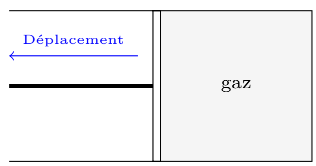
Machines thermiques

1 Machines thermiques dithermes

1.1 Moteur thermique

La problématique des moteurs thermiques est simple : comment convertir la chaleur en travail ? Cette conversion peut se faire dans des dispositifs très variés mais qui ont tous au moins un point commun : utiliser la détente d'un gaz.

On va commencer par imaginer quelque chose de très rudimentaire pour illustrer les choses : on a enfermé un gaz (disons de l'air) dans un cylindre fermé par un piston mobile (une seringue par exemple) et on dispose d'un moyen de chauffer le gaz.



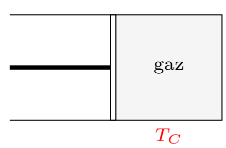
On chauffe le gaz : la température augmente, donc la pression augmente et le piston se déplace vers la gauche. On a donc, en chauffant (transfert thermique) obtenu un mouvement macroscopique, on a donc bien réalisé la conversion de chaleur en travail.

A-t-on cependant réalisé un moteur ? Pas encore, car un moteur ne doit pas seulement exercer une poussée, il doit pouvoir fonctionner en continu. Cela implique de revenir à la situation initiale pour pouvoir effectuer une nouvelle détente, mais si on comprime juste après la détente les deux opérations vont se compenser et on n'a rien gagné... La solution est de *refroidir* avant de comprimer pour afin revenir à la situation initiale.

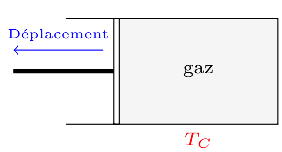
On met ainsi en évidence deux points importants :
— la nécessité de *chauffer* mais aussi de refroidir
— la ncessité d'un fonctionnement *cyclique*

On peut ainsi envisager le fonctionnement rudimentaire suivant :

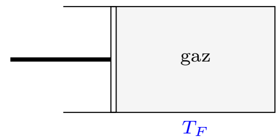
1. Chauffage : le piston étant bloqué, on chauffe le gaz jusqu'à T_C (on met en contact thermique avec le gaz un thermostat à la température T_C).



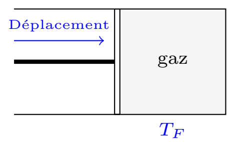
2. Détente : le volume augmente, la température reste à T_C (le thermostat T_C reste en contact)



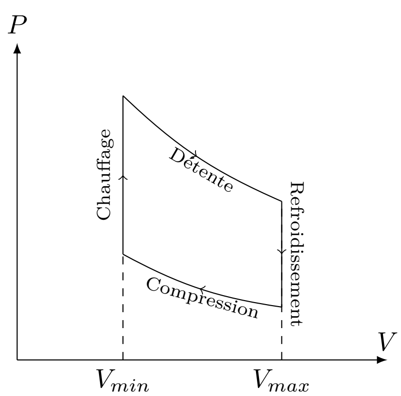
3. Refroidissement : Le piston est bloqué et on refroidit le gaz jusqu'à T_F (contact thermique avec un thermostat à la température T_F).



4. Compression : Le volume diminue à la température T_F (toujours au contact du thermostat T_F)



Cette description permet d'envisager un premier exemple de *cycle d'évolutions* (on dit en général *cycle* tout court), ici constitué de deux évolutions isochores et deux évolutions isothermes :



Il est important de noter l'ordre des opérations - c'est toujours le même pour un moteur thermique :

$$chauffage \quad \rightarrow \quad détente \quad \rightarrow \quad refroidissement \quad \rightarrow \quad compression$$

1.2 Travail reçu par le fluide lors d'un cycle

Pour obtenir un moteur thermique, il faut que le travail «récupéré »par le piston lors de la détente soit supérieur à celui qui est dépensé pour la compression (c'est tout l'intérêt de refroidir avant la compression). Dans notre exemple où la compression et la détente sont isothermes, on a :

Pour l'étape (2) (la détente) : $W_2 = -n\,R\,T_C\,\ln\left(\dfrac{V_{max}}{V_{min}}\right)$

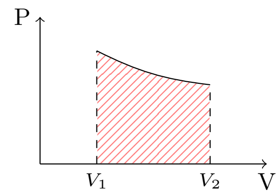
Pour l'étape (4) (la compression) : $W_4 = -n\,R\,T_F\,\ln\left(\dfrac{V_{min}}{V_{max}}\right)$

On a bien $|W_2| > |W_4|$: le travail gagné par le piston lors de la détente est plus élevé que celui qu'il cède lors de la compression. Attention aux conventions d'algébrisation : le travail calculé correspond à ce qui est *reçu par le fluide*, donc si on veut que le fluide cède effectivement du travail au piston, le travail reçu par le fluide doit être négatif, et ici on a bien $W = W_2 + W_4 < 0$.

D'une manière générale, le travail reçu par le fluide au cours d'un cycle est égal à l'aire du cycle, le signe dépendant du sens de parcours du cycle :

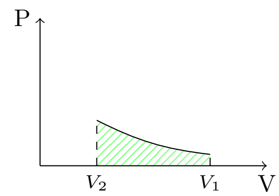
Cycle dans le sens horaire (c'est le cas pour un moteur moteur) : W = -aire du cycle
Cycle dans le sens trigonométrique : W = aire du cycle

En effet, pour la détente :



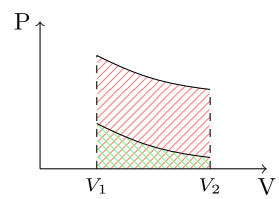
$$W = -\int_{V_1}^{V_2} P\,dV = -aire\ rouge$$

Pour la compression :



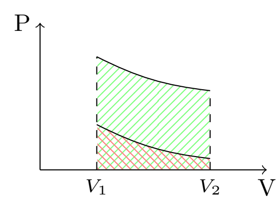
$$W = -\int_{V_2}^{V_1} P\,dV = \int_{V_1}^{V_2} P\,dV = aire\ verte$$

Donc, pour un cycle en sens horaire,



$$W = -(aire\ rouge) + (aire\ verte) = -aire\ du\ cycle$$

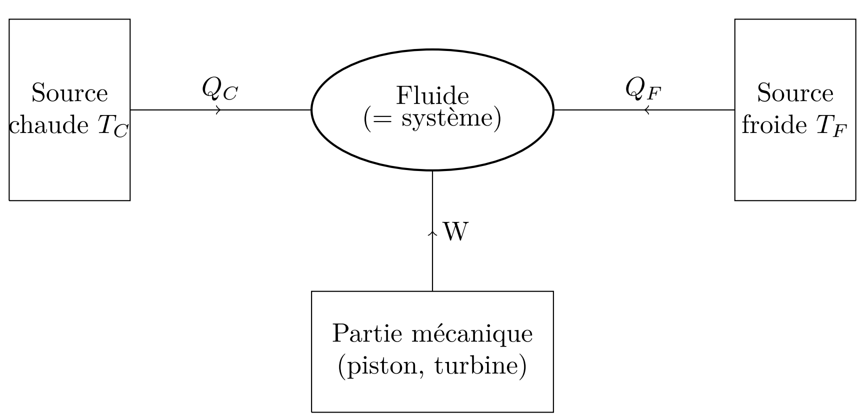
Pour un cycle en sens trigonométrique,



$$W = +(aire\ verte) - (aire\ rouge) = aire\ du\ cycle$$

1.3 Schématisation des machines dithermes

On va maintenant inscrire ce qui précède dans un système de notations généralement utilisé :



Tous les moteurs thermiques utilisent un fluide (qui dans certains cas reste constamment gazeux, dans d'autres subit des changements d'état, mais est nécessairement gazeux à un moment donné) qui est d'un point de vue thermodynamique le système auquel on applique les lois. Au cours du fonctionnement du moteur ce fluide échange avec :

— Un thermostat dont le rôle est de chauffer le fluide, qualifié de *source chaude*, à une température T_C
— Un autre thermostat dont le rôle est de refroidir le fluide, qualifié de *source froide*, à une température T_F
— Une «partie mécanique » (turbine ou piston)

Les énergies échangées entre le fluide et ces différents éléments *au cours d'un cycle de fonctionnement du moteur* sont notées Q_C, Q_F et W.

Dans le cas d'un moteur à explosion, le fluide est l'air (donc toujours gazeux), la source chaude correspond à l'énergie libérée par la combustion du mélange air / essence et la source froide est assurée par le renouvellement de l'air (on expulse les gaz d'échappement chauds et on fait rentrer de l'air frais, ce qui équivaut à un refroidissement).

Pour une machine à vapeur, le fluide est l'eau, et il y a cette fois des changements d'état. La source chaude est la chaudière où brûle le charbon, et la source froide est assurée par une réserve d'eau froide (qui doit être renouvelée périodiquement, voir les châteaux d'eau qu'il y avait sur le bord des voies ferrées à l'époque des machines à vapeur).

Dans les centrales nucléaires il y a un moteur thermique qui est une sorte de machine à vapeur, mais avec des turbines au lieu de pistons. La source chaude est le combustible nucléaire, et la source froide le fleuve à proximité duquel est construite la centrale...

1.4 Récepteurs (Pompe à chaleur / Machine frigorifique)

Les moteurs thermiques sont un aspect des machines thermiques, dont le but est de convertir la chaleur en travail. Mais on peut aussi faire fonctionner une machine thermique «en sens inverse » , ce qui a pour effet de consommer du travail et de transférer thermiquement de l'énergie de la source froide vers la source chaude. Ce type de machines thermiques, qualifié de récepteur, permet ainsi *d'inverser le sens naturel des échanges thermiques.*

Si l'on s'intéresse à la source chaude (le but est de réchauffer ce qui est déjà le plus chaud) on parle de *pompe à chaleur* ; alors que si on regarde ce qui se passe à la source froide (le but est de refroidir ce qui est déjà le plus froid) on a affaire à une *machine frigorifique*. Cette dernière application est particulièrement importante, car c'est le seul moyen dont on dispose pour refroidir (du moins à grande échelle), à moins d'avoir des réserves de glace...

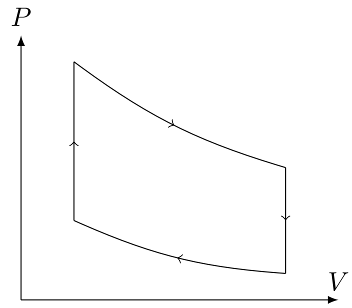
En fait les récepteurs font systématiquement les deux (chauffer la source chaude et refroidir la source froide) mais en général un seul des deux est exploité (il existe des combinaisons astucieuses des deux effets, par exemple piscine/patinoire ou chauffage de bâtiments / refroidissement de data centers).

Si l'on prend l'exemple d'un réfrigérateur, la source froide est l'intérieur, la source chaude l'air extérieur (on identifie facilement l'échangeur, un serpentin noir, sur la face arrière) et la partie mécanique est le compresseur. Pour une pompe à chaleur destinée à chauffer une habitation, la source chaude est l'intérieur, la source froide l'air extérieur ou l'eau issue d'un forage, et la partie mécanique un compresseur également.

Il y a beaucoup de choses communes dans la description des moteurs et des récepteurs, on retrouve notamment les mêmes types d'évolutions, mais tout est inversé :

— l'ordre des opérations
— le sens de parcours du cycle
— le signe des grandeurs échangées

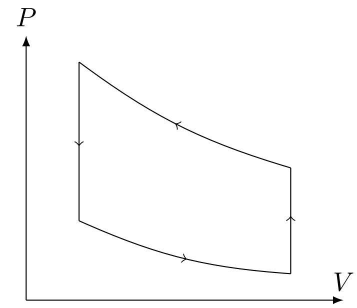
Moteur



$$\begin{tikzcd} \text{Chauffage} \arrow[r] & \text{Détente} \arrow[d] \\ \text{Compression} \arrow[u] & \text{Refroidissement} \arrow[l] \end{tikzcd}$$

On a :
— $W < 0$
— $Q_c > 0$
— $Q_f < 0$

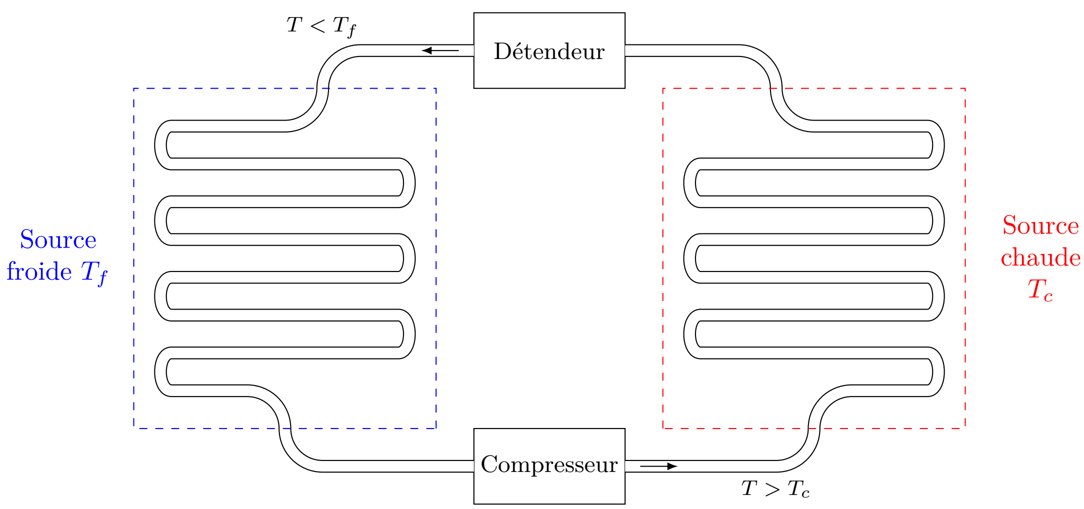
Pompe à chaleur



$$\begin{tikzcd} \text{Chauffage} \arrow[d] & \text{Détente} \arrow[l] \\ \text{Compression} \arrow[r] & \text{Refroidissement} \arrow[u] \end{tikzcd}$$

On a :
— $W > 0$
— $Q_c < 0$
— $Q_f > 0$

Exemple type de pompe à chaleur :



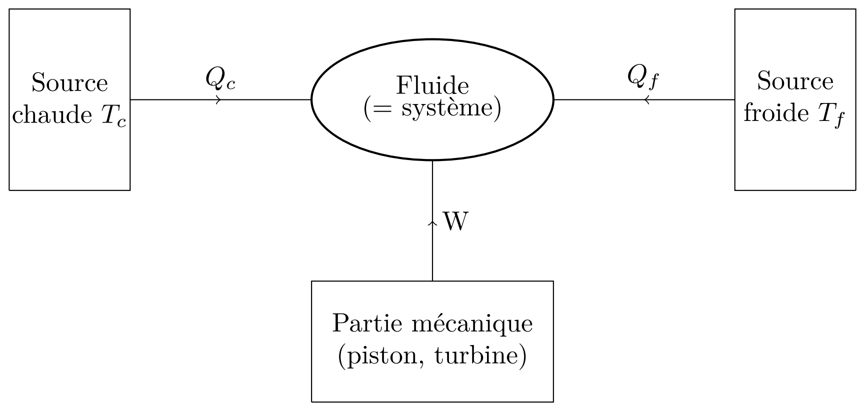
Lors de la compression, la température augmente. Il faut que, à la sortie du compresseur, la température du fluide soit supérieure à la température de la source chaude. Ainsi, le fluide cède de l'énergie à la source chaude.

Lors de la détente, la température diminue. Il faut que, à la sortie du détendeur, la température du fluide soit inférieure à la température de la source froide. Ainsi, le fluide reçoit de l'énergie de la source froide.

2 Théorie de Carnot

Dans cette partie on retrouve les principaux résultats obtenus par Carnot en appliquant les deux principes de la thermodynamique (ce n'est pas la démarche suivie par Carnot, qui ne connaissait pas le premier principe et a contribué à l'élaboration du second principe).

2.1 Application des deux principes aux machines thermiques



On considère une machine ditherme, et on applique le premier et le deuxième principe au fluide sur un cycle de fonctionnement :

Premier principe : $\Delta U_{cycle} = Q_C + Q_F + W$ et $\Delta U_{cycle} = 0$, car U est une fonction d'état. D'où,

$$Q_C + Q_F + W = 0$$

Deuxième principe : $\Delta S_{cycle} = S_{éch} + S_{créée}$ avec $S_{éch} = \dfrac{Q_C}{T_C} + \dfrac{Q_F}{T_F}$, car les sources sont des thermostats.

D'où, puisque $\Delta S_{cycle} = 0$, $\dfrac{Q_C}{T_C} + \dfrac{Q_F}{T_F} + S_{créée} = 0$, et comme $S_{créée} \geq 0$, on a finalement :

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

Ce résultat est appelé *inégalité de Clausius*. Dans le cas d'une *machine réversible* (c'est à dire que lors de son fonctionnement toutes les évolutions sont réversibles), $S_{créée} = 0$ et on a *l'égalité* $\dfrac{Q_C}{T_C} + \dfrac{Q_F}{T_F} = 0$, qui sera utilisée pour calculer les rendements et les efficacités de Carnot.

2.2 Rendement d'un moteur thermique

D'une manière générale, en thermodynamique (et aussi dans beaucoup d'autres domaines...), le rendement peut être défini par $\frac{\textit{ce qui est utile}}{\textit{ce qui est dépensé}}$. Dans le cas d'un moteur thermique, «ce qui est utile » est le travail fourni par le fluide à la partie mécanique, donc $|W|$ (autrement dit $-W$) - attention au fait que par convention W est le travail *reçu par le fluide*, et est donc négatif dans le cas d'un moteur. D'un autre coté, «ce qui est dépensé » est le transfert thermique apporté par la source chaude Q (dans le cas d'une voiture on dépense, au sens propre, l'essence nécessaire pour la faire avancer !).

Le rendement d'un moteur thermique est donc défini par :

$$\rho = \frac{|W|}{Q_C}$$

On utilise ensuite l'égalité issue du premier principe $Q_C + Q_F + W = 0$, qui donne $-W = Q_C + Q_F$, d'où :

$$\rho = \frac{Q_C + Q_F}{Q_c} = 1 + \frac{Q_F}{Q_C}$$

On se place ensuite dans le cas réversible : $\dfrac{Q_C}{T_C} + \dfrac{Q_F}{T_F} = 0$, donc $\dfrac{Q_F}{Q_C} = -\dfrac{T_F}{T_C}$ et on obtient :

$$\rho = 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

Ce résultat constitue le *rendement de Carnot*. Le rendement d'un moteur thermique est, en général inférieur au rendement de Carnot, autrement dit le rendement de Carnot, associé à une machine réversible, est le meilleur rendement possible compte-tenu des températures des sources T_F et T_C.

On peut justifier plus précisément ceci en reprenant le calcul précédent avec l'inégalité :
$\dfrac{Q_C}{T_C} + \dfrac{Q_F}{T_F} \leq 0$, donc $\dfrac{Q_F}{Q_C} \leq -\dfrac{T_F}{T_C}$ et on obtient $\rho \leq 1 - \dfrac{T_F}{T_C}$.
On retiendra ce que l'on appelle le théorème de Carnot :

$$\rho \leq \rho_{carnot} \qquad avec \qquad \rho_{carnot} = 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

C'est un résultat fondamental car il met en évidence *l'importance de la température des sources*, ce qui n'était pas évident à priori. Le rendement sera donc d'autant plus élevé que la température de la source chaude est élevée et que celle de la source froide est basse (le rendement réel n'est bien sûr pas rendement de Carnot, mais en général plus le rendement de Carnot est élevé et plus le rendement réel l'est). De nombreuses observations concrètes confirment ces faits, par exemple un moteur à explosion est moins performant quand il fait très chaud (car T_F est plus élevée).

Imaginons un moteur qui fonctionne entre des sources à $20°C$ et $1000°C$: on obtient un rendement de $0,77$ (attention à convertir les températures en Kelvin !), ce que l'on n'arrive pas à atteindre en pratique. Les meilleurs rendements que l'on arrive à obtenir sont de l'ordre de 50% pour les moteurs à explosions (gros moteurs de bateaux) et 60% pour les «machines à vapeur » des centrales électriques (40% pour les centrales nucléaires, du fait de contraintes de sécurité plus importantes). Un moteur à explosion de voiture peut à priori atteindre un rendement de 30 à 40% dans des conditions optimales, mais c'est beaucoup moins dans son utilisation courante : le carburant que l'on brûle sert essentiellement à chauffer les gaz d'échappement !

2.3 Efficacité des récepteurs

Dans le cas des récepteurs, le principe est le même ($\frac{ce\ qui\ est\ utile}{ce\ qui\ est\ dépensé}$) mais on parle d'efficacité (ou de *cop*, *coefficient of peformance*, noté η), et non de rendement car la valeur peut être supérieure à 1. Ici, «ce qui est dépensé » est le travail W (concrètement pour faire fonctionner un réfrigérateur il faut une alimentation électrique pour faire tourner le compresseur).

→ Si on s'intéresse à la source froide, c'est-à-dire dans le cas d'une machine frigorifique, «ce qui est utile » est Q_F (le but est de refroidir la source froide), on a donc :

$$\eta_{froide} = \frac{Q_F}{W}$$

En reprenant $W = -Q_F - Q_C$, on obtient : $\eta_{froide} = \dfrac{Q_F}{-(Q_F + Q_C)} = \dfrac{-1}{1 + \dfrac{Q_C}{Q_F}}$

Dans le cas réversible, $\dfrac{Q_C}{T_C} + \dfrac{Q_F}{T_F} = 0$, et donc $\dfrac{Q_C}{Q_F} = -\dfrac{T_C}{T_F}$, ce qui donne :

$$\eta_{froide,\ carnot} = \frac{1}{\frac{T_C}{T_F} - 1} = \frac{T_F}{T_C - T_F}$$

→ Si on s'intéresse à la source chaude, c'est-à-dire dans le cas d'une pompe à chaleur, «ce qui est utile » est $|Q_C|$ (le but est de chauffer la source chaude), on a donc :

$$\eta_{chaude} = \frac{|Q_C|}{W}$$

Comme précédemment avec $W = -Q_F - Q_C$ on a : $\eta_{chaude} = \dfrac{-\,Q_C}{-(Q_F + Q_C)} = \dfrac{1}{1 + \dfrac{Q_F}{Q_C}}$

Et toujours dans le cas réversible, $\dfrac{Q_C}{Q_F} = -\dfrac{T_C}{T_F}$, ce qui donne finalement :

$$\eta_{chaude,\ carnot} = \frac{1}{1 - \frac{T_F}{T_C}} = \frac{T_C}{T_C - T_F}$$

Comme pour le rendement d'un moteur ces efficacités de Carnot, obtenues dans le cas réversible, sont des valeurs maximales compte-tenu des températures des sources T_C et T_F et les valeurs réelles leur sont nécessairement inférieures (on peut comme précédemment reprendre le calcul avec les inégalités pour le justifier, vous pouvez le faire à titre d'exercice).

Ces expressions mettent en évidence le fait qu'une pompe à chaleur / machine frigorifique est d'autant plus efficace que les températures des sources sont proches (ce qui est assez intuitif, il est plus facile de «forcer » le transfert thermique non spontané de plus froid vers le plus chaud lorsque les températures ne sont pas trop éloignées.

Là encore on peut faire de nombreuses observations concrètes, par exemple une pompe à chaleur destinée à chauffer une habitation est d'autant plus efficace que la source froide utilisée a une température pas trop basse, l'idéal étant d'utiliser l'eau souterraine à $10 - 12°$, et si elle utilise l'air extérieur elle devient inefficace en dessous de $-7°$ environ (il devient alors préférable d'utiliser l'électricite pour chauffer directement une résistance plutôt que d'alimenter le compresseur).

Pour ce qui est des ordres de grandeur, si l'on considère un réfrigérateur qui fonctionne entre $5°$ et $25°$ on arrive à une efficacité de Carnot de l'ordre de 15, alors que l'efficacité réelle est plutôt de l'ordre de 3 - 4. C'est également ce que l'on peut espérer avec une pompe à chaleur : par exemple (cop de 4) avec $1J$ d'énergie électrique investi, on chauffe l'habitation de $4J$, c'est , pour le même chauffage, 4 fois plus économe en électricité que du chauffage électrique !

Pour finir, un résumé des rendement/efficacités de Carnot :

Moteur	Machine frigorifique	Pompe à chaleur
$1 - \dfrac{T_F}{T_C}$	$\dfrac{T_F}{T_C - T_F}$	$\dfrac{T_C}{T_C - T_F}$

2.4 Cycle de Carnot

Le cycle de Carnot correspond au cycle qui doit être suivi pour une machine réversible. Donc toutes les évolutions du fluide doivent être réversibles, ce qui implique que :

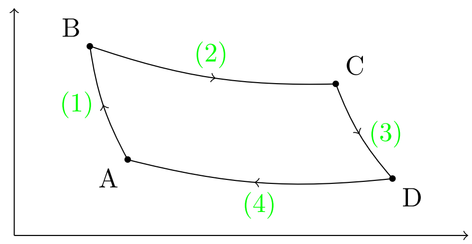
— Pour les étapes où de l'énergie est échangée avec les sources, ce sont nécessairement des évolutions isothermes, aux températures T_F et T_C, puisque le système doit être en équilibre avec la source pendant l'échange.

— Pour les deux étapes où il n'y a pas d'échanges thermiques, ce sont des évolutions adiabatiques (pas d'échanges thermiques = évolution adiabatique) et réversibles.

Le cycle de Carnot consiste en deux étapes isothermes et deux étapes adiabatiques et réversibles.

Ci-dessous une représentation schématique du cycle de Carnot (ici en cycle moteur) :

1. compression adiabatique et réversible
2. chauffage + détente isotherme T_C
3. détente adiabatique et réversible
4. refroidissement + compression isotherme T_F



Il est intéressant de calculer le rendement à partir de cette modélisation, on devrait retrouver le rendement de Carnot $\rho_{carnot} = 1 - \frac{T_f}{T_c}$. Pour ce faire, on considère le fluide comme un gaz parfait (Carnot a établi que, pour une machine réversible, le rendement est indépendant de la nature du fluide).

Comme précédemment, on part de $\rho = \dfrac{|W|}{Q_C} = \dfrac{-W}{Q_C}$, et comme $-W = Q_C + Q_F$, on obtient $\rho = 1 + \dfrac{Q_F}{Q_C}$.

Il suffit donc de calculer Q_C et Q_F pour les évolutions isothermes :

— $Q_C = Q_2$ (échange avec la source chaude) et $Q_2 = \Delta U_2 - W_2 = -W_2$ (évolution isotherme pour un gaz parfait, donc $\Delta U_2 = 0$), on a donc (le calcul du travail pour une évolution isotherme d'un gaz parfait a été effectué au chapitre précédent) :

$$W_2 = -n\,R\,T_C \ln\left(\frac{V_C}{V_B}\right)$$

Ainsi,

$$Q_2 = n\,R\,T_C \ln\left(\frac{V_C}{V_B}\right)$$

— De même, on obtient $Q_F = Q_4 = n\,R\,T_F \ln\left(\dfrac{V_A}{V_D}\right)$

En rassemblant ces résultats, on a donc :

$$\rho = 1 + \frac{T_f}{T_c}\,\frac{\ln\left(\dfrac{V_A}{V_D}\right)}{\ln\left(\dfrac{V_C}{V_B}\right)}$$

Or, les évolutions (1) et (3) sont adiabatiques et réversibles, et le système est un gaz parfait. On utilise la loi de Laplace sous la forme $T\,V^{\gamma-1} = c^{ste}$:

Évolution (1) : $T_F\,V_A^{\gamma-1} = T_C\,V_B^{\gamma-1}$ donc

$$\frac{V_A}{V_B} = \left(\frac{T_C}{T_F}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}}$$

Évolution (3) : $T_C\,V_C^{\gamma-1} = T_F\,V_D^{\gamma-1}$ donc

$$\frac{V_D}{V_C} = \left(\frac{T_C}{T_F}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}}$$

On a donc $\dfrac{V_D}{V_C} = \dfrac{V_A}{V_B}$, soit $\dfrac{V_A}{V_D} = \dfrac{V_B}{V_C}$, ce qui implique $\dfrac{\ln\left(\dfrac{V_A}{V_D}\right)}{\ln\left(\dfrac{V_C}{V_B}\right)} = -1$

On retrouve ainsi le rendement de Carnot pour une machine réversible :

$$\rho_c = 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

3 Moteur à explosion

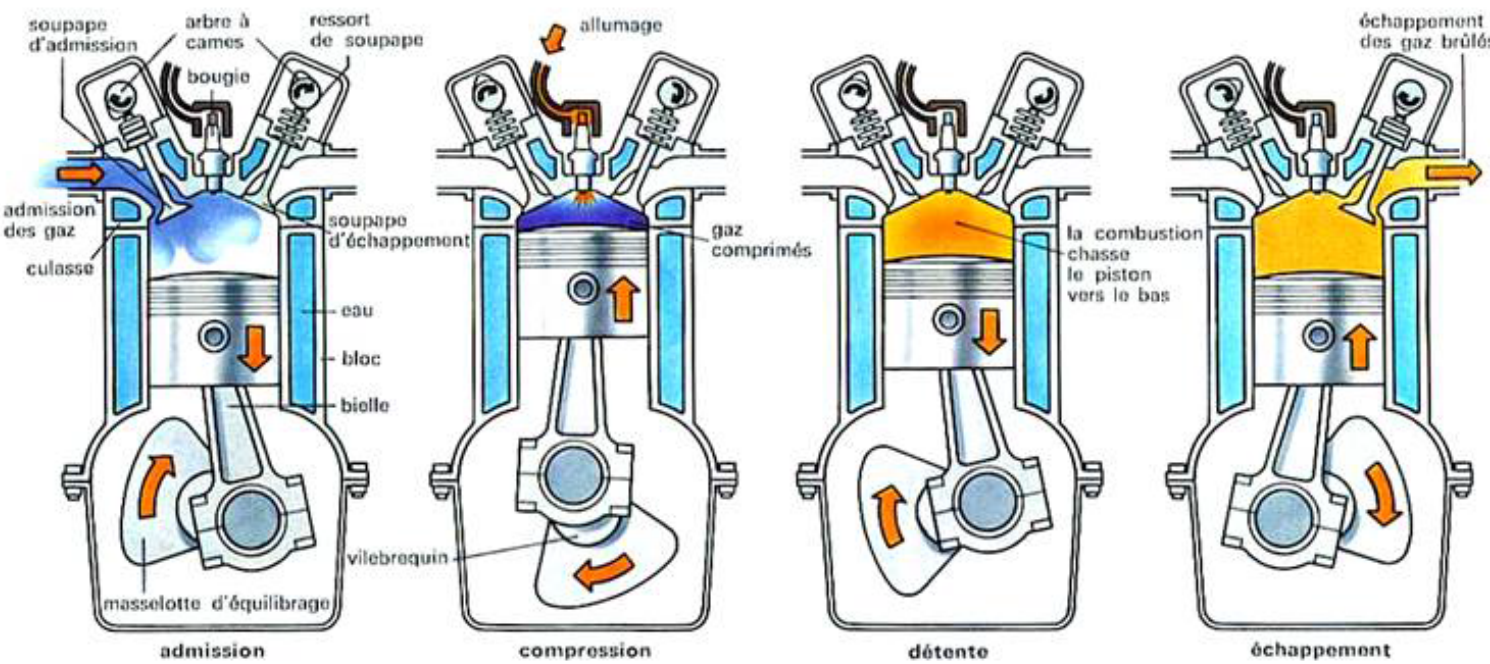
3.1 Description

Le moteur à explosion développé au cours du vingtième siècle et encore utilisé aujourd'hui sur la plupart des véhicules est un moteur à *combustion interne*, c'est-à-dire que la combustion a lieu à l'intérieur des cylindres (contrairement, par exemple, à une machine à vapeur), ce qui constitue son principal inconvénient : il ne peut bruler que des carburants adaptés.

La plupart des moteurs à explosion sont des moteurs *quatre temps*, qui sont :
— admission (d'air frais et de carburant «vaporisé » en fines gouttelettes)
— compression (de ce mélange air/essence)
— détente (suite à la combustion)
— échappement (du mélange, chaud, air/produits de combustion)

Ces étapes sont sensiblement les mêmes que le moteur soit «essence » ou «diesel » , quant au moteur deux-temps le fonctionnement n'et pas si différent, mais parmi les 4 étapes précédentes deux ont lieu en même temps, à la montée et à la descente.

Voici un schéma qui résume les 4 temps avec davantage de détails :



Lors de l'admission le piston descend, la soupape d'admission est ouverte et la soupape d'échappement fermée. La pression reste égale à la pression extérieure.

Lors de la compression le piston monte, et les deux soupapes sont fermées. La pression augmente, ainsi que la température.

Lorsque le piston est (à peu de choses près) à son point haut, la combustion a lieu, ce qui provoque un échauffement et une augmentation de pression (dans un moteur essence la combustion est déclenchée par un étincelle produite par une bougie, et dans un moteur diesel le mélange s'enflamme spontanément du fait de l'augmentation de température).

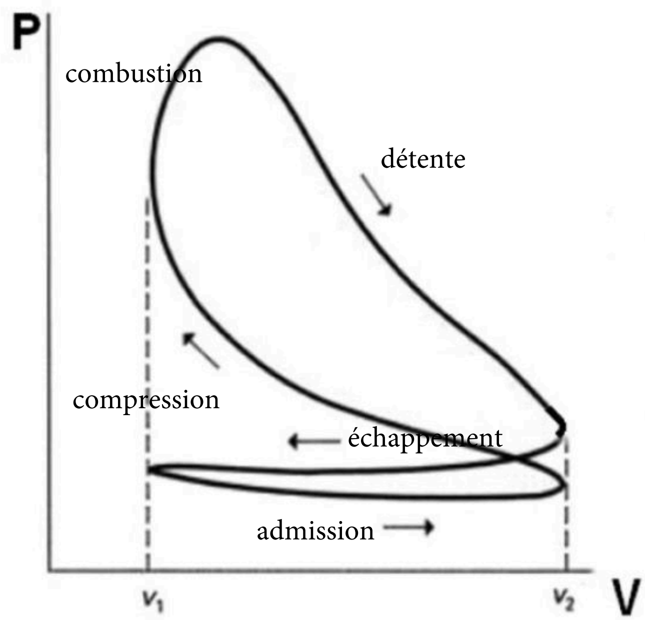
Lors de la détente le piston descend et les deux soupapes sont fermées. C'est le temps véritablement «moteur » du cycle.

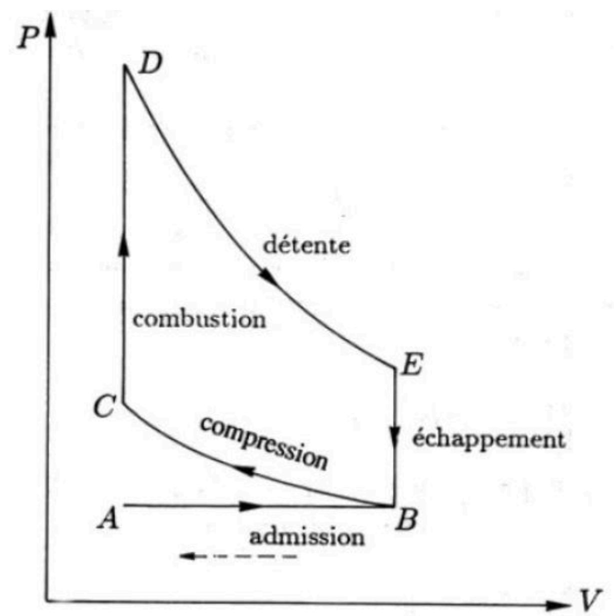
Enfin, lors de l'échappement le piston remonte, soupape d'échappement ouverte et d'admission fermée, ce qui permet d'expulser l'air chaud (+ produits de combustion).

Pour conclure sur cette brève description, il est important de noter qu'il y a un cycle (admission / compression / détente / échappement), et donc une combustion et une poussée (lors de la détente) *tous les eux tours*. Il est nécessaire d'avoir suffisamment d'inertie pour pouvoir continuer le cycle suite à la détente (dans les moteurs à 4 cylindres on peut s'arranger pour qu'il y ait toujours l'un des 4 qui soit dans sa phase «détente » , mais on fait aussi des moteurs 4 temps monocylindres).

3.2 Modélisation du cycle

A partir de là on s'intéresse plus spécifiquement au moteur essence, et on donne ci-dessous un exemple de cycle réel dans un diagramme de Clapeyron, ainsi que la modélisation couramment utilisée en première approximation (appelée cycle de Beau de Rochas ou d'Otto).





Il est assez facile d'identifier les différentes étapes sur le cycle réel, même si elles ne sont évidemment pas parfaitement délimitées. Il est à noter que la combustion, bien que ne faisant pas partie des 4 temps (qui correspondent à des mouvements du piston vers le haut ou vers le bas), occupe une certaine place sur le cycle. On remarque également deux valeurs importantes, notées V_1 et V_2 qui correspondent aux volumes minimal et maximal du cylindre ; leur rapport (noté α) est appelé *taux de compression* et est une donnée importante du moteur, il est couramment de l'ordre de 10.

En ce qui concerne la modélisation proposée, elle s'appuie sur plusieurs hypothèses :
- On considère que le contenu du cylindre (mélange air/essence ou air/produits de combustion) se comporte comme un gaz parfait lors des différentes étapes
- La compression et la détente sont modélisées par des évolutions adiabatiques et réversibles (on néglige ici tout frottement mécanique)
- La combustion est modélisée par une évolution isochore (on ne prend pas en compte explicitement la réaction chimique, on raisonne comme si l'énergie qu'elle libère était transmise au système via un contact thermique avec une source chaude), ce qui revient à considérer qu'elle a lieu lorsque le piston est à son point haut, et qu'elle est «très rapide ».
- L'ensemble échappement + admission est modélisé par un refroidissement isochore, là encore comme si il y avait un contact thermique «très rapide » avec une source froide - c'est ici l'air extérieur qui joue le rôle de source froide, puisque l'on remplace l'air chaud par de l'air froid venu de l'extérieur.

3.3 Calcul du rendement

On évalue le rendement à partir du cycle modélisé (on doit évidemment toujours modéliser pour pouvoir faire des calculs). Comme pour le cycle de Carnot, on commence par évaluer les échanges thermiques et on en déduit ensuite le travail par $|W| = -W = Q_C + Q_F$ via le premier principe appliqué sur un cycle, ce qui permet d'exprimer ensuite le rendement par $\rho = \frac{|W|}{Q_C} = 1 + \frac{Q_F}{Q_C}$.

En considérant le cycle modélisé, les échanges thermiques ont lieu pendant les étapes $C \to D$ et $E \to B$ (les étapes $B \to C$ et $D \to E$ sont adiabatiques), plus précisément $Q_C = C \to D$ et $Q_F = E \to B$ (le chauffage correspond à la combustion et le refroidissement à l'ensemble échappement + admission).

Comme ce sont des évolutions isochores (donc $W = 0$), on peut calculer Q par $Q = \Delta U = C_V \Delta T$:

$$Q_C = C_V(T_D - T_C)$$

$$Q_F = C_V(T_B - T_E)$$

On a donc pour le rendement :

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

Il reste à relier les températures via le rapport de compression $\alpha = \frac{V_2}{V_1}$ en utilisant la loi de laplace pour les évolutions $B \to C$ et $D \to E$, adiabatiques et réversibles :

$$T_C V_1^{\gamma-1} = T_B V_2^{\gamma-1} \quad \textit{donc} \quad T_C = T_B \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1} = T_B \alpha^{\gamma-1}$$

$$T_D V_1^{\gamma-1} = E V_2^{\gamma-1} \quad \textit{donc} \quad T_D = T_E \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1} = T_E \alpha^{\gamma-1}$$

Et donc $T_D - T_C = -(T_B - T_E)\alpha^{\gamma-1}$, ce qui donne finalement :

$$\rho = 1 - \frac{1}{\alpha^{\gamma-1}}$$

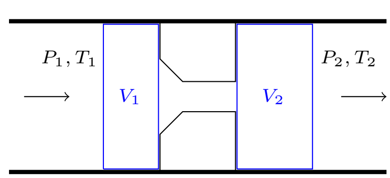
On remarque que, comme $\gamma > 1$, le rendement augmente avec le rapport de compression. Avec un rapport de l'ordre de 10, γ étant de $1,4$ (le gaz est essentiellement de l'air), on obtient un rendement de l'ordre de $0,6$, ce qui est plutôt optimiste.

4 Machines thermiques avec écoulement de fluide

Dans le moteur à explosion, le fluide (l'air) reste dans le cylindre et y subit les différentes évolutions. Dans d'autres machines thermiques en revanche le fluide circule dans différentes parties de la machine et subit dans chacune un certain type d'évolution. Pour modéliser le fonctionnement de ces machines il est nécessaire de passer par un résultat connu sous le nom de «premier principe industriel »adapté aux fluides en écoulement.

4.1 Détente de Joules-Thomson et «premier principe industriel »

La détente de Joules-Thomson fait partie des premières expériences destinées à tester le comportement des gaz. On fait s'écouler un gaz dans une conduite indéformable et calorifugée (donc pas d'échanges avec l'extérieur) et on met un obstacle sur son passage : historiquement une «paroi poreuse »(coton par exemple), les détendeurs actuels sont réalisés avec un simple rétrécissement de la conduite.



On constate une baisse de pression en aval du rétrécissement ($P_2 < P_1$), ce qui est cohérent avec l'idée de détente. Dans la mesure où l'écoulement se fait en régime stationnaire cette détente se fait à *enthalpie constante* (isenthalpique). Cette propriété a permis de tester le comportement des gaz, un peu comme avec la détente de Joules Gay-Lussac : $H = C_p T$ pour un gaz parfait, donc si T ne varie pas le gaz suit le modèle du gaz parfaits.

Voici une justification sommaire du caractère isenthalpique de cette détente : on applique le premier principe au système *fermé* qui occupe le volume V_1 en amont de l'obstacle et V_2 en aval :

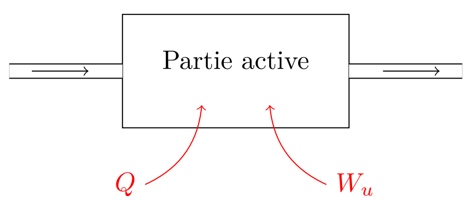
$$U_2 - U_1 = W + Q$$

— il n'y a pas d'échanges avec les parois, indéformables et calorifugées
— il n'y a pas d'échanges avec la partie constituée par l'obstacle (sinon l'énergie interne de cette partie varierait, ce qui serait contraire à l'hypothèse de régime stationnaire)
— Les échanges avec le fluide en amont et en aval son purement mécaniques (pas de différence de température), et correspondent au travail des forces de pression : $W_{pression} = P_1 V_1 - P_2 V_2$.
En effet, en notant S la section de la conduite, le fluide en amont exerce une force $P_1 S$ sur une distance ℓ, donc un travail $P_1 S\ell$ et $S\ell = V_1$ donc le travail vaut $P_1 V_1$. C'est le même principe en aval mais avec un signe moins, car c'est cette fois le système qui pousse le fluide en aval.

On a donc $U_2 - U_1 = P_1 V_1 - P_2 V_2$, soit $U_2 + P_2 V_2 = U_1 + P_1 V_1$, et donc $H_1 = H_2$. On a bien H constante lors de la détente.

On va maintenant étendre ce résultat au cas où le fluide traverse une *partie active* : c'est le même principe que pour Joules-Thomson mais la partie active n'est pas nécessairement un simple rétrécissement qui ne donne lieu à aucun échange, à la traversée de la partie active le fluide peut échanger avec l'extérieur :

— un échange thermique Q, c'est ce qui se passe dans les *échangeurs*, qui sont de longs serpentins dans lesquels le fluide circule, de manière à augmenter les échanges thermiques avec l'extérieur
— un échange mécanique W_u qualifié de *travail utile* associé à des *pièces mobiles*, que l'on retrouve dans les compresseurs ou les turbines



Le principe (on ne cherche ici qu'à donner l'idée, une démonstration détaillée sera faite en seconde année) est analogue à ce que l'on a fait pour la détente de Joules-Thomson, mais en ajoutant Q et W_u :

$$\Delta U = W_{pression} + W_u + Q$$

Et en écrivant que $W_{pression} = P_1 V_1 - P_2 V_2$ puis en repassant ce terme dans le membre de gauche ce qui combiné à la variation d'énergie interne donne la variation d'enthalpie, on obtient :

$$\Delta H = W_u + Q$$

Ce résultat est qualifié de «premier principe industriel »ou «premier principe pour un écoulement en régime stationnaire ». En pratique, il sera utilisé dans la suite pour trois types de parties actives :

— Détendeur : c'est un simple dispositif de type Joules-Thomson, avec un rétrécissement (ce type de dispositif est aussi utilisé comme détendeur pour les bouteilles de gaz) . Il n'y a ni échanges thermiques ni travail utile (pas de pièces mobiles) et on a :

$$\Delta H = 0$$

— Echangeur : le but est d'avoir un maximum d'échanges thermiques avec une partie donnée de la machine (la source chaude ou la source froide), il n'y a évidemment pas de travail utile, on a :

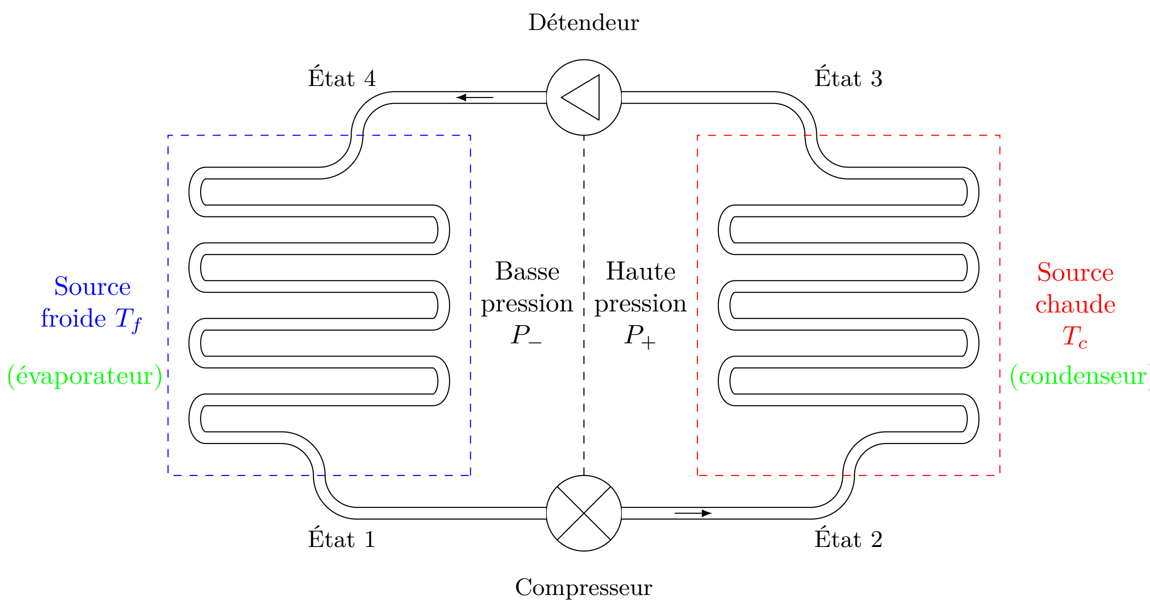
$$\Delta H = Q$$

— Compresseur : le rôle du compresseur est de comprimer le fluide (nécessairement à l'état gazeux) en lui apportant un travail mécanique, il n'y a (au moins en première approximation) pas d'échanges thermiques, on a :

$$\Delta H = W_u$$

4.2 Machine frigorifique avec changements d'état

La machine frigorifique décrite ici (et le cycle d'évolutions qui modélise son fonctionnement) correspond à ce que l'on retrouve par exemple dans un réfrigérateur ou dans la machine étudiée en TP. Elle utilise un fluide de type chlorofluorocarbone (par exemple le R134a, CH_2FCF_3) qui possède notamment des températures de changement d'état adaptées aux pressions entre lesquelles travaille la machine.



On s'intéresse d'abord à l'état du fluide aux différents endroits, c'est à dire entre les parties actives :

— État 4 : état gazeux, basse pression, haute température ($\sim T_f$).
— État 1 : état gazeux, haute pression, haute température.
— État 2 : état liquide, haute pression, haute température ($\sim T_c$).
— État 3 : mélange liquide/gaz, basse pression, basse température.

Lors des différentes évolutions on modélise le comportement du fluide :

($1 \longrightarrow 2$) : Lors de la compression, le fluide reste gazeux, la pression et la température augmentent. On modélise la compression par une évolution adiabatique et réversible, donc *isentropique*.

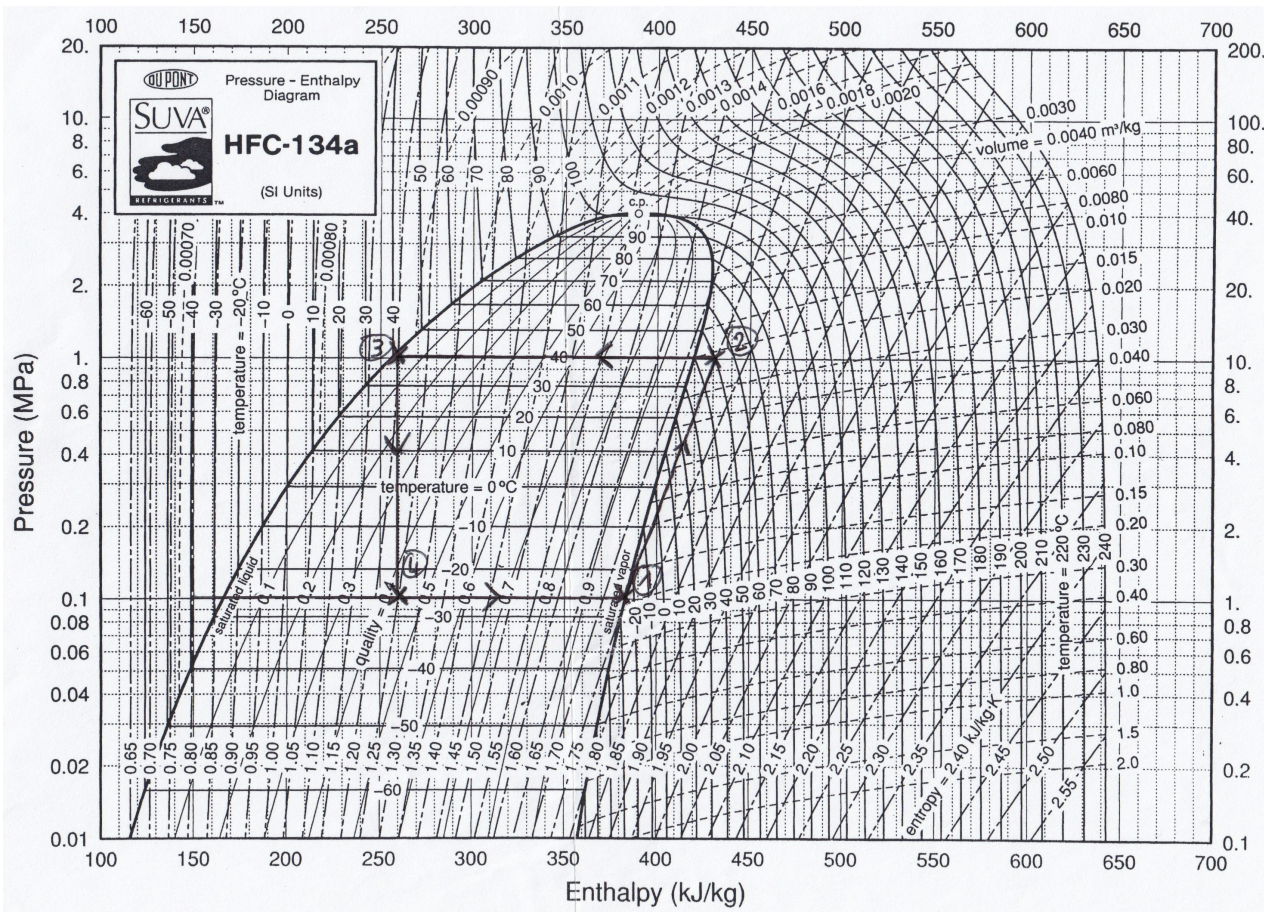
($2 \longrightarrow 3$) : Lors du passage dans le condenseur, il y a d'abord un refroidissement puis un changement d'état. Il est fondamental que $T_{vap}(P_+) > T_C$, ainsi tout le gaz sera liquéfié au contact de la source chaude, puisque tant qu'il reste du gaz la température reste supérieure à celle de la source chaude, à laquelle le fluide donne donc de l'énergie.
Le fluide ressort à l'état liquide. On modélise ce changement d'état par une évolution *isobare*.

($3 \longrightarrow 4$) : Lors de la détente, il y a un abaissement de la pression et de la température, avec une vaporisation partielle. C'est un détendeur de type Joules-Thomson, on peut considérer l'évolution comme *isenthalpique*.

($4 \longrightarrow 1$) : Lors du passage dans l'évaporateur, on vaporise ce qu'il reste de liquide, ce qui permet de prendre de l'énergie à la source froide. Il est fondamental que $T_{vap}(P_-) < T_F$ (même principe que pour $2 \longrightarrow 3$ dans l'autre sens). Là encore, modèle d'évolution *isobare*.

En ajoutant aux hypothèses que l'état (1) correspond à de la vapeur saturante et l'état (3) à du liquide saturant, et en considérant des valeurs (réalistes) de $1bar$ et $10bar$ pour les pressions basse et haute, on peut tracer le cycle d'évolutions. On utilise un diagramme pression-enthalpie (P,h) également appelé *diagramme des frigoristes* (on notera que l'échelle de pression est logarithmique, et que c'est bien sûr l'enthalpie *massique* qui est en abcisse). On retrouve dans ce diagramme, comme dans le diagramme (P,v) les différents domaines : liquide seul (à gauche), vapeur sèche (à droite), mélange liquide-vapeur (sous la «cloche » formée par les courbes de saturation) et fluide hypercritique (au dessus). On y trouve également des courbes isothermes, isentropiques et iso-volume massique, ainsi que iso-titre (sous les courbes de saturation, indiquant la proportion de vapeur dans le mélange). Avoir l'enthalpie (massique) en abcisses est particulièrement intéressant pour lire directement les quantités mises en jeu lors des différentes évolutions, puisqu'elle s'identifient à des variations d'enthalpie.

On remarque que le cycle est parcouru dans le sens trigo, ce qui est cohérent avec un cycle récepteur (cette propriété est valable dans tous les types de diagrammes).



On peut alors relever sur le diagramme différentes valeurs (notamment les températures) :

État 4 : liquide+vapeur (~ 43% de vapeur), 1 bar, $t = t_{vap}$(1 bar) =-26°C

Détente isenthalpique

État 3 : liquide saturant, 1 bar, $t = t_{vap}$(10 bar) =40°C

Vaporisation isobare

Refroidissement et liquéfaction isobare

État 1 : vapeur saturante, 1 bar, $t = t_{vap}$(1 bar) =-26°C

Compression isentropique

État 2 : vapeur sèche, 10 bar, t =50°C

Ainsi que les valeurs d'enthalpies associées aux différents états :

état	1	2	3	4
enthalpie	$h_1 = 380\ \mathrm{kJ} \cdot \mathrm{K}^{-1}$	$h_2 = 430\ \mathrm{kJ} \cdot \mathrm{K}^{-1}$	$h_3 = 260\ \mathrm{kJ} \cdot \mathrm{K}^{-1}$	$h_4 = 260\ \mathrm{kJ} \cdot \mathrm{K}^{-1}$

On peut alors déterminer q_F , q_C et w en utilisant le premier principe pour un écoulement en régime stationnaire $\Delta h = w_u + q$ (une remarque : la variation d'enthalpie lors de la compression donne le travail utile, pas le travail sur tout le cycle qui intervient dans les formules habituelles, mais sur un cycle complet le travail et le travail utile sont égaux, car sur un cycle complet les travaux des forces de pression se compensent :

— Compression : $h_2 - h_1 = w_u = w$ (travail fourni par le compresseur) donc $w = 80\ \mathrm{kJ} \cdot \mathrm{kg}^{-1}$.
— Échange source chaude : $h_3 - h_2 = q_C$ donc $q_C = -170\ \mathrm{kJ} \cdot \mathrm{kg}^{-1}$.
— Échange source froide : $h_1 - h_4 = q_F$ donc $q_F = 120\ \mathrm{kJ} \cdot \mathrm{kg}^{-1}$

On en déduit ainsi l'efficacité (selon cette modélisation, avec les pressions choisies) de la machine frigorifique :

$$\eta = \frac{q_F}{w} = \frac{120}{50} = 2,4$$

L'ordre de grandeur de l'efficacité de machines industrielles est de 4 du côté source chaude et de 3 du côté source froide, ce résultat est donc cohérent. On peut aussi le comparer avec l'efficacité de Carnot, avec que $t_C = 20°\mathrm{C}$ et $t_F = 4°\mathrm{C}$:

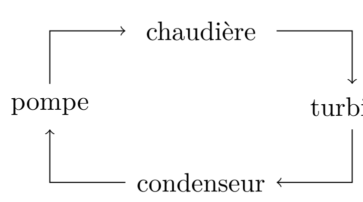
$$\eta_{Carnot} = \frac{T_f}{T_c - T_f} = 17$$

On trouve une efficacité de Carnot bien plus grande que l'efficacité réelle, ce qui est cohérent.

4.3 Machine à vapeur

La machine à vapeur est le premier moteur thermique mis au point et utilisé à grande échelle. Son fonctionnement peut sommairement être décrit de la manière suivante :

— De l'eau liquide est chauffée, sous haute pression, au contact de la chaudière (source chaude). Cela conduit à augmenter sa température et à en vaporiser une partie, qui est envoyée vers une turbine.
— La vapeur d'eau sous haute température et haute pression passe dans la turbine (partie mécanique) où elle subit une détente, cédant ainsi du travail à la turbine. Sa température et sa pression diminuent et elle est en partie liquéfiée. (cela peut aussi se faire dans un cylindre où la vapeur, une fois un soupape refermée, va pousser un piston, et est ensuite chassée par le retour du piston).
— La vapeur (en partie liquéfiée), à basse température et à basse pression, passe dans le condenseur (source froide) où elle est entièrement liquéfiée.
— L'eau liquide, à basse température et basse pression, passe dans la pompe qui augmente sa pression jusqu'à la pression «haute » ,celle qui règne dans la chaudière.

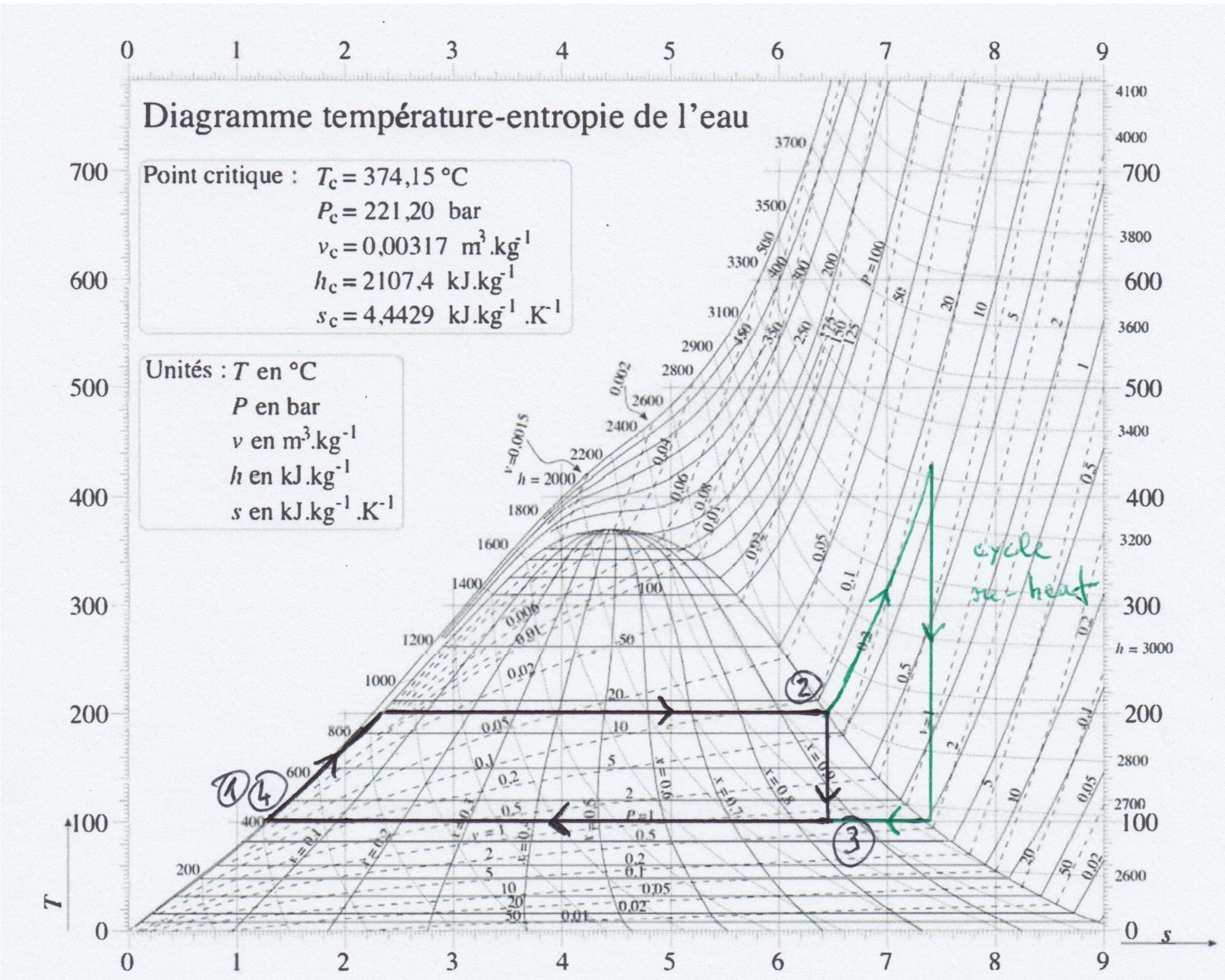


Les états du fluide (l'eau) sont successivement les suivants :
— (1) A l'entrée dans la chaudière, à la sortie de la pompe, liquide sous haute pression P_+ et température voisine de $T_{vap}(P_-)$
— (2) En sortant de la chaudière, vapeur saturante sous haute pression P_+ et température $T_{vap}(P_+)$.
— (3) A la sortie de la turbine, mélange liquide-vapeur sous basse pression (P_-) et température $T_{vap}(P_-)$.
— (4) Après être passé dans le condenseur, liquide saturant à la pression (P_-) et température $T_{vap}(P_-)$

Remarque : La température $T_{vap}(P_-)$ pour l'état (1) peut sembler bizarre, alors que la pression est P_+, en fait la température ne varie quasiment pas lors du passage dans la pompe car «comprimer » un liquide n'apporte quasiment aucun travail.

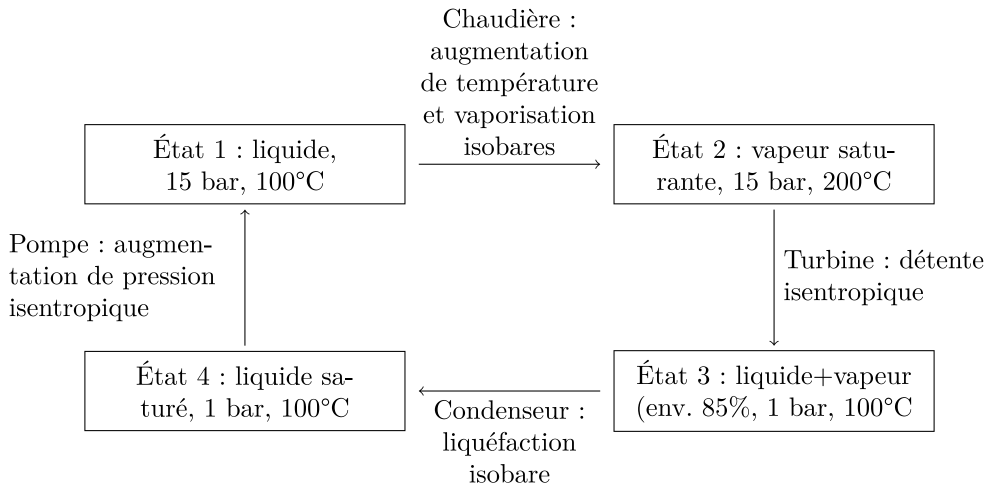
On adopte pour les différentes étapes la modélisation dite *cycle de Rankine* :
— Chauffage et vaporisation dans la chaudière : évolution isobare.
— Détente dans la turbine : évolution isentropique.
— Liquéfaction dans le condenseur : évolution isobare.
— Augmentation de la pression dans la pompe : évolution isentropique.

On peut alors, compte-tenu de toutes ces hypothèses et en choisissant $P_- = 1bar$ et $P_+ = 15bar$ (on a alors $t_{vap}(P_-) = 100°C$ et $t_{vap}(P_+) = 200°C$), tracer le cycle d'évolutions dans un diagramme (T,s) :



On remarque que les points représentatifs des états (1) et (4) sont quasiment indiscernables. Le cycle est parcouru dans le sens horaire, ce qui est cohérent avec le fait qu'il s'agit d'un moteur thermique (cette propriété est valable dans tous les diagrammes). On remarque également sur le diagramme que, suite à la détente dans la turbine, la proportion de vapeur dans le mélange est d'environ 85%

On peut résumer l'état du fluide et les différentes évolutions sur un schéma :



On peut également lire les valeurs d'enthalpie :

état	1	2	3	4
enthalpie	$h_1 = 420 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$h_2 = 2800 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$h_3 = 2350 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$h_4 = 420 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

On en déduit ensuite q_C, q_F et w :

— $q_C = h_2 - h_1 = 2380 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
— $q_F = h_4 - h_3 = -1930 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
— $w = h_2 - h_1 = -450 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ (sur un cycle, le travail et le travail utile sont égaux, car les travaux des forces de pression se compensent)

Et on peut en déduire le rendement :

$$\rho = \frac{|w|}{q_C} \approx 0,2$$

On peut ensuite évaluer le rendement de Carnot en prenant $t_F = 50°\text{C}$ et $t_C = 400°\text{C}$:

$$\rho_{Carnot} = 1 - \frac{T_f}{T_c} \approx 0,52$$

Le rendement du cycle modélisé est bien inférieur au rendement de Carnot. Le fait que dans les «machines à vapeur » utilisées dans les centrales électriques on arrive à des rendements de l'ordre de 60% montre la nécessité de travailler avec des températures plus basses / plus élevées pour la source froide et la source chaude, avec les températures proposées ici il n'est pas possible d'atteindre un tel rendement (le rendement réel étant toujours inférieur au rendement de Carnot).

Remarque : Pour finir, évoquons un dernier problème : la liquéfaction partielle lors de la détente n'est pas souhaitable, cela va notamment endommager les turbines. C'est pourquoi il est intéressant, après la sortie de la chaudière, de faire passer la vapeur dans un deuxième circuit de chauffage afin d'atteindre avant le passage dans la turbine une température suffisante pour éviter la liquéfaction lors de la détente. Cette opération est qualifiée de surchauffe de la vapeur (re-heat en anglais). Avec les valeurs de pression proposées dans notre exemple précédent, il faut surchauffer la vapeur, jusqu'à 430°C environ.