THERMODYNAMIQUE

chapitre 9

Machines thermiques.

Historiquement, c'est avec l'invention des machines thermiques que la thermodynamique est née en tant que science. Les notions de température, d'énergie, de travail et de chaleur, ont été introduites pour modéliser le fonctionnement des machines à vapeur, et améliorer leur rendement. Toutes les machines thermiques sont basées sur le même principe que la machine à vapeur du 19$^{\text{e}}$ siècle : de l'énergie thermique (issue de la combustion de charbon, de pétrole, ou de la fission nucléaire) est convertie en énergie mécanique (rotation d'une turbine ou d'un arbre) par l'intermédiaire d'un fluide (liquide ou gaz, par exemple de l'eau ou de l'air) qui subit un cycle de transformations.

La modélisation thermodynamique des machines a permis d'imaginer des dispositifs fonctionnant en sens inverse (conversion d'énergie mécanique ou électrique en chaleur), ce qui est la base des appareils de refroidissements.

Plan du chapitre.

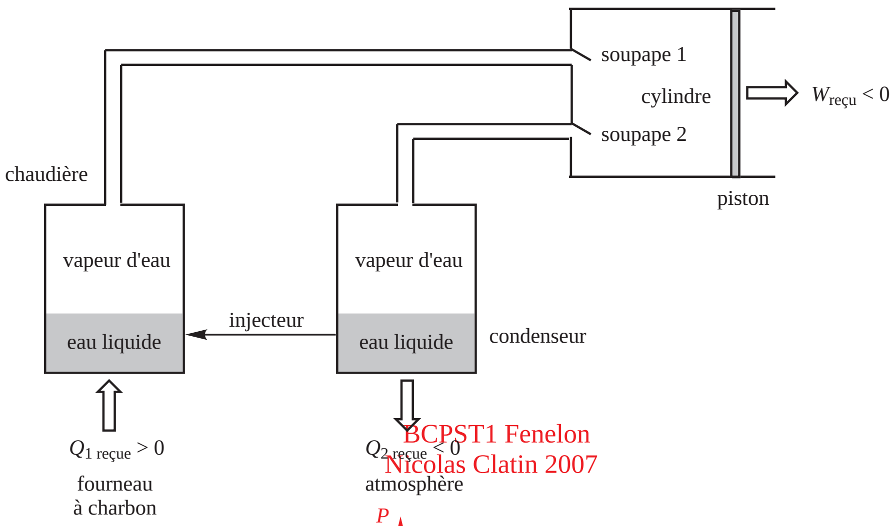
1 Principe des machines thermiques dithermes.

1.1 Exemples ; bilans d'énergie et d'entropie.

1.1.1 La machine à vapeur.

L'exemple historique de machine thermique est la machine à vapeur, qui a permis l'essor de l'industrie au 19^{e} siècle. Celle-ci est composée de trois parties principales :

- une chaudière dans laquelle on fait passer de l'eau liquide à l'état de vapeur sous pression,
- un cylindre, dans lequel la vapeur se détend en poussant un piston,
- un condenseur, chargé de liquéfier la vapeur, l'eau liquide étant réinjectée dans la chaudière.



L'eau liquide subit donc une transformation cyclique, au cours de laquelle il échange de l'énergie avec l'extérieur :

- il reçoit de la chaleur au niveau de la chaudière, celle-ci étant fournie par la combustion de charbon (ou autre combustible), soit $Q_{1\,\text{recue}} > 0$,
- il fournit un travail au niveau du cylindre, puisqu'il pousse le piston, soit $W_{\text{recu}} < 0$,
- il cède de la chaleur au monde extérieur (usuellement, l'atmosphère) au niveau du condenseur, soit $Q_{2\,\text{recue}} < 0$.

1.1.2 Centrale nucléaire.

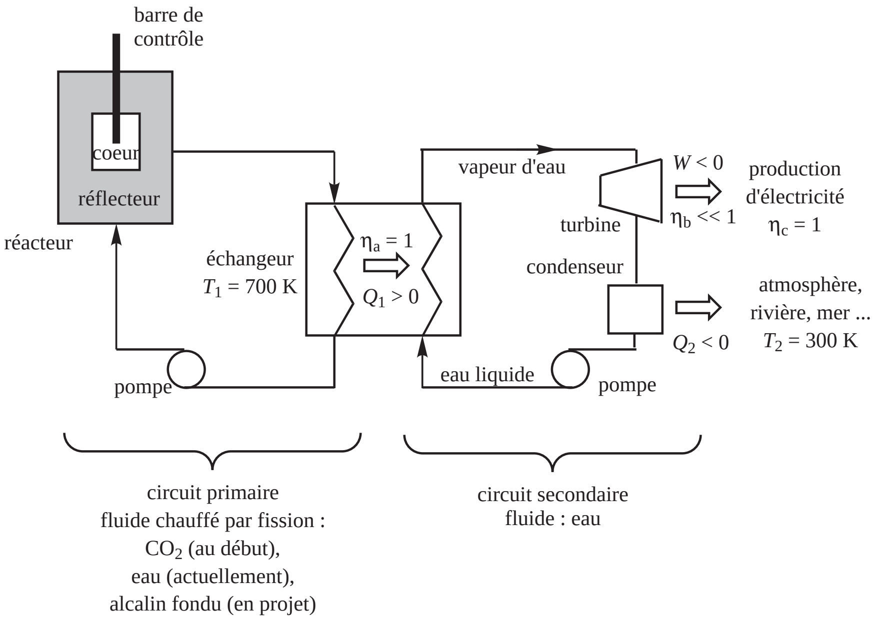
Le principe de toute machine thermique, 200 ans après l'invention de la machine à vapeur, est toujours le même. Une centrale nucléaire est constituée d'un circuit secondaire, dans lequel circule de l'eau. Celle-ci subit également une transformation cyclique qui la fait passer par :

- un échangeur dans lequel l'eau liquide est vaporisée,
- une turbine, mise en mouvement de rotation par le passage de la vapeur,
- un condenseur.

Dans l'échangeur de chaleur, l'eau du circuit secondaire est mise en contact avec un autre fluide (dioxyde de carbone dans les premières centrales nucléaires, eau actuellement, et alcalin fondu dans les prototypes de surgénérateurs), qui circule dans le circuit primaire. Ce fluide est chauffé par la réaction de fission nucléaire au niveau du cœur du réacteur. C'est pour éviter les fuites radioactives que l'unique circuit de la machine à vapeur est remplacée par deux circuits séparés.

L'eau liquide du cicuit secondaire subit une transformation cyclique, au cours de laquelle il échange de l'énergie avec l'extérieur :

- il reçoit de la chaleur au niveau de l'échangeur, soit $Q_{1\,\text{recue}} > 0$,
- il fournit un travail au niveau de la turbine, soit $W_{\text{recu}} < 0$,
- il cède de la chaleur au monde extérieur (l'atmosphère, la mer ou une rivière) au niveau du condenseur, soit $Q_{2\,\text{recue}} < 0$.



La conversion de l'énergie nucléaire produite dans le circuit primaire en énergie thermique au niveau du circuit secondaire se fait avec un rendement η_a proche de 100%. De même, le travail de la turbine est converti en énergie électrique avec un rendement η_c proche de 100%. En revanche, la conversion d'énergie thermique en énergie mécanique au niveau de la turbine se fait avec un rendement médiocre de l'ordre de $\eta_b \approx 30\%$. Il est d'autant plus grand que T_1 est grande, la température T_2 étant généralement imposée (atmosphère, rivière, mer...). Cependant, on ne peut l'augmenter trop du fait des risques d'emballement du réacteur. Dans un surgénérateur, on atteint $T_1 = 700$ K.

1.1.3 Bilan d'énergie et bilan d'entropie.

Dans tous les cas, le système considéré est le fluide, qui subit une transformation cyclique. Au cours d'un cycle, on peut donc écrire, pour ce fluide :

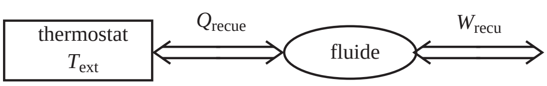
$$\Delta U = W_{\text{recu}} + Q_{\text{recue}} = 0 \tag{1}$$

$$\Delta S = S_e + S_{cr} = 0 \tag{2}$$

On constate que, dans toutes les machines thermiques, le fluide échange de la chaleur avec le monde extérieur à deux niveaux différents, c'est-à-dire qu'il est mis successivement en contact avec deux sources de températures différentes, une **source** dite **chaude** à la température T_1, et une **source** dite **froide** à la température $T_2 < T_1$. On peut se demander si la présence de ces deux sources est indispensable, et s'il ne serait pas possible que le fluide n'échange de la chaleur qu'avec une seule source. On pourrait alors se contenter d'une source gratuite et abondante comme l'atmosphère, ce qui éviterait de dépenser de l'énergie dans une chaudière !

1.2 Cycles monothermes.

Dans un cycle monotherme, le fluide échange de la chaleur avec une seule source, de température T_{ext}, qu'on suppose constante, ce qui est souvent le cas en pratique. Il échange aussi du travail (électrique ou mécanique).



D'après (2), et puisque l'échange de chaleur se fait de façon monotherme (source de chaleur à température constante), on a :

$$S_{\mathrm{e}} + S_{\mathrm{cr}} = 0 \Rightarrow \frac{Q_{\mathrm{recue}}}{T_{\mathrm{ext}}} + S_{\mathrm{cr}} = 0 \Rightarrow Q_{\mathrm{recue}} = -T_{\mathrm{ext}} S_{\mathrm{cr}} < 0 \tag{3}$$

Comme l'entropie de création et la température sont toutes les deux positives, le fluide ne peut que fournir de la chaleur au monde extérieur. Il est donc impossible d'utiliser le fluide pour refroidir la source de chaleur ; on ne peut pas réaliser une machine frigorifique avec un cycle monotherme. D'autre part, en reportant dans (1) :

$$W_{\mathrm{recu}} = -Q_{\mathrm{recue}} > 0 \tag{4}$$

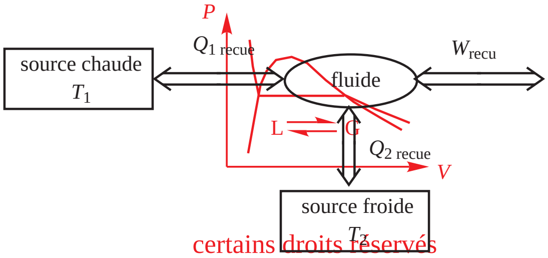
En conséquence, le fluide ne peut que recevoir du travail de la part du monde extérieur. En définitive, avec un cycle monotherme, on peut exclusivement convertir de l'énergie mécanique (travail reçu par le fluide) en énergie thermique (chaleur fournie par le fluide). C'est le principe d'un (mauvais) système de chauffage. En particulier, il est impossible de réaliser un moteur.

Ceci est l'énoncé initial du second principe par Carnot : « Pour fournir un travail au cours d'un cycle, un fluide doit échanger de la chaleur avec au moins deux sources. » Historiquement, c'est à partir de cette constatation que la fonction entropie a été définie, en particulier l'existence et le signe du terme de création.

1.3 Cycles dithermes.

On considère maintenant que le fluide échange de la chaleur avec deux sources de températures différentes. Au cours d'un cycle, le fluide :

- reçoit la chaleur $Q_{1\,\mathrm{recue}}$ de la source chaude de température T_1,
- reçoit la chaleur $Q_{2\,\mathrm{recue}}$ de la source froide de température $T_2 < T_1$,
- reçoit le travail W_{recu}.



Écrivons les deux principes pour un cycle du fluide. D'une part, (1) devient :

$$\Delta U = W_{\mathrm{recu}} + Q_{1\,\mathrm{recue}} + Q_{2\,\mathrm{recue}} = 0 \tag{5}$$

Supposons, ce qui est la plupart du temps le cas, que les températures des sources chaude et froide soient constantes. Lorsque le fluide est au contact de la source chaude, la température extérieure est T_1, et elle est T_2 lorsqu'il est au contact de la source froide. Les termes d'entropie d'échange s'expriment alors simplement, et (2) devient :

$$\Delta S = S_{\mathrm{e}\,1} + S_{\mathrm{e}\,2} + S_{\mathrm{cr}} = \frac{Q_{1\,\mathrm{recue}}}{T_1} + \frac{Q_{2\,\mathrm{recue}}}{T_2} + S_{\mathrm{cr}} = 0 \Rightarrow Q_{2\,\mathrm{recue}} = -T_2 S_{\mathrm{cr}} - \frac{T_2}{T_1}\, Q_{1\,\mathrm{recue}} \tag{6}$$

En reportant dans (5), on obtient une relation entre la chaleur reçue de la source chaude et le travail reçu :

$$W_{\mathrm{recu}} + Q_{1\,\mathrm{recue}} - T_2 S_{\mathrm{cr}} - \frac{T_2}{T_1}\, Q_{1\,\mathrm{recue}} = 0 \Rightarrow \boxed{Q_{1\,\mathrm{recue}} \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) = T_2 S_{\mathrm{cr}} - W_{\mathrm{recu}}} \tag{7}$$

Par un raisonnement analogue, on a aussi :

$$\boxed{Q_{2\,\mathrm{recue}} \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) = T_1 S_{\mathrm{cr}} - W_{\mathrm{recu}}} \tag{8}$$

2 Cycles dithermes moteurs.

2.1 Conditions pour avoir un moteur.

On souhaite réaliser un moteur, c'est-à-dire un dispositif qui fournit du travail à l'utilisateur. En conséquence, on souhaite que le travail reçu par le fluide soit négatif :

$$W_{\text{recu}} < 0 \tag{9}$$

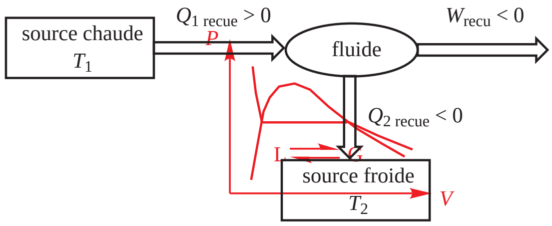
Comme $T_1 > T_2$, la relation (7) implique :

$$\underbrace{Q_{1\,\text{recue}}\left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)}_{>0} = \underbrace{T_2 S_{\text{cr}}}_{>0} - \underbrace{W_{\text{recu}}}_{<0} \Rightarrow Q_{1\,\text{recue}} > 0 \tag{10}$$

En raisonnant de même avec (8), on a :

$$\underbrace{Q_{2\,\text{recue}}\left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right)}_{<0} = \underbrace{T_1 S_{\text{cr}}}_{>0} - \underbrace{W_{\text{recu}}}_{<0} \Rightarrow Q_{2\,\text{recue}} < 0 \tag{11}$$

En définitive, pour réaliser un moteur, dans lequel le fluide fournit du travail au monde extérieur, il faut nécessairement que le fluide reçoive de la chaleur de la source chaude, et cède de la chaleur à la source froide.



C'est bien ce qu'on constate dans toutes les machines thermiques motrices. Dans la machine à vapeur, l'eau reçoit de la chaleur de la chaudière, en cède dans le condenseur, et fournit un travail.

2.2 Cycle moteur réversible.

2.2.1 Rendement.

L'utilisateur souhaite récupérer le travail fourni par le fluide, soit $-W_{\text{recu}}$. Or, il doit apporter au fluide l'énergie thermique $Q_{1\,\text{recue}}$, en faisant brûler du charbon dans la chaudière, ou en réalisant une fission nucléaire dans le réacteur de la centrale. Le rendement de la machine s'écrit alors :

$$\boxed{\eta = \frac{-W_{\text{recu}}}{Q_{1\,\text{recue}}}} \tag{12}$$

Considérons le cas où le cycle ditherme moteur fonctionne de façon réversible. L'entropie de création est nulle sur un cycle, et l'équation (7) devient :

$$Q_{1\,\text{recue}}\left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) = -W_{\text{recu}} \Rightarrow \boxed{\eta_{\text{rev}} = 1 - \frac{T_2}{T_1}} \tag{13}$$

Ceci est un cas particulier du **théorème de Carnot** :

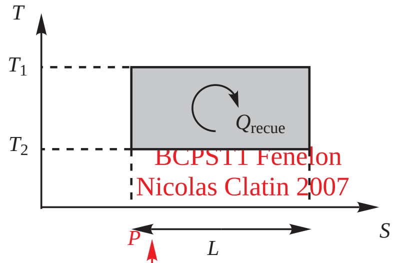
Le rendement d'une machine thermique **ditherme réversible** ne dépend ni de la machine ni du fluide utilisé, mais uniquement des températures des sources.

2.2.2 Représentation graphique.

Si le fluide subit une transformation cyclique réversible, c'est que chaque étape du cycle est elle-même réversible. Il ne peut donc s'agir que de transformations isothermes ou adiabatiques réversibles.

- Au contact de la source chaude, qui est à la température T_1, le fluide ne peut subir une transformation réversible que s'il est à l'équilibre de température avec la source ; au contact avec la source chaude, le fluide subit donc une transformation isotherme à la température T_1.
- De même, au contact de la source froide, il subit une transformation isotherme à la température T_2.
- Hors du contact des sources, le fluide n'échange pas de chaleur. Comme toutes les transformations sont réversibles, le fluide subit donc des transformations adiabatiques réversibles hors du contact des sources.

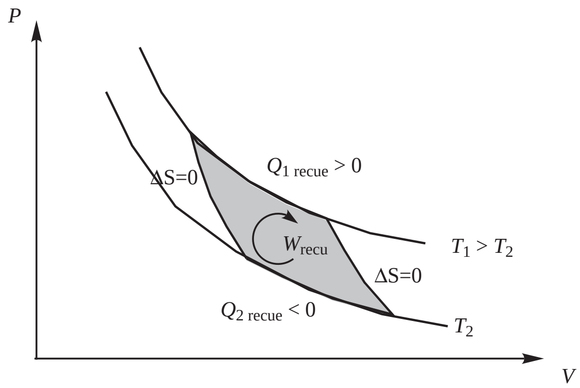
Comme une transformation adiabatique ($S_{\mathrm{e}} = 0$) réversible ($S_{\mathrm{cr}} = 0$) est isentropique, le cycle se compose de deux étapes isothermes et deux étapes isentropiques. En coordonnées (T, S), le cycle est donc un rectangle.



Le cycle est parcouru dans le sens rétrograde. En effet, au contact de la source froide, l'entropie du fluide diminue (il se refroidit donc va d'un état moins ordonné à un état plus ordonné), et au contact de la source chaude, son entropie augmente. Sachant que la chaleur reçue est donnée par l'aire sous la courbe dans un diagramme entropique, on peut retrouver graphiquement le rendement. En utilisant le premier principe (5) et la formule du rendement (12), on a :

$$\eta_{\mathrm{rev}} = \frac{-W_{\mathrm{recu}}}{Q_{1\,\mathrm{recue}}} = \frac{Q_{1\,\mathrm{recue}} + Q_{2\,\mathrm{recue}}}{Q_{1\,\mathrm{recue}}} = 1 + \frac{Q_{2\,\mathrm{recue}}}{Q_{1\,\mathrm{recue}}} = 1 + \frac{-T_2 L}{T_1 L} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \tag{14}$$

En coordonnées de Clapeyron, le cycle parcouru par le fluide, composé de deux isothermes et de deux adiabatiques réversibles, est connu sous le nom de **cycle de Carnot** si le fluide est assimilable à un gaz parfait. Comme le cycle est moteur, il est parcouru dans le sens rétrograde.



2.3 Cycle moteur irréversible.

2.3.1 Perte de rendement.

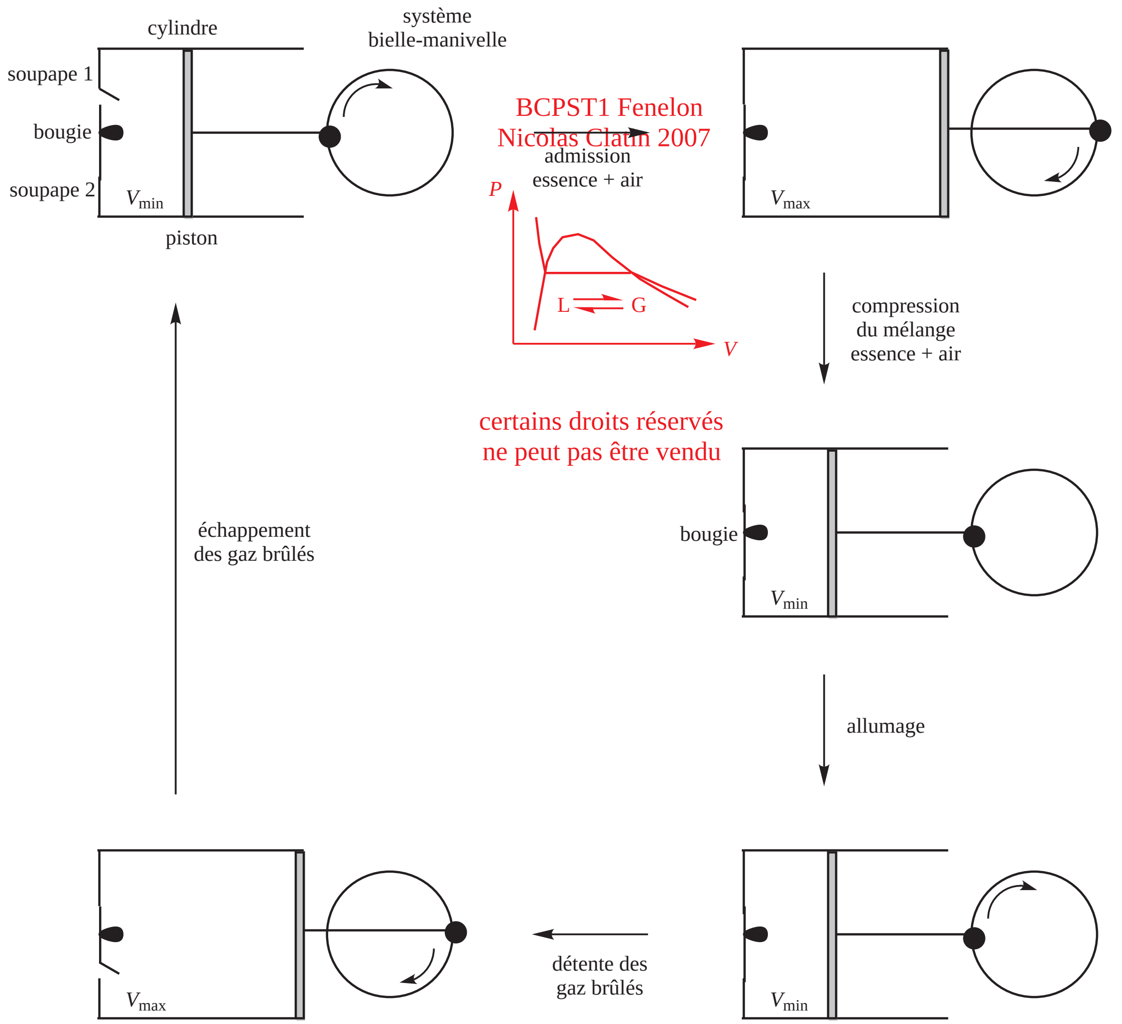
Le rendement dans le cas d'un fonctionnement irréversible s'obtient en combinant (12) et (7) :

$$\eta = \underbrace{1 - \frac{T_2}{T_1}}_{\eta_{\text{rev}}} - \underbrace{\frac{T_2 S_{\text{cr}}}{Q_{1\,\text{recue}}}}_{>0} < \eta_{\text{rev}} \tag{15}$$

En conséquence, le rendement d'une machine fonctionnant de façon irréversible est nécessairement moins élevé que celui d'une machine réversible fonctionnant entre les deux mêmes sources.

2.3.2 Exemple du moteur à explosion (ou moteur à 4 temps).

Dans un moteur à explosion, la détonation d'un mélange de carburant et d'air dans un cylindre entraine la mise en translation d'un piston. Dans un véhicule, ce mouvement de translation est converti en mouvement de rotation d'un arbre lié aux roues par l'intermédiaire d'un système bielle-manivelle. Le fluide est le mélange de carburant et d'air. Le volume du cylindre est initialement à sa valeur minimale V_{min}, le piston étant repoussé au maximum dans le cylindre. Le contenu du cylindre subit le cycle de transformations suivant.



- Phase d'admission. La soupape d'admission étant ouverte, le mélange d'air et de carburant est aspiré dans le cylindre lors de la translation du piston. Le volume du cylindre atteint alors sa valeur maximale V_{max}.
- Soupape d'admission fermée, le mélange est comprimé par retour du piston à sa position initiale. Le volume du mélange d'air et de carburant est V_{min}.

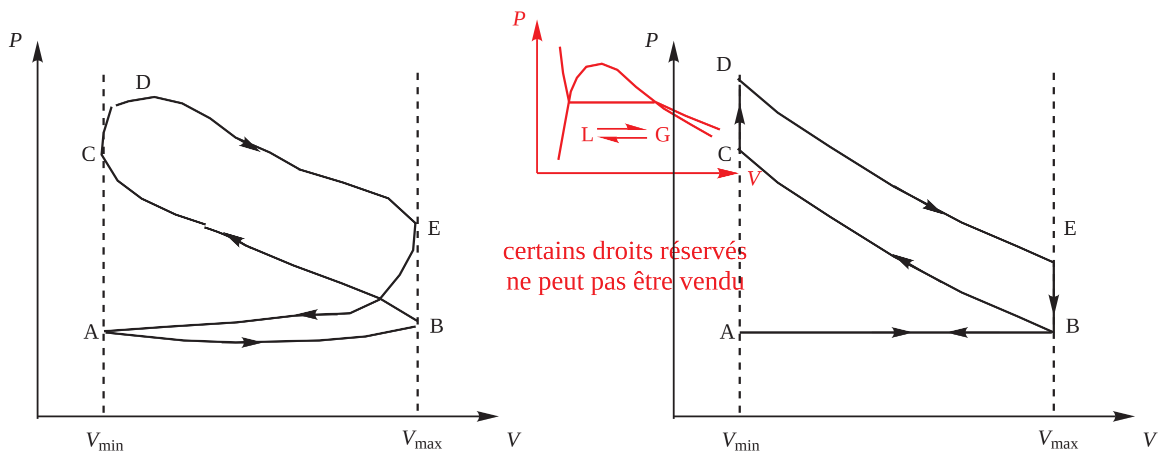
- Allumage : la bougie provoque une étincelle qui déclenche la réaction de combustion du carburant. Cette réaction est fortement exothermique, ce qui provoque une augmentation de la température, c'est-à-dire que le fluide reçoit une chaleur Q_1. La source chaude est donc le fluide lui-même au moment de la réaction exothermique d'explosion.
- L'élévation de température et de pression due à l'explosion entraine une détente brusque des gaz brûlés. Le piston est alors repoussé à sa valeur V_{min}. Le fluide fournit alors un travail au piston.
- Phase d'échappement. Soupape d'échappement ouverte, le retour du piston expulse les gaz brûlés, qui se refroidissent au contact de l'atmosphère (source froide). Le cylindre revient à sa position initiale.

Le contenu du cylindre subit bien une transformation cyclique, mais il faut noter deux différences avec la machine à vapeur. D'une part, la nature du fluide change au cours du cycle : avant l'allumage, il s'agit d'un mélange de carburant et d'air, après l'allumage, il reste les gaz brûlés (CO_2 et H_2O), le carburant non brûlé, le diazote de l'air, ainsi que des oxydes d'azote formés au cours de l'explosion. D'autre part, la fluide est expulsé à chaque fin de cycle, le cylindre étant rechargé en fluide au début du cycle suivant. Cependant, d'un cycle à l'autre, les mêmes phénomènes se répètent dans le cylindre.

2.3.3 Modélisation du moteur à explosion : cycle de Beau de Rochas.

Les transformations subies par le fluide au cours d'un cycle sont représentées ci-dessous à gauche en coordonnées de Clapeyron.

- L'admission AB se fait quasiment à pression constante.
- La compression BC entraine une augmentation de la pression.
- L'allumage CD entraine une augmentation supplémentaire très rapide de pression.
- La détente DE permet une diminution de la pression.
- L'échappement EA est associé à une diminution de volume et de pression.



En première approximation, on peut modéliser ce cycle complexe par un cycle plus simple, connu sous le nom de cycle de Beau de Rochas (ci-dessus à droite). Celui-ci comporte 5 étapes.

- L'admission AB est supposée isobare.
- La compression BC étant rapide, les échanges de chaleur n'ont pas le temps de se faire. La compression est donc quasiment adiabatique. Dans le cycle de Beau de Rochas, elle est en outre supposée réversible (ce qui est une approximation contestable).
- L'explosion étant très rapide, le piston n'a quasiment pas le temps de bouger durant le temps de l'explosion. L'allumage CD est donc quasiment isochore.
- La détente des gaz brûlés est rapide, donc peut être supposée adiabatique. Elle est également supposée réversible (ce qui est encore très contestable).
- L'échappement est décomposé en deux étapes, une détente isochore EB suivie d'une étape isobare BA inverse de l'admission.

Par ailleurs, on assimile le fluide à un gaz parfait de coefficient $\gamma = C_{pm}/C_{vm}$ constant. Ceci est évidemment une approximation car le carburant, même vaporisé, ne peut pas être considéré comme un ensemble de molécules ponctuelles sans interactions entre elles : les molécules sont des alcanes d'environ 10 atomes de carbone ou des composés aromatiques, et il existe des interactions de Van der Waals notables entre elles. Cependant, le mélange contient aussi de l'air, dont 80% est constitué de molécules de diazote relativement inertes au cours du cycle (mise à part la formation d'oxydes d'azote) ; or N_2 est assimilable à un gaz parfait. L'approximation que le fluide soit un gaz parfait de coefficient γ constant au cours du cycle est donc raisonnable à condition de considérer que le diazote est le constituant majoritaire dans le cylindre.

Calculons le rendement du cycle, en fonction du taux de compression $a = V_{\max}/V_{\min}$, qui est une caractéristique technologique du moteur. En utilisant le premier principe (relation (5)) et la definition du rendement d'un moteur (relation (12)), on a :

$$\eta = \frac{-W_{\text{recu}}}{Q_{1\,\text{recue}}} = \frac{Q_{1\,\text{recue}} + Q_{2\,\text{recue}}}{Q_{1\,\text{recue}}} = 1 + \frac{Q_{2\,\text{recue}}}{Q_{1\,\text{recue}}} \tag{16}$$

Il faut donc évaluer la chaleur reçue de la source chaude et celle reçue de la source froide. Le cycle de Beau de Rochas assimile l'échappement à une suite de deux transformations EB puis BA. En conséquence, à chaque cycle, le fluide effectue les deux transformations AB et BA exactement inverses ; d'un point de vue de bilan énergétique, ces deux transformations se compensent donc exactement. Par ailleurs, les transformations BC et DE étant adiabatiques, les seuls échanges de chaleur à considérer se font sur l'étape CD et sur l'étape EB. Il est évident que la chaleur est reçue de la source chaude sur la transformation modélisant l'explosion, soit $Q_{1\,\text{recue}} = Q_{\text{CD}}$; en conséquence, $Q_{2\,\text{recue}} = Q_{\text{EB}}$. Finalement :

$$\eta = 1 + \frac{Q_{\text{EB}}}{Q_{\text{CD}}} \tag{17}$$

Le fluide étant assimilé à un gaz parfait, son énergie interne ne dépend que de la température ; on suppose en outre que sa capacité thermique molaire est constante au cours du cycle. Les étapes CD et EB étant isochores, le travail reçu y est nul ; le premier principe s'écrit alors :

$$Q_{\text{CD}} = \Delta U_{\text{CD}} = nC_{vm}\,(T_{\text{D}} - T_{\text{C}}) \tag{18}$$
$$Q_{\text{EB}} = \Delta U_{\text{EB}} = nC_{vm}\,(T_{\text{B}} - T_{\text{E}}) \tag{19}$$

Il faut évaluer les températures en fonction des volumes extrêmes du cylindre. Comme les étapes BC et DE sont adiabatiques réversibles et que le fluide est assimilé à un gaz parfait, on peut utiliser la relation de Laplace :

$$T_{\text{B}}V_{\text{B}}^{\gamma-1} = T_{\text{C}}V_{\text{C}}^{\gamma-1} \Rightarrow T_{\text{B}} = T_{\text{C}}\left(\frac{V_{\min}}{V_{\max}}\right)^{\gamma-1} = \frac{T_{\text{C}}}{a^{\gamma-1}} \tag{20}$$

$$T_{\text{D}}V_{\text{D}}^{\gamma-1} = T_{\text{E}}V_{\text{E}}^{\gamma-1} \Rightarrow T_{\text{E}} = T_{\text{D}}\left(\frac{V_{\min}}{V_{\max}}\right)^{\gamma-1} = \frac{T_{\text{D}}}{a^{\gamma-1}} \tag{21}$$

En reportant ces deux relations dans (19), on obtient :

$$Q_{\text{EB}} = nC_{vm}\frac{T_{\text{C}} - T_{\text{D}}}{a^{\gamma-1}} = -\frac{nC_{vm}}{a^{\gamma-1}}(T_{\text{D}} - T_{\text{C}}) \tag{22}$$

En introduisant (18) et (22) dans (17), on arrive à l'expression du rendement en fonction du taux de compression :

$$\eta = 1 - \frac{1}{a^{\gamma-1}} \tag{23}$$

Le rendement est donc d'autant meilleur que le taux de compression est grand (ce qui ne veut pas dire que le moteur consomme moins, mais seulement qu'une fraction plus grande de l'énergie fournie est effectivement convertie en travail). Pour un taux de compression $a = 10$, et en prenant $\gamma = 1,4$ (valeur pour l'air, puisque la majorité du contenu du cylindre est du diazote), le rendement est $\eta = 0,60 = 60\%$. Le rendement d'un moteur à explosion réel est beaucoup plus faible, ce qui est attendu, étant donnée la grande idéalisation du cycle de Beau et Rochas.

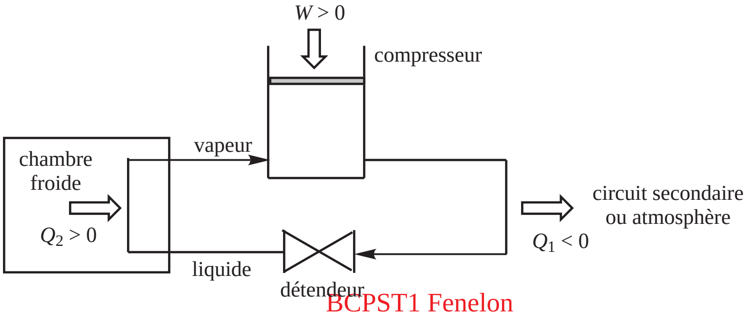
3 Cycles dithermes inverses ou récepteurs.

On appelle cycle inverse (ou récepteur) un cycle dans lequel le fluide reçoit du travail de l'opérateur, par opposition au cycle moteur dans lequel le fluide fournit du travail à l'opérateur. En contrepartie, l'opérateur attend un transfert thermique dans un sens non spontané au niveau d'une des sources de chaleur.

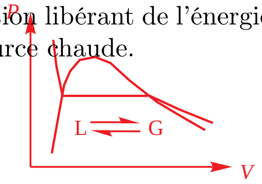
3.1 Chambre frigorifique.

3.1.1 Principe.

Dans une machine frigorifique, le fluide est un liquide facile à vaporiser (actuellement des halogénoalcanes), c'est-à-dire dont la chaleur latente de vaporisation est faible. À l'entrée de la chambre frigorifique, le liquide passe dans un détendeur qui abaisse sa pression en-dessous de sa pression de vapeur saturante, ce qui entraine la vaporisation du liquide. Or la vaporisation nécessite de l'énergie, il y a donc un transfert thermique de la chambre frigorifique vers le fluide, d'où un abaissement de température de la chambre froide.



À la sortie de la chambre froide, le fluide est gazeux. Il est liquéfié à l'aide d'un compresseur, au niveau duquel l'opérateur fournit un travail. La liquéfaction libérant de l'énergie, il y a un transfert thermique du fluide vers l'atmosphère extérieure, qui constitue la source chaude.



3.1.2 Sens des échanges énergétiques.

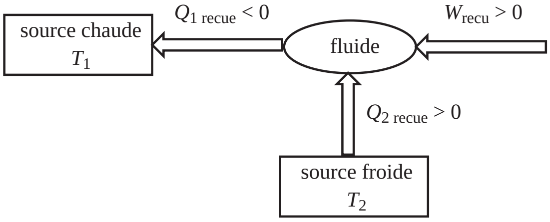
On veut refroidir la source froide, soit $Q_{2\,\text{recue}} > 0$. En reportant dans (6), on constate que le fluide doit nécessairement fournir de la chaleur à la source chaude :

$$Q_{1\,\text{recue}} = -T_1 S_{\text{cr}} - \frac{T_1}{T_2}\, Q_{2\,\text{recue}} < 0 \tag{24}$$

Par ailleurs, l'expression (8) montre que l'opérateur doit bien fournir un travail ; en effet, le travail reçu est :

$$W_{\text{recu}} = T_1 S_{\text{cr}} + Q_{2\,\text{recue}} \left(\frac{T_1}{T_2} - 1 \right) > 0 \tag{25}$$

En définitive, le fluide reçoit réellement un travail, reçoit de la chaleur de la source froide et cède de la chaleur à la source chaude.



Les échanges énergétiques sont exactement opposés à ceux d'un moteur. Le cycle de transformation est donc le même, mais parcouru en sens inverse. Si la machine est réversible, le cycle est un rectangle en coordonnées (S, T) et un cycle de Carnot en coordonnées de Clapeyron.

3.1.3 Coefficient d'efficacité.

L'opérateur fournit un travail, et il souhaite récupérer de la chaleur au niveau de la source froide. L'efficacité de la machine est donc mesurée par son **coefficient d'efficacité** :

$$\boxed{e = \frac{Q_{2\,\text{recue}}}{W_{\text{recu}}}} \tag{26}$$

En utilisant (25), on obtient :

$$Q_{2\,\text{recue}}\left(\frac{T_1}{T_2} - 1\right) = W_{\text{recu}} - T_1 S_{\text{cr}} \Rightarrow e = \frac{Q_{2\,\text{recue}}}{W_{\text{recu}}} = \frac{1}{\dfrac{T_1}{T_2} - 1} - \frac{T_1 S_{\text{cr}}}{W_{\text{recu}}\left(\dfrac{T_1}{T_2} - 1\right)} \tag{27}$$

Dans le cas où la machine est réversible, $S_{\text{cr}} = 0$, et le coefficient d'efficacité ne dépend que des températures des sources (ce qui est compatible avec le théorème de Carnot) :

$$\boxed{e_{\text{rev}} = \frac{1}{\dfrac{T_1}{T_2} - 1} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}} \tag{28}$$

Dans le cas d'un fonctionnement irréversible, l'expression (27) montre immédiatement que le coefficient d'efficacité est inférieur à celui obtenu dans le cas de la réversibilité.

Pour une machine frigorifique réversible, dont la chambre froide est maintenue à la température $T_2 = -10\ °\text{C}$, fonctionnant avec l'atmosphère à $T_1 = 30\ °\text{C}$ comme source chaude. Le coefficient d'efficacité vaut $e_{\text{rev}} = 6,6$, c'est-à-dire qu'on pompe $6,6$ fois plus de chaleur de la source froide qu'on a fourni de travail au fluide.

3.2 Pompe à chaleur.

3.2.1 Position du problème.

On a vu qu'une machine monotherme permet de réaliser un chauffage par conversion en chaleur du travail reçu par le fluide (donc fourni par l'utilisateur). D'après (4), on a :

$$\frac{-\,Q_{\text{recue}}}{W_{\text{recu}}} = 1 \tag{29}$$

On récupère donc autant de chaleur qu'on a fourni de travail. C'est le principe d'un radiateur électrique qui convertit en chaleur le travail électrique qui lui est fourni (effet Joule). Le problème est le suivant : peut-on, avec une machine ditherme réceptrice, obtenir un meilleur coefficient d'efficacité, c'est-à-dire récupérer une quantité de chaleur supérieure à la quantité de travail qu'on a fourni ?

3.2.2 Principe de la pompe à chaleur.

La pompe à chaleur est une machine ditherme réceptrice dont le but est de chauffer la source chaude (la plupart du temps un bâtiment), soit $Q_{1\,\text{recue}} < 0$. Le transfert thermique étant non spontané, on s'attend évidemment à devoir fournir du travail. En effet, comme $T_1 > T_2$, la relation (7) donne :

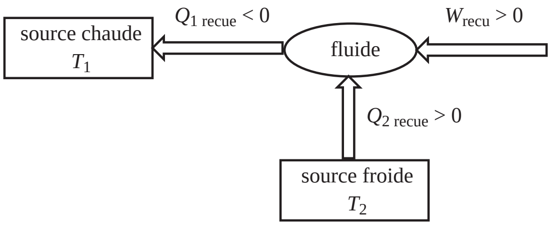
$$W_{\text{recu}} = T_2 S_{\text{cr}} - Q_{1\,\text{recue}}\left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) > 0 \tag{30}$$

D'après (6), la chaleur reçue de la source froide peut *a priori* être positive ou négative :

$$Q_{2\,\text{recue}} = -\underbrace{T_2 S_{\text{cr}}}_{>0} - \underbrace{\frac{T_2}{T_1} Q_{1\,\text{recue}}}_{<0} \tag{31}$$

Comme on le verra, la pompe à chaleur n'est intéressante que si ce terme est positif, c'est-à-dire si le fluide reçoit effectivement de la chaleur de la source froide. Dans le cas de la réversibilité ($S_{\text{cr}} = 0$), l'équation précédente montre que $Q_{2\,\text{recue}} > 0$, car $Q_{1\,\text{recue}} < 0$.

En définitive, le fluide reçoit réellement un travail, reçoit de la chaleur de la source froide et cède de la chaleur à la source chaude. Le dispositif est analogue à celui d'une machine frigorifique.



3.2.3 Coefficient d'efficacité.

L'opérateur fournit le travail, et veut récupérer la chaleur au niveau de la source chaude. Le coefficient d'efficacité est donc :

$$\boxed{e = \frac{-\,Q_{1\,\text{recue}}}{W_{\text{recu}}}} \tag{32}$$

Dans le cas d'une pompe à chaleur réversible, soit $S_{\text{cr}} = 0$, la relation (30) conduit à un coefficient d'efficacité qui ne dépend que des températures des sources (théorème de Carnot) :

$$\boxed{e_{\text{rev}} = \frac{1}{1 - \dfrac{T_2}{T_1}} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}} \tag{33}$$

On constate que le coefficient d'efficacité est d'autant plus grand que T_1 et T_2 sont proches. En pratique, on choisit comme source froide un milieu de température constante pas trop basse, tel le fond d'un lac (cas de l'Hôtel de Ville de Zürich), un puits de mine, etc.

Il reste à justifier que le fluide doive recevoir de la chaleur de la source froide. En utilisant le premier principe, le coefficient d'efficacité s'écrit :

$$e = \frac{-\,Q_{1\,\text{recue}}}{-Q_{1\,\text{recue}} - Q_{2\,\text{recue}}} = \frac{1}{1 + \dfrac{Q_{2\,\text{recue}}}{Q_{1\,\text{recue}}}} \tag{34}$$

La pompe à chaleur n'est intéressante que si le coefficient d'efficacité est supérieur à 1, donc si le dénominateur est inférieur à 1. Comme $Q_{1\,\text{recue}} < 0$, il faut nécessairement que $Q_{2\,\text{recue}} > 0$, c'est-à-dire que le fluide reçoive de la chaleur de la source froide. Dans le cas contraire, la pompe à chaleur est moins efficace qu'une machine monotherme.