement maximal d'un moteur pour le couple (T_F, T_c), c'est le rendement d'un moteur fonctionnant de manière réversible.
⋆ $r_{Carnot} < 1$ car $T_F < T_C$, on chauffe la source froide ($Q_F < 0$).
⋆ r_{Carnot} est d'autant plus élevé que T_F est faible par rapport à T_c ; cependant une température T_c trop grande peut détériorer les composants ($T_{\text{fus}}(Fer) = 2200$ K) ; en pratique les rendements des moteurs thermiques dépassent rarement 33% sauf à réutiliser l'énergie cédée à la source froide.
⋆ $r_{moteur} < r_{Carnot}$ et se calcule par la donnée de Q_c et Q_F.

Le cas 4 : fonctionnement récepteur : $W > 0$, $Q_c < 0$, $Q_F > 0$.

On fournit un travail pour s'opposer à l'évolution naturelle et effectuer le transfert thermique de la source froide vers la source chaude ! Il y deux applications : les machines frigorifiques (refroidir la source froide donc Q_F max), la pompe à chaleur (chauffer une pièce donc $-Q_c$ max).

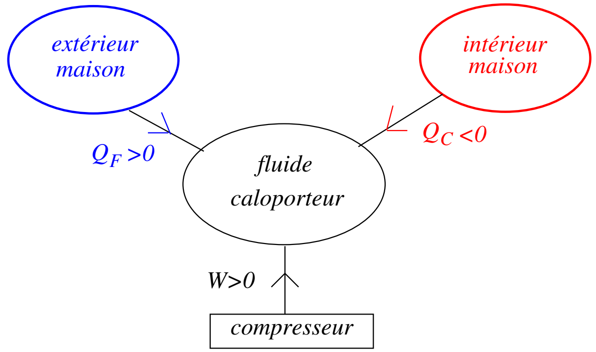
Réfrigérateur ditherme :



On définit l'efficacité $\eta = \dfrac{Q_F}{W}$; les deux premiers principes conduisent à :

$$\boxed{\eta = \frac{Q_F}{W} = \frac{Q_F}{-Q_c - Q_F} = \frac{1}{-1 - \dfrac{Q_c}{Q_F}} \leq \frac{1}{\dfrac{T_c}{T_F} - 1} = \frac{T_F}{T_c - T_F} = \eta_{max}}$$

Pompe à chaleur :



On définit l'efficacité $\eta = \dfrac{-Q_c}{W}$; les deux premiers principes conduisent à :

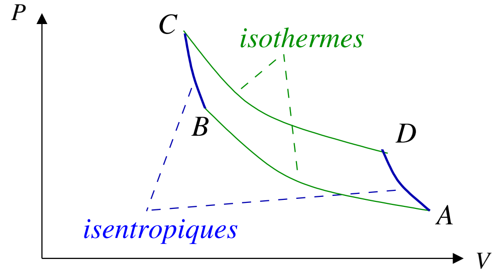
$$\eta = \frac{-Q_c}{W} \leq \frac{T_c}{T_c - T_F} = \eta_{max}$$

Remarques :

→ avec $T_F = 5°$C et $T_c = 19°$, $\eta_{max} \simeq 21$; il ne faut pas être surpris d'un rendement supérieur à 1 ; le transfert thermique nécessaire pour chauffer la pièce est essentiellement prélevé sur l'atmosphère, cette énergie thermique n'est pas payée par l'utilisateur ;
→ Le rendement réel d'une pompe à chaleur est nettement inférieur à la valeur du cycle hypothétique et réversible de Carnot.

1.5 Le cycle de Carnot

C'est un cycle idéalisé réversible qui permet d'atteindre le rendement maximal. Pour obtenir la réversibilité, les deux évolutions monothermes doivent être isothermes, les autres évolutions (une compression et une détente) doivent être réversibles et adiabatiques donc isentropiques.

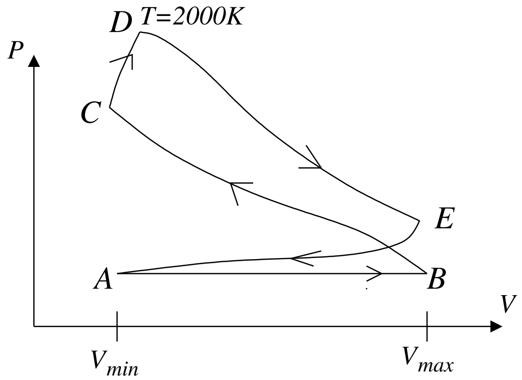


Ce cycle se caractérise par une aire faible (W faible) et un caractère réversible (transformations lentes) ; en conséquence, si son rendement est maximal, la puissance délivrée est faible.

2 Le moteur à explosion

2.1 Présentation

On considère le déplacement d'un piston dans un cylindre muni de soupapes d'admission et d'échappement. On présent le diagramme de Watt du piston :



Les différentes phases :

— ***phase 1*** AB : admission du mélange (air + carburant), ouverture de la soupape d'admission à P et T ambiant, le piston se déplace jusqu'à V_{max} ;

— ***phase 2*** BC : les soupapes se referment, compression jusqu'à $V_C = V_A$;

— ***phase 3*** CDE : explosion + détente (la phase motrice) ; une étincelle électrique déclenche la réaction chimique de combustion, on atteint la pression maximale, le gaz se détend ; l'énergie libérée par la détente repousse le piston (temps moteur) ;

— ***phase 4*** EA : échappement : la soupape d'échappement s'ouvre, le piston chasse les gaz brûlés.

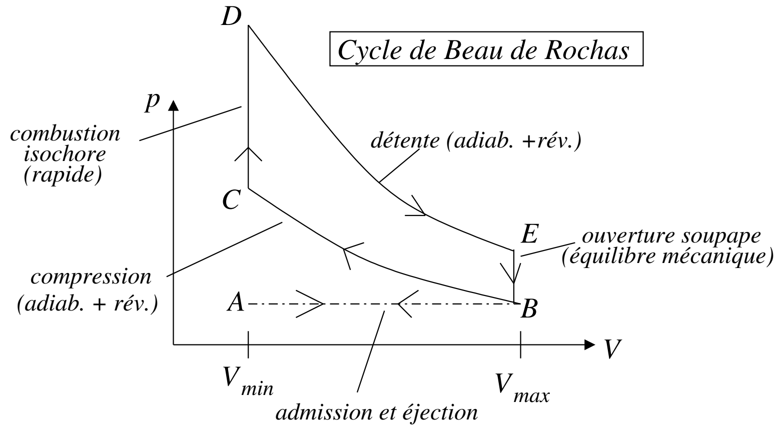
2.2 Modélisation

Afin de faciliter les calculs, on adopte les simplifications suivantes :

— le mélange (air-carburant) est assimilé à un gaz parfait diatomique et le gaz ne subit pas d'évolution chimique (en fait une faible partie de O_2 réagit).

— on modélise la phase de combustion du carburant dans l'air par une source chaude fictive l'amenant à T_D.

— on appelle $a = V_{max}/V_{min}$ le taux de compression ou rapport volumique.



2.3 Calcul du rendement

On rappelle l'expression du rendement pour un moteur :

$$r = -W/Q_c \text{ , avec } \quad W + Q_F + Q_c = 0$$

On en déduit :

$$r = \frac{Q_F + Q_c}{Q_c} = 1 + \frac{Q_F}{Q_c}$$

— Pour les évolutions isochores :

$$\Delta U_{CD} = 0 + Q_c \quad \text{, soit} \quad Q_c = \frac{nR}{\gamma - 1}(T_D - T_C)$$

$$\Delta U_{EB} = 0 + Q_F \quad \text{, soit} \quad Q_F = \frac{nR}{\gamma - 1}(T_B - T_E)$$

Ce qui donne pour le rendement :

$$r = 1 + \frac{T_B - T_E}{T_D - T_C}$$

— Pour les évolutions isentropiques, on applique la loi de Laplace :

$$T_C V_C^{\gamma-1} = T_B V_B^{\gamma-1} \quad \text{soit} \quad T_C = T_B a^{\gamma-1}$$

$$T_D V_D^{\gamma-1} = T_E V_E^{\gamma-1} \quad \text{soit} \quad T_D = T_E a^{\gamma-1}$$

— Et finalement pour le rendement :

$$r = 1 + \frac{T_B - T_E}{(T_E - T_B)a^{\gamma-1}} = 1 - \frac{1}{a^{\gamma-1}}$$

Remarques :

→ $+a$ est grand, + le rendement est bon, cependant la durée du cycle augmente et la puissance peut diminuer.

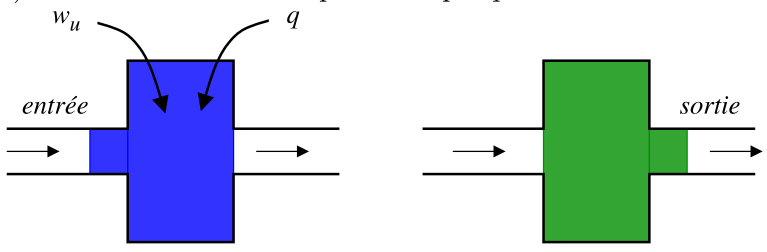
→ Avec $a = 9$, $r = 58\% \leq r_{Carnot} = 1 - 300/1500 \simeq 80\%$ (irréversibilité des transferts thermiques) ; $r_{\text{réel}} \simeq 25\%$ (transfert mécanique, pertes par frottement).

3 Machine réfrigérante

On s'intéresse ici au cas d'un réfrigérateur ; le principe de fonctionnement serait sensiblement le même pour un climatiseur ou une pompe à chaleur.

3.1 Premier principe pour un fluide en écoulement

On considère un fluide en écoulement stationnaire traversant une conduite au sein de laquelle il peut recevoir un travail utile massique w_u (travail autre que les forces de pression) et un transfert thermique massique q.



système à l'état initial *système à l'état final*

On admettra la relation suivante qui résulte du travail des forces de pression en amont et en aval. Ce résultat sera démontré en seconde année.

> Pour un fluide en écoulement stationnaire traversant une conduite au sein de laquelle il reçoit un travail utile massique w_u et un transfert thermique massique q, le premier principe s'écrit :
> $$\Delta h = h_s - h_e = w_u + q$$
> avec h_s l'enthalpie massique en sortie et h_e l'enthalpie massique du fluide en entrée.

3.2 Description de la machine

Le but est de refroidir la source froide (l'intérieur du réfrigérateur) en fournissant un travail moteur (*via* le compresseur) au système qui est constitué d'un fluide caloporteur (ici de l'ammoniac). On sait que la source chaude (la pièce) sera chauffée.

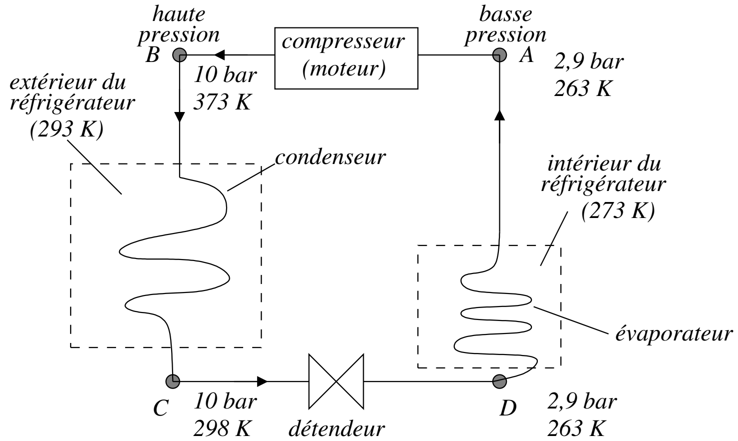
Les différentes étapes (Cf. diagramme en annexe à compléter)

→ Phase AB : le fluide initialement sous forme de vapeur sèche subit une compression adiabatique qui l'amène dans l'état B ($P_B = 10$ bar, $T_B = 373$ K).

→ Phase BC : au contact de la source chaude, le fluide, plus chaud que la source chaude, cède un transfert thermique et se condense pour atteindre un état liquide juste saturant ($P_C = 10$ bar, $T_C = 298$ K).

→ Phase CD : l'ammoniac initialement sous forme liquide subit une détente isenthalpique ; au point D le fréon se trouve sous forme diphasé, l'intérêt est de l'amener à une température inférieure à celle de la source froide ($T_B = 263$ K $< T_{int} = 273$ K).

→ Phase DA : au contact de la source froide, l'ammoniac reçoit un transfert thermique positif, l'énergie fournie est utilisée pour vaporiser une partie du fréon jusqu'au point A.



3.3 Étude thermodynamique

Sur chacune des phases, on applique le premier principe industriel :

→ Phase AB : compression adiabatique

$$w_{comp} = \Delta h_{AB} = h_B - h_A = 1826 - 1593 \quad \Rightarrow \quad w_{comp} = 233 \text{ kJ/kg}$$

Sur le diagramme, on note que cette compression adiabatique est associée à une augmentation de l'entropie exprimant le caractère irréversible de cette évolution.

→ Phase BC : condenseur, refroidissement isobare.

$$q_{BC} = q_{ch} = \Delta h_{BC} = h_C - h_B = 461 - 1826 \quad \Rightarrow \quad q_{ch} = -1365 \text{ kJ/kg}$$

→ Phase CD : détente adiabatique, $\Delta h_{CD} = h_D - h_C = 0$

On peut en déduire le titre massique en vapeur en D : $w_v \simeq 13\%$

→ Phase DA : évaporateur, réchauffement isobare

$$q_{DA} = q_{fr} = \Delta h_{DA} = h_A - h_D = 1593 - 461 \quad \Rightarrow \quad q_{fr} = 1132 \text{ kJ/kg}$$

On peut alors déterminer l'efficacité thermodynamique de la machine réelle :

$$\eta = \frac{q_f}{w_{compr}} = \frac{1132}{233} \quad \Rightarrow \quad \underline{\eta \simeq 4,9}$$

Pour cette machine, le rendement Carnot serait associé à des sources aux températures respectives $T'_F = 263$ K et $T'_C = 298$ K afin que les échanges thermiques soient isothermes et non monothermes.

$$\eta_{Carnot} = \frac{T'_F}{T'_C - T'_F} = \frac{263}{298 - 263} \quad \Rightarrow \quad \underline{\eta_{Carnot} \simeq 7,5}$$

Capacités exigibles

→ Application du premier principe et du deuxième principe aux machines thermiques cycliques dithermes : rendement, efficacité, théorème de Carnot.
Donner le sens des échanges énergétiques pour un moteur ou un récepteur thermique ditherme.
Analyser un dispositif concret et le modéliser par une machine cyclique ditherme.
Définir un rendement ou une efficacité et la relier aux énergies échangées au cours d'un cycle.
Justifier et utiliser le théorème de Carnot.
Citer quelques ordres de grandeur des rendements des machines thermiques réelles actuelles.

→ Exemples d'études de machines thermodynamiques réelles à l'aide de diagrammes (P, h).
Utiliser le 1er principe dans un écoulement stationnaire sous la forme $h_2 - h_1 = w_u + q$, pour étudier une machine thermique .

Applications directes

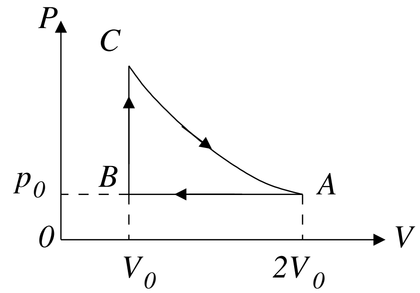
AD 1. Moteur réel

Un moteur réel fonctionne entre deux sources, l'une à $T_f = 400$ K, l'autre à $T_{ch} = 650$ K. Ce moteur produit 500 J par cycle, pour 1500 J de transfert thermique fourni.

1. Comparer son rendement à celui d'une machine de Carnot fonctionnant entre les deux mêmes sources.
2. Calculer l'entropie créée par cycle, notée S_c.

AD 2. Rendement d'un cycle

Un système constitué par 1,0 mole d'un gaz parfait de coefficient $\gamma = 1,4$ suit le cycle défini par le diagramme de Watt (Cf. dessin représenté ci-dessous). La phase $C \rightarrow A$ est une détente adiabatique réversible. Dans l'état A, la température est T_0.



1. Exprimer les températures T_B et T_C en fonction de T_0. Pour déterminer T_C on appliquera la loi de Laplace entre C et A.
2. En utilisant le sens de parcours du cycle, déterminer la nature de cette machine thermique (moteur ou récepteur). Montrer que le rendement η s'exprime en fonction des différents échanges énergétiques selon :
$$\eta = 1 + \frac{Q_{AB}}{Q_{BC}}$$
3. Exprimer le rendement η en fonction de γ et des températures T_A, T_B et T_C, puis uniquement en fonction de γ. Calculer η.
4. Quelles sont les températures de la source chaude et de la source froide avec lesquelles les échanges thermiques se font, en supposant le cycle ditherme ? En déduire le rendement maximal η_{max} que l'on peut espérer atteindre.