

CHAPITRE 22

Machines thermiques

Bibliographie

- ⚡ Cap Prépa Physique MPSI–PCSI–PTSI, Pérez, 2013 → Chapitre 18
- ⚡ Cours PCSI, N. Valade → Chapitre 22

Stand by, Chewie. Cut in the sublight engines...
Han Solo - Star Wars IV : A New Hope (1977)

Les principes de la thermodynamiques que nous avons étudié précédemment ont été introduits durant le développement des moteurs. Ces derniers sont un exemple d'application concrète pouvant être étudié grâce aux outils thermodynamiques que nous maîtrisons. D'autres dispositifs peuvent être ainsi étudiés, ils sont rassemblé sous l'appellation de machines thermiques.

I Généralités sur les machines thermiques

Objectif : Les machines thermiques ont été mises au point pour effectuer des échanges énergétiques ciblés. Jusque là nous avons étudié les évolutions spontanées d'un système soumis à des contraintes extérieures.

⚡ Machines thermiques usuelles

- les moteurs devant fournir du travail à l'utilisateur
- les machines frigorifiques devant prélever de l'énergie à ce qu'il contient pour en abaisser la température
- les pompes à chaleur devant puiser de l'énergie à l'air extérieur pour la transférer à l'intérieur d'un bâtiment afin de le réchauffer

D'un point de vue pratique, il est intéressant que de tels dispositifs aient un fonctionnement **cyclique**. Nous nous concentrerons dans la suite sur de tels dispositifs cycliques.

⚡ Machines thermiques à fonctionnement cyclique

Le système étudié dans une machine thermique est défini par le fluide contenu dans la machine et subissant une évolution cyclique (États initial et final identiques).

- Le système subit une transformation cyclique, les états initial et final sont identiques alors $\Delta U_{cycle} = 0$ et $\Delta S_{cycle} = 0$.
- Le système reçoit de l'énergie de un ou plusieurs thermostats.
- Le système reçoit (ou fournit) a priori un travail.

L'entropie reçue par le système s'écrit

$$S_r = \sum_k \frac{Q_k}{T_k} \text{ donc } S_c = - \sum \frac{Q_k}{T_k} \geq 0.$$

avec Q_k la chaleur reçue par le thermostat k de température T_k .

⚡ Inégalité de Clausius

Un système subissant une évolution cyclique est caractérisée par l'inégalité de Clausius

$$\sum_k \frac{Q_k}{T_k} \leq 0;$$

où Q_k est la chaleur reçue par le système depuis le thermostat k de température T_k .

Remarque importante : il y a égalité pour un cycle réversible.

? TD26 – App1

Interprétation : Il est impossible de convertir intégralement de l'énergie thermique en énergie mécanique, cette dissymétrie est décrite par le second principe de la thermodynamique.



II Machines thermiques cycliques dithermes

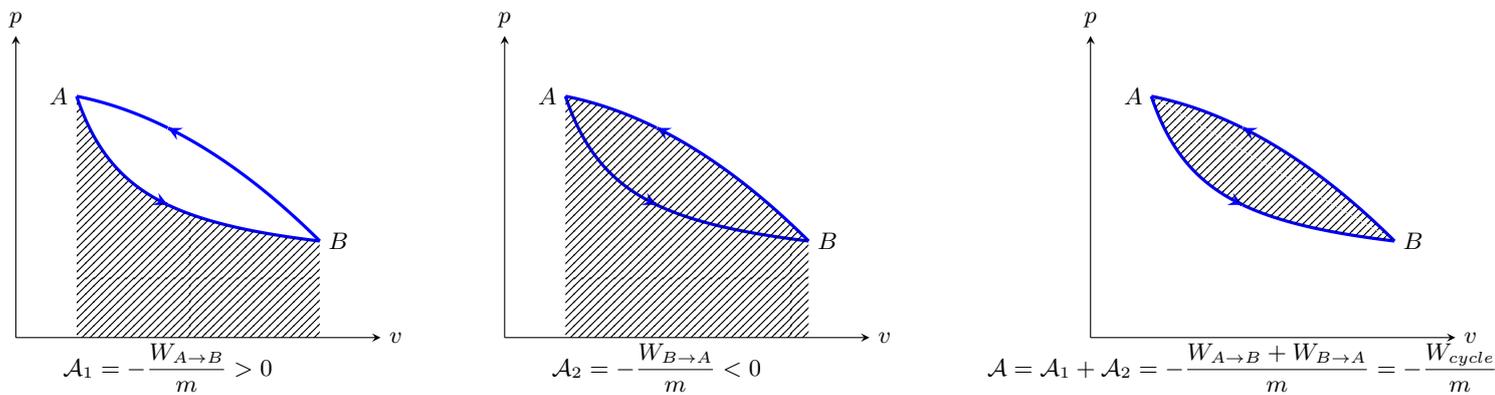
Vous l'aurez compris l'étude des machines thermiques passe par l'écriture de bilans d'énergie et d'entropie sur une transformation cyclique.

2.1 Interprétation géométrique du travail des forces de pression

Pour une telle transformation cyclique, le travail reçu par le système en un cycle est identifiable à l'aire contenu dans le cycle. On peut s'en convaincre aisément géométriquement, ou bien on peut faire le calcul.

⚡ Travail d'une transformation cyclique

L'aire du cycle dans le diagramme de Clapeyron représente l'opposé du travail massique reçu par le système, tandis que l'aire du cycle dans le diagramme de Watt représente l'opposé du travail reçu par le système.



Dans cet exemple le travail reçu par le système lorsqu'il parcourt un cycle est positif.

- Si le cycle est parcouru dans le sens direct alors $W_{cycle} > 0$, le cycle est dit récepteur i.e. reçoit du travail de l'extérieur. exemple : une machine frigorifique.
- Si le cycle est parcouru dans le sens indirect alors $W_{cycle} < 0$, le cycle est dit moteur i.e. cède du travail à l'extérieur. exemple : moteur à combustion.

? TD26 – App2

2.2 Moteur ditherme

Un moteur est un dispositif permettant de produire du travail $W > 0$. Considérons le cas le plus simple qui nous permettra d'obtenir un cycle moteur : le moteur ditherme. Ce système est alternativement en contact avec deux thermostats.

- Un thermostat de température T_c appelé « source chaude ».
- Un thermostat de température $T_f < T_c$ appelé « source froide ».

Le système va donc recevoir de la chaleur depuis la source chaude ($Q_c > 0$) et céder une chaleur à la source froide ($Q_f < 0$), le tout en produisant/cédant du travail ($W < 0$).

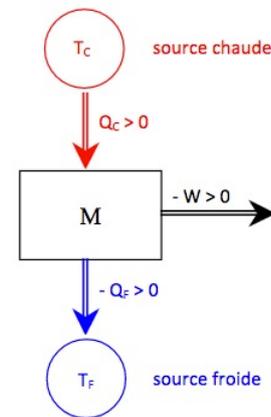


FIGURE 1 – Moteur

⚡ Rendement
 Le rendement d'un dispositif est égal au rapport de la grandeur utile par la grandeur « coûteuse ». Dans le cas d'un moteur ditherme le rendement s'écrit donc

$$\eta = \frac{|W|}{Q_c} .$$

Remarque importante : Bien faire attention aux signes de W , Q_f et Q_c . Pour un moteur $W < 0$ alors $|W| = -W$.

Écrivons un bilan d'énergie et d'entropie

$$\begin{cases} \Delta U = Q_c + Q_f + W = 0 \\ \Delta S = \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} + S_c = 0 \end{cases} \implies \begin{cases} W = -Q_c - Q_f ; \\ \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0 \end{cases} \implies W \geq -Q_c + Q_c \frac{T_f}{T_c} = -Q_c \left(1 - \frac{T_f}{T_c} \right) < 0 .$$

Ainsi le rendement peut se réécrire $\eta = \frac{|W|}{Q_c} \leq 1 - \frac{T_f}{T_c}$.

⚡ Théorème de Carnot pour un moteur
 Le rendement énergétique d'un moteur cyclique ditherme vérifie

$$\eta \leq \eta_{max} = 1 - \frac{T_f}{T_c} .$$

Le rendement maximal (ou rendement de Carnot) correspond à un moteur fonctionnant de façon réversible.

†* Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796–1832) : physicien et ingénieur français.

†* Sadi Carnot (1837–1894) : homme politique français, président de la république de 1887 à 1894. Mort assassiné dans l'exercice de ses fonctions. Il est le neveu du physicien Carnot.

Les phénomènes irréversibles (non uniformité d'une grandeur thermodynamique, dissipation...) sont causes de dégradation du rendement. Par exemple le rendement théorique maximal pour un moteur de voiture ($T_c \approx 10^3\text{K}$ combustion de l'essence, $T_f \approx 300\text{K}$ atmosphère ambiante) est de 0,7. En pratique les rendements mesurés sont plutôt de l'ordre de 0,4.

⚡ Comment augmenter le rendement ?
 Le rendement maximal est d'autant plus grand que T_f/T_c est petit.

⚡ Interprétation du rendement

- Le fait que le rendement soit inférieur à 1 indique qu'un moteur ditherme ne peut convertir intégralement toute l'énergie thermique prélevée en travail.
- Le rendement de Carnot est indépendant de la nature du fluide et de la réalisation technique du moteur.

2.3 Machine frigorifique

Une machine frigorifique est un dispositif permettant d'extraire de l'énergie d'une source froide.

- Un thermostat de température T_c appelé « source chaude » qui correspond à l'air ambiant.
- Un thermostat de température $T_f < T_c$ appelé « source froide » qui correspond à l'intérieur de la machine frigorifique.

Le système va donc recevoir de la chaleur depuis la source froide ($Q_f > 0$) et céder une chaleur à la source chaude ($Q_c < 0$). Ce transfert étant contraire à l'évolution spontanée d'un système, il nécessite un apport de travail au système ($W > 0$).

⚡ Efficacité thermique

L'efficacité thermique d'un dispositif est égal au rapport de la grandeur utile par la grandeur « coûteuse ». Dans le cas d'une machine frigorifique ditherme l'efficacité thermique s'écrit donc

$$e = \frac{Q_f}{W}.$$

Remarque importante : Bien faire attention aux signes de W , Q_f et Q_c . Pour une machine frigorifique $W > 0$ alors $|W| = W$.

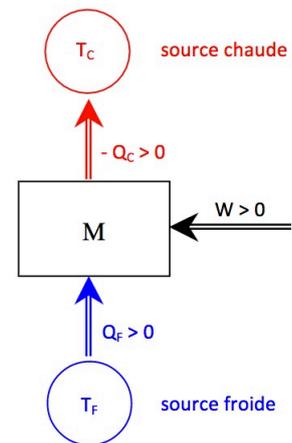


FIGURE 2 – Machine frigorifique

Écrivons un bilan d'énergie et d'entropie

$$\begin{cases} \Delta U = Q_c + Q_f + W = 0 \\ \Delta S = \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} + S_c = 0 \end{cases} \implies \begin{cases} W = -Q_c - Q_f ; \\ \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0 \end{cases} \implies W \geq -Q_f + Q_f \frac{T_c}{T_f} = -Q_f \left(1 - \frac{T_c}{T_f} \right) < 0.$$

Ainsi l'efficacité thermique peut se réécrire $e = \frac{Q_f}{W} \leq \frac{T_f}{T_c - T_f}$.

⚡ Efficacité maximale

L'efficacité thermique d'une machine frigorifique cyclique ditherme vérifie

$$e \leq e_{max} = \frac{T_f}{T_c - T_f}.$$

L'efficacité thermique maximale (ou efficacité de Carnot) correspond à une machine frigorifique fonctionnant de façon réversible.

Par exemple l'efficacité thermique théorique maximale pour une machine frigorifique classique ($T_c \approx 293\text{K}$ air extérieur, $T_f \approx 255\text{K}$ partie congélateur) est de 6,7. En pratique les efficacités thermiques mesurés sont plutôt de l'ordre de 3.

⚡ Comment augmenter une efficacité thermique ?

On pourrait augmenter l'efficacité thermique d'une machine frigorifique en faisant tendre T_c vers T_f . Mais plus la différence de température entre les sources sera faible moins le dispositif trouvera d'utilité en pratique.

⚡ Interprétation de l'efficacité

- L'efficacité est donc le rapport entre l'énergie thermique transférée et le travail nécessaire pour effectuer ce transfert. Elle ne décrit pas une conversion d'énergie (contrairement au rendement) et peut donc être supérieure à 1.
- L'efficacité de Carnot est indépendante de la nature du fluide et de la réalisation technique de la machine frigorifique.

2.4 Pompe à chaleur

Une pompe à chaleur est un dispositif permettant d'apporter de l'énergie à une source chaude.

- Un thermostat de température T_c appelé « source chaude », l'air de la pièce à chauffer.
- Un thermostat de température $T_f < T_c$ appelé « source froide », l'extérieur de la pièce à chauffer.

Le système va donc recevoir de la chaleur depuis la source froide ($Q_f > 0$) et céder une chaleur à la source chaude ($Q_c < 0$). Ce transfert étant contraire à l'évolution spontanée d'un système, il nécessite un apport de travail au système ($W > 0$).

Remarque : Le comportement est rigoureusement identique à celui d'une machine frigorifique !

⚡ Efficacité thermique

L'efficacité thermique d'un dispositif est égal au rapport de la grandeur utile par la grandeur « coûteuse ». Dans le cas d'une pompe à chaleur ditherme l'efficacité thermique s'écrit donc

$$e = \frac{|Q_c|}{W}.$$

Remarque importante : Bien faire attention aux signes de W , Q_f et Q_c . Pour une machine frigorifique $W > 0$ alors $|W| = W$.

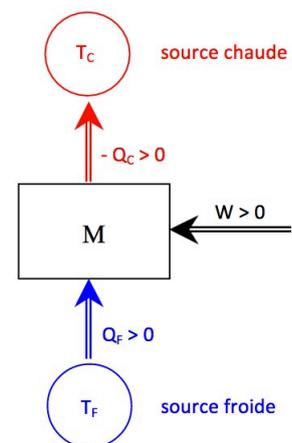


FIGURE 3 – Pompe à chaleur

Écrivons un bilan d'énergie et d'entropie

$$\begin{cases} \Delta U = Q_c + Q_f + W = 0 \\ \Delta S = \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} + S_c = 0 \end{cases} \implies \begin{cases} W = -Q_c - Q_f ; \\ \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0 \end{cases} \implies W \geq -Q_c + Q_c \frac{T_f}{T_c} = -Q_c \left(1 - \frac{T_f}{T_c} \right) < 0.$$

Ainsi l'efficacité thermique peut se réécrire $e = \frac{|Q_c|}{W} \leq \frac{T_c}{T_c - T_f}$.

⚡ Efficacité maximale

L'efficacité thermique d'une machine frigorifique cyclique ditherme vérifie

$$e \leq e_{max} = \frac{T_c}{T_c - T_f} .$$

L'efficacité thermique maximale (ou efficacité de Carnot) correspond à une machine frigorifique fonctionnant de façon réversible.

? Comparaison pompe à chaleur/chauffage électrique

Pour un intérieur à 293K et un extérieur à 268K on trouve une efficacité thermique théorique maximale $e_{max} \approx 11,2$. En pratique e est plutôt de l'ordre de 4, en d'autres termes pour 1J d'électricité dépensée l'intérieur reçoit 4J d'énergie sous forme thermique alors que pour un radiateur électrique idéal on recevrait 1J pour 1J consommé. D'un autre côté, un radiateur électrique composé d'un générateur de f.e.m. E , de résistance interne r associé à une résistance chauffante R aura un rendement de la forme

$$\eta = \frac{Ri^2}{Ei} = \frac{Ri^2}{(R+r)i^2} = \frac{R}{R+r} < 1 .$$

Un radiateur électrique aura un rendement nécessairement inférieure à 1, il tendra vers cette limite si le radiateur présente une grande résistance R . Il s'agit d'une conversion d'énergie électrique en un transfert thermique $\eta \leq 1$. Les pompes à chaleur sont donc d'excellent dispositifs de chauffage.

⚡ Comment augmenter une efficacité thermique ?

On pourrait augmenter l'efficacité thermique d'une pompe à chaleur en faisant tendre T_c vers T_f . Mais plus la différence de température entre les sources sera faible moins le dispositif trouvera d'utilité en pratique.

⚡ Interprétation de l'efficacité

- L'efficacité est donc le rapport entre l'énergie thermique transférée et le travail nécessaire pour effectuer ce transfert. Elle ne décrit pas une conversion d'énergie (contrairement au rendement) et peut donc être supérieure à 1.
- L'efficacité de Carnot est indépendante de la nature du fluide et de la réalisation technique de la machine frigorifique.

2.5 Théorème de Carnot

⚡ Machines thermiques usuelles

- Pour le moteur, on parle de rendement énergétique. Celui-ci est nécessairement inférieur à 1.
- Pour la machine frigorifique et la pompe à chaleur, on parle d'efficacité énergétique ou thermique. Celle-ci peut être supérieure à 1.

⚡ Théorème de Carnot

Le rendement ou efficacité d'une machine cyclique ditherme réelle est inférieur à celui d'une machine cyclique ditherme réversible.

? TD26 – App3

III Moteurs thermiques

3.1 Moteur ditherme idéal : la machine de Carnot

Le cycle ditherme théorique, réversible, donnant le rendement de Carnot est appelé cycle de Carnot.

⚡ Cycle de Carnot

- Les échanges thermiques entre 2 corps de températures différentes sont irréversibles. Les transferts thermiques avec les sources froide et chaude doivent se faire à la température des sources, ce sont donc deux **isothermes** à T_c et T_f .
- Le passage d'une isotherme à l'autre doit être **isentropique**. Ce seront des **compressions ou des détentes réversibles**. Pour un gaz parfait par exemple, elles suivront les lois de Laplace.

Remarque importante : Dans la suite on considèrera que le système est constitué d'un gaz parfait.

Diagramme de Watt (p, V)

Isotherme : c'est une fonction inverse.
Isentropique : c'est une courbe en $p \propto 1/V^\gamma$.

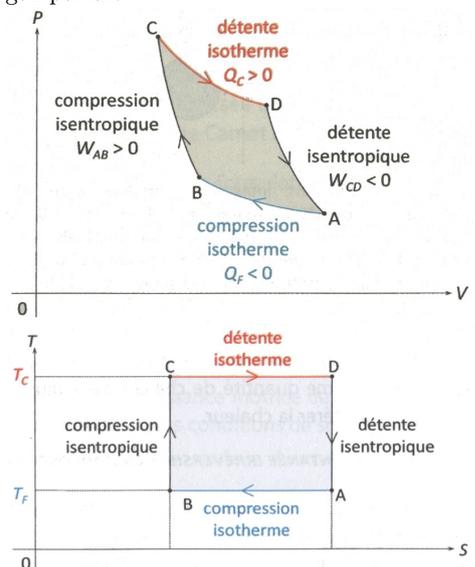
Travail du cycle $W = \int \delta W = - \int p dV = -A$.

? Justifier l'allure des courbes du diagramme ci-contre

Diagramme entropique (T, S)

Isotherme : c'est une horizontale.
Isentropique : c'est une verticale.

Transfert thermique total $Q = \int \delta Q = \int T dS = A$.



Remarque : Le bilan d'énergie interne sur un cycle s'écrit $W + Q = 0$, donc les aires sont égales.

➤ Rendement de Carnot

Le rendement de Carnot est égal à la valeur maximale du rendement théorique $\eta_c = 1 - \frac{T_f}{T_c}$.

3.2 Récepteur ditherme idéal : la machine de Carnot

De même que pour le moteur, si l'on considère un cycle réversible on montre que l'efficacité d'une machine thermique réversible est égale à l'efficacité maximale de la dite machine thermique.

➤ Efficacité de Carnot

L'efficacité de Carnot est égal à la valeur maximale de l'efficacité théorique $e_{c,frigo} = \frac{T_f}{T_c - T_f}$; $e_{c,pompe} = \frac{T_c}{T_c - T_f}$.

3.3 Moteur ditherme réel : le moteur de Stirling

†* Robert Stirling (du clan Mac Gregor a priori comme Ewan Mac Gregor ! Mais si Obi Wan Kenobi !) (1790–1878) : pasteur, mécanicien et métallurgiste écossais.

👉 Moteur de Stirling

➤ Cycle théorique de la machine de Stirling

- Détente isotherme 1 → 2
- Refroidissement isochore 2 → 3
- Compression isotherme 3 → 4
- Chauffage isochore 4 → 1

Remarque : On trouve certains satellites équipés de génératrices de Stirling, en présence d'une source chaude (échantillon radioactif) et d'une source froide (l'espace) le moteur se met en mouvement et entraîne une génératrice qui va fournir de l'électricité pour alimenter l'équipement embarqué dans le satellite.

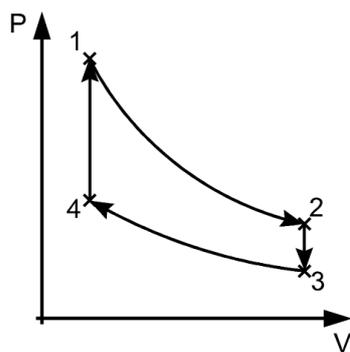


FIGURE 4 – Cycle de Stirling théorique

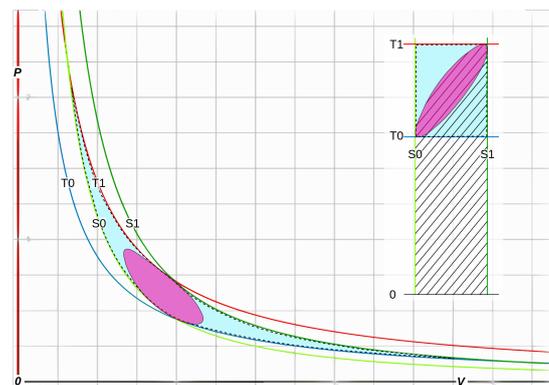


FIGURE 5 – Cycle de Stirling réel

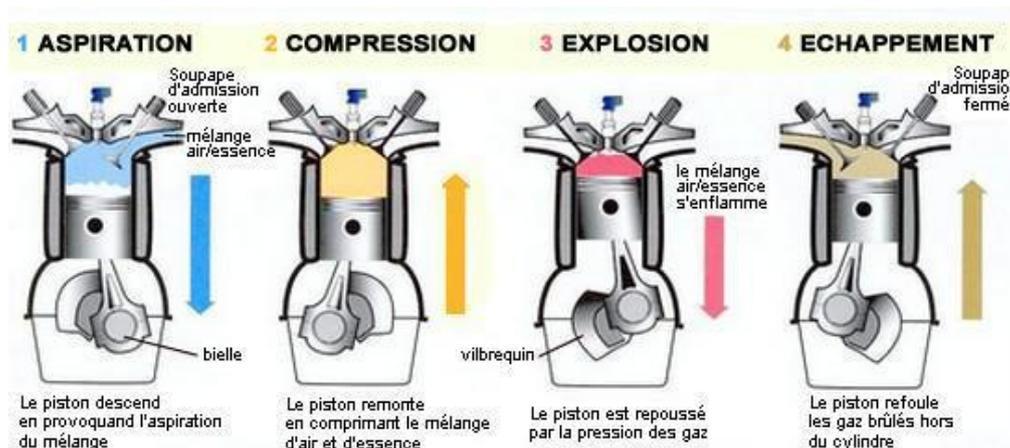
3.4 Moteur ditherme réel : le moteur à combustion

En 1862, Alphonse Beau (dit Beau de Rochas) dépose un brevet concernant un cycle dont l'intérêt est de décrire le cycle à quatre temps du moteur à combustion interne d'automobile. En 1876, Nikolaus Otto réalise la première mise en application de ce cycle.

†* Alphonse Eugène Beau (1815–1893) : ingénieur français.

†* Nikolaus Otto (1832–1891) : inventeur et industriel allemand.

Un moteur est constitué d'un bloc percé d'un (ou plusieurs) cylindre. Dans un cylindre un piston peut coulisser, ce dernier est relié à une bielle qui transforme le mouvement de translation du piston en mouvement de rotation du vilebrequin. Deux soupapes permettent au cylindre de se remplir ou de se vider de son contenu de gaz. Le fonctionnement d'un tel moteur est décrit par quatre étapes.



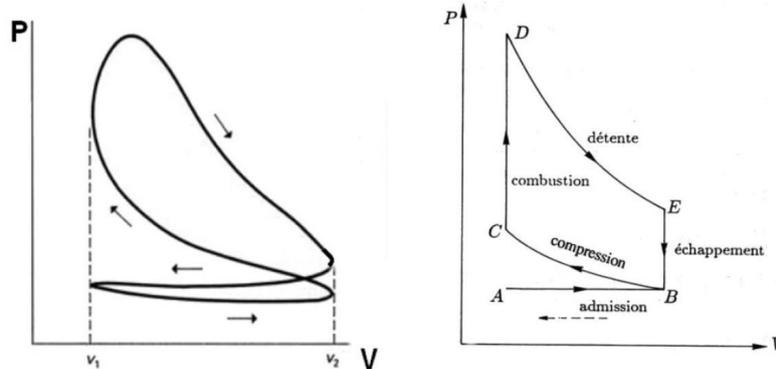
Étapes de fonctionnement du moteur à combustion

- Admission : le piston descend et la soupape d'admission est ouverte, alors le mélange air-carburant rentre dans le cylindre.
- Compression : la soupape d'admission se ferme et le piston remonte.
- Combustion et détente : les soupapes sont fermées, la bougie produit une étincelle pour enflammer le mélange air-carburant. La pression augmente brutalement et repousse le piston (c'est le **temps moteur**).
- Échappement : la soupape d'échappement s'ouvre, les gaz brûlés sont éjectés.

Remarque : Dans le cas du moteur Diesel il n'y a pas de bougie ! Une compression adiabatique chauffe fortement l'air puis le carburant est injecté rapidement, la combustion démarre spontanément à cause de la température élevée du mélange.

✪* *Rudolf Diesel (1858–1913) : Industriel et ingénieur allemand.*

Ces étapes peuvent être représentées dans un diagramme de Watt ou de Clapeyron.



Cycle de Beau de Rochas

- $A \rightarrow B$: Admission à pression constante (soupape ouverte).
- $B \rightarrow C$: Compression adiabatique (suffisamment rapide) et réversible (frottements du piston négligés et vitesse du piston négligeable devant la vitesse du son dans le gaz).
- $C \rightarrow D$: Combustion isochore (car augmentation de pression brutale) modélisée par le contact avec une source chaude fictive.
- $D \rightarrow E$: Détente adiabatique et réversible.
- $E \rightarrow B$: Ouverture de la soupape, détente isochore. En réalité les gaz brûlés sont évacués et laissent place à un nouveau mélange, on suppose pour simplifier l'étude que le gaz avant et après combustion a les mêmes propriétés thermodynamiques et ainsi on peut se limiter à l'étude du cycle $BCDE$.

En utilisant le bilan d'énergie interne sur un cycle $W + Q_{CD} + Q_{EB} = 0$, le rendement de ce moteur s'écrit

$$\eta = \frac{-W}{Q_{CD}} = \frac{Q_{CD} + Q_{EB}}{Q_{CD}} = 1 + \frac{Q_{EB}}{Q_{CD}}.$$

Lors des transformations isochores on a $\Delta U_{CD} = Q_{CD} = C_v(T_D - T_C)$ et $\Delta U_{EB} = Q_{EB} = C_v(T_B - T_E)$ alors

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

Les transformations DE et BD sont adiabatiques réversibles et le gaz de la machine est supposé parfait donc

$$T_E V_E^{\gamma-1} = T_D V_D^{\gamma-1}; T_C V_C^{\gamma-1} = T_B V_B^{\gamma-1};$$

alors le rendement devient

$$\eta = 1 + \frac{T_B - T_D a^{\gamma-1}}{T_D - T_B a^{1-\gamma}} = 1 - a^{\gamma-1} \text{ avec } a = \frac{V_{\min}}{V_{\max}} = \frac{V_D}{V_E} = \frac{V_B}{V_C}.$$

Classiquement le rapport volumétrique est de l'ordre de 10, ce qui conduit à un rendement maximal théorique de 60%. En pratique il est plutôt de l'ordre de 40% car le cycle n'est pas irréversible, il n'est pas non plus représenté par les 4 évolutions idéalisées mentionnées précédemment, la pression n'est pas uniforme dans le gaz. Notons que le rendement réel d'une voiture est encore plus faible à causes de diverses pertes dont les frottements mécaniques, on arrive autour de 15% de rendement.

3.5 Machine thermique avec changement d'état

? TD26 – Pb1

IV Machines frigorifiques

4.1 Description

Dans une machine frigorifique un fluide frigogène suit un cycle récepteur au cours duquel il prélève de l'énergie sous forme thermique à la source froide et en cède à la source chaude. Il est nécessaire que ce fluide soit en écoulement pour être en contact avec l'une des sources puis l'autre.

- Évaporateur : dispositif dans lequel le fluide frigogène s'évapore en prélevant de l'énergie à la source froide.
- Compresseur : dispositif fournissant du travail au fluide frigogène.
- Condenseur : dispositif dans lequel le fluide frigogène se condense en cédant de l'énergie à la source chaude.
- Détendeur : dispositif permettant de réduire la pression et d'abaisser la température de vaporisation du fluide frigogène avant d'entrer dans l'évaporateur.

La plupart des machines thermiques (exception faite des moteurs à essence) utilisent des changements d'état pour exploiter les avantages respectifs des liquides et des gaz.

- Les liquides ont une grande capacité thermique massique mais une faible compressibilité. Ils sont particulièrement adaptés aux transferts thermiques.
- Les gaz ont une faible capacité thermique massique mais une grande compressibilité, ils sont particulièrement adaptés aux transferts sous forme de travail.

4.2 Cycle de fonctionnement

Les états numérotés 1 à 7 sont représentés sur le diagramme (p, H) en fin de partie.

Compresseur 12 : le travail reçu permet l'augmentation de la pression du gaz. La compression rapide est supposée adiabatique et réversible, la température augmente jusqu'à $T > T_C$.
→ transformation sans échange thermique.

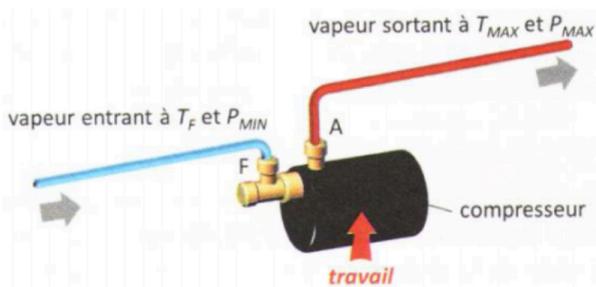


FIGURE 6 – Compresseur



sur le diagramme (p, H) en fin de partie.

Détendeur 55'6 : abaissement de la pression du gaz et de sa température jusqu'à $T < T_F$.

- 55' : détente du liquide.
- 5'6 : vaporisation partielle du liquide à $T = T_{vap} < T_F$.
→ transformation sans travail utile et transfert thermique.

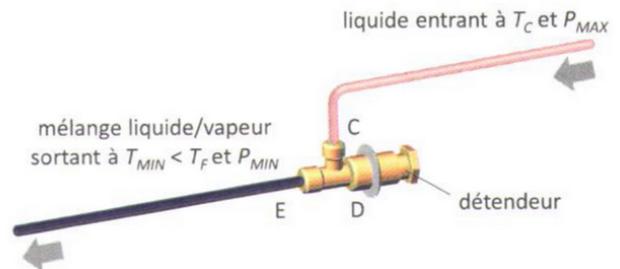


FIGURE 7 – Détendeur

Condenseur 2345 : le fluide circule dans un tube en contact avec la source chaude.

- 23 : le fluide, à l'état gazeux, cède de l'énergie à la source chaude jusqu'à $T = T_{vap} > T_C$.
- 34 : le fluide se liquéfie totalement à $T = T_{vap} > T_C$.
- 45 : le fluide, à l'état liquide, continue de céder de l'énergie à la source chaude jusqu'à $T = T_C$.
→ transformation sans travail utile.

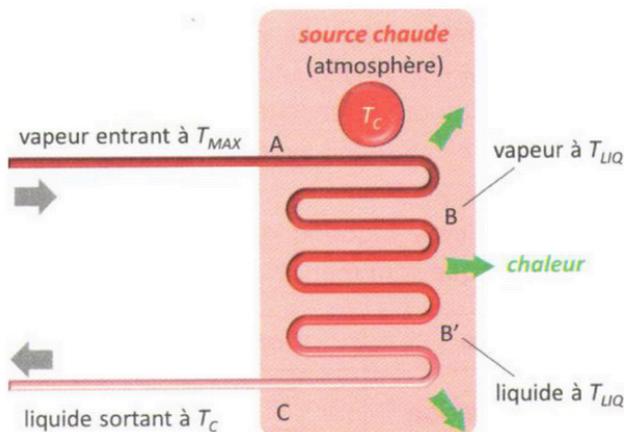


FIGURE 8 – Condenseur

Évaporateur 671 : le fluide circule dans un tube en contact avec la source froide.

- 67 : vaporisation totale du fluide à $T = T_{vap}$.
- 71 : le fluide, à l'état gazeux, reçoit de l'énergie sous forme thermique de la part de la source froide jusqu'à $T = T_F$.
→ transformation sans travail utile.

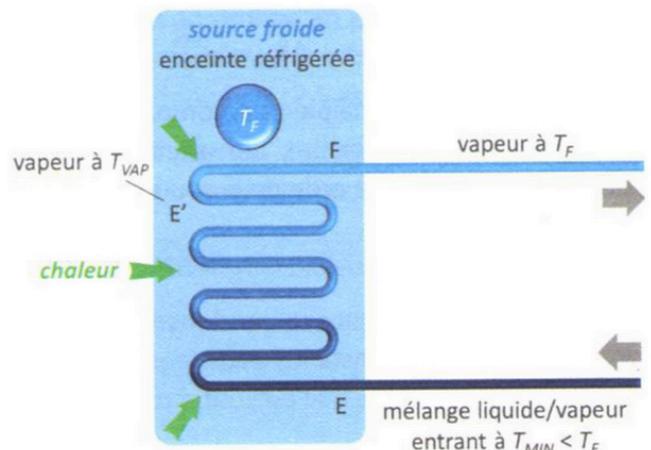
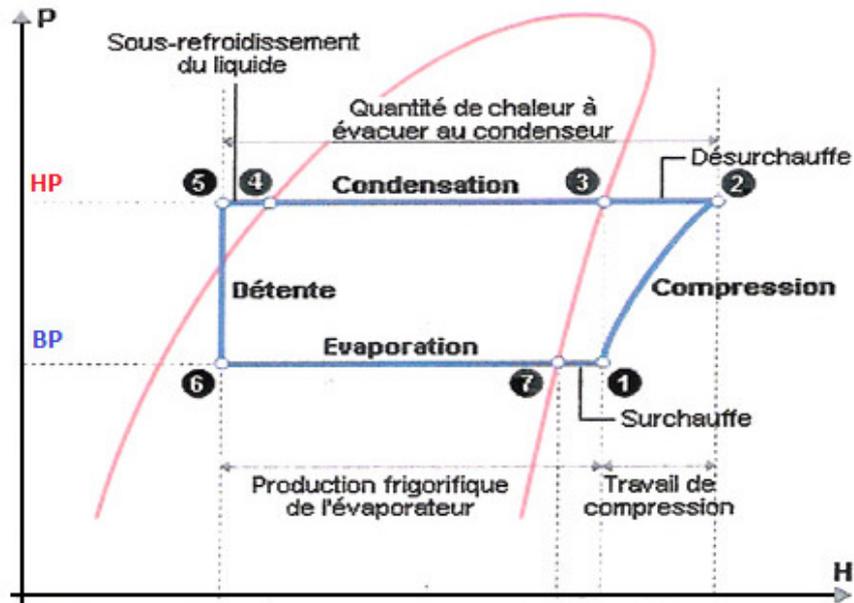


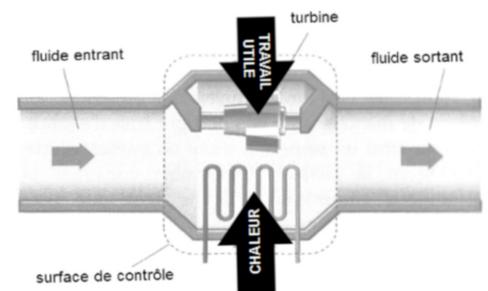
FIGURE 9 – Évaporateur



4.3 Bilan d'enthalpie avec écoulement fluide

Remarque : Cette partie est un avant goût de la deuxième année, contentez vous d'étudier et comprendre cette partie (elle n'est pas à savoir refaire pour le moment). Un fluide en écoulement dans une machine thermique peut recevoir deux types de travaux

- le travail des forces de pression exercées sur le fluide, par les fluides se trouvant en amont et en aval du volume étudié ;
- le travail utile cédé par les parties mobiles du dispositif (turbine...).



➤ Bilan d'enthalpie massique appliqué à un fluide en écoulement

Hypothèses : Écoulement suffisamment lent (transformation quasi-statique) et variation d'altitude négligeable ($\Delta \mathcal{E}_p = 0$).

Un fluide en écoulement peut recevoir un **travail des forces de pression**, un **travail utile** (lié aux interactions avec les parties mobiles de la machine) et un **transfert thermique**. Ainsi le bilan d'enthalpie massique appliqué au fluide entre l'entrée et la sortie du dispositif s'écrit

$$\Delta h = h_s - h_e = w_u + q ;$$

avec w_u travail utile massique et q transfert thermique massique reçus par le fluide.

Le bilan peut également s'écrire

$$D_m \times \Delta h = D_m(h_s - h_e) = \mathcal{P}_u + \mathcal{P}_{th} ;$$

avec D_m le débit massique du fluide, \mathcal{P}_u la puissance utile et \mathcal{P}_{th} la puissance thermique reçue par le fluide.

Notons Σ_o le **système ouvert** qui à l'instant t se trouve dans le dispositif. En un intervalle de temps Δt une masse m_e pénètre dans le système à l'altitude z_e avec une vitesse c_e tandis qu'une masse m_s sort du système à l'altitude z_s avec une vitesse c_s .

Notons Σ_f le **système fermé** composé

- à l'instant t_1 du fluide contenu dans le dispositif (Σ_o) et de la masse m_e qui pénètre dans le dispositif pendant Δt ;
- à l'instant t_2 du fluide contenu dans le dispositif (Σ_o) et de la masse m_s qui sort du dispositif pendant Δt .

Soit $M(t)$ la masse totale de fluide de Σ_o à l'instant t . Le système Σ_f étant fermé on a $M_{\Sigma_f}(t_2) = M_{\Sigma_f}(t_1)$. De plus $M_{\Sigma_f}(t_1) = M(t_1) + m_e$ et $M_{\Sigma_f}(t_2) = M(t_2) + m_s$. On trouve donc

$$M(t_2) + m_s = M(t_1) + m_e .$$

L'écoulement étant stationnaire on a $M(t_2) = M(t_1)$ donc $m_e = m_s$.

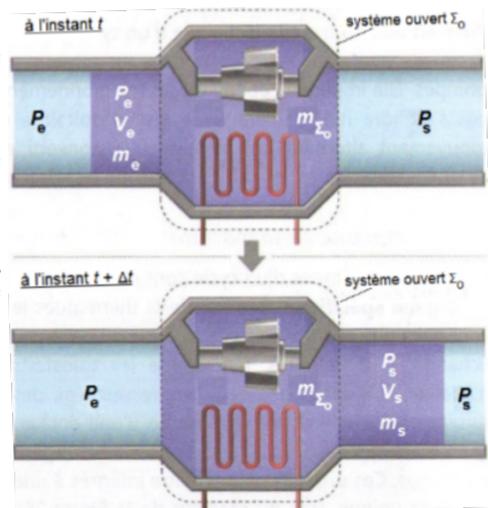
Un bilan d'énergie appliqué au système fermé s'écrit

$$\Delta \mathcal{E}_{\Sigma_f} = \Delta \mathcal{E}_{m, \Sigma_f} + \Delta U_{\Sigma_f} = W_u + W_p + Q .$$

Détaillons les différents termes énergétiques.

- Énergie mécanique macroscopique

$$\begin{aligned} \Delta \mathcal{E}_{m, \Sigma_f} &= \mathcal{E}_{m, \Sigma_f}(t_2) - \mathcal{E}_{m, \Sigma_f}(t_1) \\ &= \left(\mathcal{E}_{m, \Sigma_o}(t_2) + m_s g z_s + \frac{1}{2} m_s c_s^2 \right) - \left(\mathcal{E}_{m, \Sigma_o}(t_1) + m_e g z_e + \frac{1}{2} m_e c_e^2 \right) \\ &= \left(\mathcal{E}_{m, \Sigma_o}(t_2) - \mathcal{E}_{m, \Sigma_o}(t_1) \right) + \left(m_s g z_s + \frac{1}{2} m_s c_s^2 \right) - \left(m_e g z_e + \frac{1}{2} m_e c_e^2 \right) . \end{aligned}$$



L'écoulement étant stationnaire $\mathcal{E}_{m,\Sigma_o}(t_2) = \mathcal{E}_{m,\Sigma_o}(t_1)$ et $m_e = m_s = m$ donc

$$\Delta\mathcal{E}_{m,\Sigma_f} = mg(z_s - z_e) + \frac{1}{2}m(c_s^2 - c_e^2) .$$

– Énergie interne

$$\begin{aligned} \Delta U_{\Sigma_f} &= U_{\Sigma_f}(t_2) - U_{\Sigma_f}(t_1) \\ &= (U_{\Sigma_o}(t_2) + m_s u_s) - (U_{\Sigma_f}(t_1) + m_e u_e) ; \end{aligned}$$

avec u_e et u_s l'énergie interne massique du fluide entrant et sortant du système ouvert.

L'écoulement étant stationnaire $U_{\Sigma_o}(t_2) = U_{\Sigma_o}(t_1)$ et $m_e = m_s = m$ donc

$$\Delta U_{\Sigma_f} = m(u_s - u_e) .$$

– Le travail des forces de pression se décompose comme le travail d'admission W_e et le travail de refoulement W_s

$$W = W_e + W_s = -p_e \Delta V_e - p_s \Delta V_s = p_e V_e - p_s V_s = p_e v_e m_e - p_s v_s m_e = m(p_e v_e - p_s v_s) .$$

Le bilan d'énergie peut se réécrire

$$m \left[gz + \frac{1}{2}c + u \right]_e^s = m [pv]_e^s + mw_u + mq \Rightarrow \left[gz + \frac{1}{2}c + h \right]_e^s = w_u + q .$$

En général l'écoulement est suffisamment lent et la variation d'altitude suffisamment faible, le bilan d'énergie dans ce cas devient

$$[h]_e^s = w_u + q .$$