

LP14 – Machines thermiques

29 juin 2020

Laura Guislain & Pascal Wang

Niveau : L1

Commentaires du jury

Bibliographie

📖 *Le nom du livre, l'auteur*¹

→ Expliciter si besoin l'intérêt du livre dans la leçon et pour quelles parties il est utile.

Prérequis

➤ premier principe en écoulement

Expériences

☞ Biréfringence du quartz

Table des matières

1	Notion de machine thermique	3
1.1	Définition du système	3
1.2	Application des principes de la thermodynamique	3
1.3	Rendements et coefficients de performance (COP)	5
2	Réfrigérateur	6
2.1	Principe de fonctionnement	6
2.2	Description thermodynamique	7
2.3	COP et causes de pertes	8
3	Les moteurs thermiques	10
3.1	Le moteur à essence	10
3.2	Modélisation thermodynamique	11
3.3	Le Cycle diesel	13
3.4	Centrales thermiques	14
4	Compléments	16
5	Questions	17
6	Commentaires	18
7	Questions vrac	19

Jury

- **2017** : L'utilisation de diagrammes enthalpiques peut permettre de discuter de façon quantitative l'irréversibilité d'une machine réelle et, en plus, d'éviter de se contenter du modèle du gaz parfait. Le jury rappelle en outre que les machines thermiques ne se limitent pas aux moteurs.
- **2016** : Au-delà des modèles classiques, le candidat s'appuiera sur des diagrammes de fluides réels.
- **2014** : Les moteurs thermiques ne sont pas réalisés en visant uniquement un rendement optimal.
- **2009** : Les applications ne se limitent pas au moteur de Stirling et doivent rester concrètes.
- **2003** : Au delà de l'exposé classique que l'on trouve toujours, il faut discuter les causes d'irréversibilité. Par ailleurs, les moteurs réversibles ont forcément un fonctionnement lent : comment peut-on alors récupérer de la puissance avec une telle machine thermique ? Il est intéressant d'évoquer également la nature des fluides subissant les cycles.

A faire

- Hprepa
- lire cengel, chercher des odg (cf plus bas)
- approfondir le moteur et le III/ (wikipedia)
- cycle de Rankine
- répartir et discuter des rendements dans les parties suivantes https://fr.wikipedia.org/wiki/Rendement_d%27un_moteur_%C3%A0_explosion
- cycle de carnot frigo (hprepa je pense)
- précisions sur les déformations du cycle moteur
- diu p104
- Être plus clair sur le passage en système ouvert
- odg puissance, puissance d'une voiture, de débits dans le frigo, Moteur : faire le lien avec des grandeurs concrètes (chevaux, cylindrée, tour/min...)
- Diagramme : montrer toutes les infos qu'on peut en tirer (variation d'entropie, titre avec le théorème des moments...)

Lectures

- HPrepa thermo MPSI
- Frigo : bup frigo
- Diagrammes thermo : Sanz, BUP, Denis Piccard, « Diagrammes thermodynamique de fluides purs. », mai 2007
- Cengel pour approfondir
- Précis bréal pour vue d'ensemble.
- 832 (qualité de l'énergie, stirling) Notion de qualité de l'énergie par Paul ROUX et Jean-Robert SEIGNE
- L'énergie en mécanique et en thermodynamique par Paul ROUX et Jean-Robert SEIGNE

Plan : objectif 6 min sur la partie I/ 12 min II/ 12 min.

Questions : allures des isomachins sur les diagrammes (P,h) (cf. Sanz + ma fiche), allure du diagramme (T,s) pour les cycles (cf. les images de Benjamin), rankine,

Introduction

Machine mécanique Une machine est un système qui réalise une conversion d'énergie. Les premières machines étaient purement mécaniques : un levier, une poulie, un plan incliné permettent de soulever un objet, et de convertir l'énergie fournie par un homme ou un cheval en énergie potentielle. Un moulin produit du travail à partir de l'énergie cinétique du vent ou de l'eau. Les premières machines à vapeur ont été construites au début du XVIIIe siècle. Au siècle suivant, les ingénieurs ont imaginé et développé d'autres moteurs et d'autres types de machines thermiques, comme les machines frigorifiques.

Machine thermodynamique La thermodynamique associe les deux mots grecs **thermon** et **dynamis** (chaleur et puissance). Son essor au cours du XIXe siècle vient du désir et de la nécessité technique d'analyser ce que Sadi Carnot (1824) appelait "la puissance motrice du feu". Il s'agissait de rechercher les conditions optimales pour transformer la chaleur fournie par une chaudière en travail mécanique, processus réalisé par ce qu'on appelle une machine thermique, par exemple la machine à vapeur. La science et les concepts de la thermodynamique se sont développés conjointement avec les avancées techniques.

Bonus : machine à vapeur  [Super animation wikipedia On peut montrer cette vidéo :https://youtu.be/9mhYnQGZJuM?t=193](https://youtu.be/9mhYnQGZJuM?t=193). La machine à vapeur utilise une chaudière, à charbon par exemple, générer de la vapeur d'eau sous pression, qui est utilisée pour pousser périodiquement un piston et faire tourner une roue motrice. *Dans la version de la vidéo, la vapeur monte naturellement* Le principe est encore utilisé dans les centrales nucléaires et les centrales à charbon : la vapeur d'eau fait tourner des turbines qui produisent de l'électricité. On voit que le fluide subit des transformations périodiques.

Objectif Aujourd'hui, quelques siècles plus tard, les machines thermiques font toujours partie de notre quotidien (moteurs, réfrigérateurs). Il est donc important de s'intéresser à leur fonctionnement, et cela permet d'illustrer les puissances des notions vues précédemment en thermodynamique. On va réinvestir les deux principes de la thermodynamique et étudier le réfrigérateur et le moteur.

1 Notion de machine thermique

1.1 Définition du système

Machine thermique Une machine thermique est un dispositif possédant des pièces mobiles effectuant des transformations, (souvent ?) cycliques, mettant en jeu des échanges thermiques et du travail. En pratique, c'est souvent un fluide qui circule en circuit fermé qui subit ces transformations. On précise qu'on parle ici de la machine dans son ensemble et pas forcément du fluide caloporteur. Certaines machines fonctionnent en système ouvert avec une évacuation d'une partie du fluide (c'est le cas par exemple du moteur à explosion ou d'une centrale thermique).

Définition du système Le système que l'on considère est donc "le fluide parcourant les tuyaux et les organes de la machine."

Propriétés découlant de la cyclicité Souvent, les machines thermiques subissent des transformations cycliques. Sur un cycle, comme le système est revenu à son état initial et que l'énergie interne et l'entropie sont des fonctions d'état :

$$\Delta U = 0 \qquad \Delta S = 0 \qquad \Delta H = 0 \qquad (1)$$



Que disent les principes de la thermodynamique sur de telles machines thermiques ?

1.2 Application des principes de la thermodynamique

Transformations, convention thermodynamique On écrit les deux premiers principes de la thermodynamique pour notre système fermé échangeant de l'énergie sous forme d'un travail total W et des échanges thermiques Q_i successifs avec des thermostats à température T_i [schema]. On précise qu'on utilise la convention thermodynamique : les grandeurs sont positives si le système reçoit de l'énergie.

Application des principes On applique les principes de la thermodynamique au système considéré.

$$\Delta U = W + \sum_i Q_i \qquad \Delta S \geq \sum_i \frac{Q_i}{T_i} \quad (2)$$

On a ici parlé du premier principe de la thermodynamique pour un système fermé, mais lorsque l'on étudie un fluide en écoulement, on applique le premier principe en réacteur ouvert à chaque étape :

$$\Delta h = w + q$$

Machines monothermes, radiateur, énoncé de Kelvin du 2e principe Une machine est dite monotherme lorsqu'elle est en contact avec une seule source de chaleur. Un radiateur électrique est une machine réceptrice monotherme. Il reçoit du travail W sous forme électrique et le restitue par transfert thermique à la pièce qu'il doit chauffer : $\bar{Q} = -W < 0$. Mais refroidir (sans source plus froide à côté) est impossible ! A l'aide des principes, on déduit $Q \leq 0$ et $W = -Q$ donc $W \geq 0$. On retrouve l'énoncé de Kelvin du second principe : il n'existe pas de processus cyclique dans le seul effet serait de fournir du travail à partir d'une seule source de chaleur.²

Machines dithermes On va donc s'intéresser à des machines dans lesquels les transformations mettent en jeu du travail W et deux échanges thermiques Q_C et Q_F avec deux thermostats tels que $T_F < T_C$. On a alors :

$$\Delta U = 0 = W + Q_F + Q_C \qquad \frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} \leq 0 = \Delta S \quad (3)$$

On peut alors tracer deux droites dans un diagramme (Q_F, Q_C) , dit diagramme de Raveau, la droite $Q_C = -Q_F$ et $Q_C = -\frac{T_C}{T_F} Q_F$.

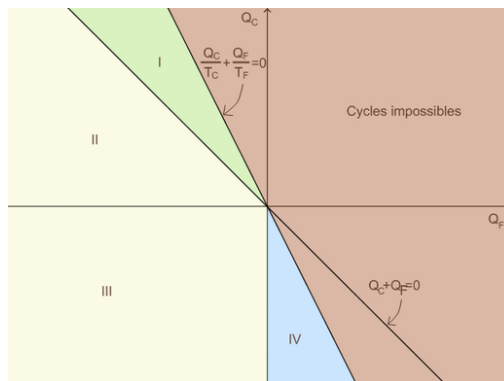


FIGURE 1 – Diagramme de Raveau (source Wikipédia, libre de partage et d'utilisation)

Interprétation

- Zone rouge : Impossible, ne respecte pas le second principe
- Zone I : $Q_F < 0$, $Q_C > 0$, $Q_C + Q_F > 0$ donc $W < 0$, On prend de la chaleur à la source chaude pour fournir du travail, c'est le cas des moteurs. Ex : machine à vapeur en introduction.
- Zone II : $Q_F < 0$, $Q_C > 0$, $W > 0$, cela peut sembler peu intéressant car on peut transférer de l'énergie d'une source chaude vers une source froide par simple contact, sans fournir de travail. En fait, cela peut permettre de l'accélérer.
- Zone III : $Q_F < 0$, $Q_C < 0$, $W > 0$. La machine transforme du travail en transfert thermique cédé aux deux sources. C'est peut intéressant : on se rapproche de la situation monotherme (pas besoin de deux sources).
- Zone IV : $Q_F > 0$, $Q_C < 0$, $W > 0$. On fournit du travail pour chauffer la source chaude et refroidir la source froide. C'est le principe de la pompe à chaleur ou du réfrigérateur.

Bonus : machines n-therme Pourquoi n'étudie pas-t-on les machines à trois, quatre, etc. sources ? Il se trouve que multiplier les sources ne permet pas de dépasser le rendement de Carnot. Mais on utilise des réfrigérateurs en cascade.

2. Voir Diu p104 pour d'autres compléments intéressant (échange entre sources de chaleur, impossibilité des mouvements perpétuels)

1.3 Rendements et coefficients de performance (COP)

On définit par ces termes, le rapport entre ce que l'énergie fournie et l'énergie utile. Attention, cela demande un examen précis de la fonction de chaque machine thermique. On va justifier le choix des grandeurs prises en compte pour définir le rendement et le COP/l'efficacité.

Définition des rendements et des COP

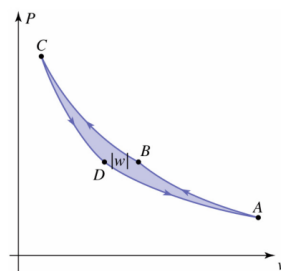
- Pour un moteur, l'objectif est de convertir l'énergie reçue sous forme de chaleur, venant de la source chaude, en travail mécanique. On définit alors le rendement : $\eta = \frac{|W|}{Q_C}$ **ODG**: Moteur à essence $\eta = 0.4$. Centrale nucléaire $\eta = 0.33$
- Pour une pompe à chaleur, le but est de transformer un travail reçu de l'extérieur pour chauffer le milieu chaud (par exemple, l'intérieur d'une maison). Prenons un exemple. On utilise un moteur électrique qui fournit un travail (cela constitue le coût) pour chauffer la maison. Donc c'est le transfert thermique entre la machine et la source chaude qui est la grandeur intéressante. Cela a peu d'importance que cela ait pour conséquence de refroidir le jardin. Le transfert thermique entre la machine et la source froide n'intervient donc pas dans la définition de l'efficacité. On définit alors pour une pompe à chaleur : $COP = \frac{|Q_C|}{W}$ **ODG**: 1.5 à 4.

Rendement de Carnot *Plus tard ?* On utilise alors le premier principe : $W = -Q_C - Q_F$, et on a l'inégalité de Clausius-Carnot due au second principe : $\frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} \leq 0$ donc on obtient que $\eta \leq 1 - \frac{T_F}{T_C} = \eta_c$, où η_c est le rendement maximal ou rendement de Carnot, réalisé lorsqu'il n'y a pas d'entropie créée, soit une transformation réversible, ce qui est un cas limite idéal. En pratique, la dissipation due aux frottements ou à la diffusion thermique fait qu'on n'atteint pas parfaitement le rendement maximal.

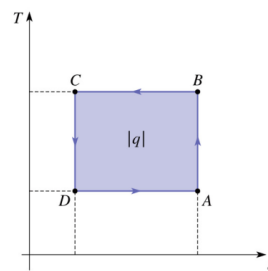
Réalisation du rendement de Carnot *C'est optionnel* Un cycle ditherme réversible est appelé cycle de Carnot. Lors d'un échange thermique, une différence de température entre le système et la source implique l'irréversibilité des échanges thermiques. Les échanges thermiques avec les sources ont donc lieu sur des isothermes à la température des sources. En l'absence d'échange thermique (évolution adiabatique), une évolution réversible est isentropique. En effet $S_{\text{échange}} = 0$, donc $\Delta S = S_{\text{créée}} = 0$. Lorsqu'il n'est pas au contact des sources, le système doit être en évolution isentropique.

Un cycle ditherme réversible, ou cycle de Carnot, doit être constitué par deux isothermes reliés par deux isentropiques.

Bien que de tels cycles atteignent les limites de performances théoriques ρ_{max} , $e_{F\text{max}}$ et $e_{T\text{max}}$, les machines correspondantes sont difficiles à mettre en œuvre techniquement. C'est pourquoi les machines thermiques usuelles fonctionnent suivant des cycles différents.



Doc. 16. Cycle de Carnot d'un gaz parfait. Le cycle représenté est récepteur. AB et CD : isentropiques ; BC et DA : isothermes.



Doc. 17. Cycle de Carnot (récepteur).

[interprétation de l'aire en TS et PV, calcul de rendement, AN centrale nucléaire : 0.33]

Cas de la pompe à chaleur et du réfrigérateur *On peut sauter les calculs* Pour une pompe à chaleur, on obtient $COP < COP^{rev} = \frac{T_C}{T_C - T_F}$ et pour un frigo $COP < COP^{rev} = \frac{T_F}{T_C - T_F}$. Encore une fois, le coefficient d'efficacité maximal est obtenu dans la limite idéale de l'absence de phénomènes dissipatifs (frottements, diffusion thermique). NB : dans la démonstration, il faut faire attention, diviser par Q_C change le signe des inégalités.

Distinction efficacité-rendement *Il faut insister* On peut distinguer efficacité et rendement sur le fait que la valeur du rendement est toujours inférieure à 1, mais pas nécessairement pour l'efficacité. Dans ce cas, on peut parler de rendement pour les moteurs et réserver le terme d'efficacité aux réfrigérateurs et aux pompes à chaleur. NB : Un COP froid peut descendre en dessous de 1 car la puissance consommée par le compresseur peut tout à fait être

supérieure à celle échangée sur la source froide. En revanche, un COP chaud ne peut théoriquement pas descendre sous l'unité car la puissance consommée par le compresseur doit nécessairement être dissipée sur la source chaude pour que le cycle soit à l'équilibre thermodynamique (que la somme des puissances en jeu soit nulle).

Compromis rendement-puissance Les machines thermiques ont donc une efficacité bornée supérieurement et dont la borne est atteinte pour une série de transformations réversibles. Cependant, il faut être conscient qu'une machine de Carnot n'est pas le Graal de la machine thermique. En pratique, pour diminuer les sources d'irréversibilité, il faut parcourir le cycle lentement. La puissance (frigorigique) développée étant $P = -Ef$ où $-E$ est l'énergie (sous forme de travail ou chaleur) utile fournie en un cycle et f la fréquence de parcours d'un cycle, on voit qu'il faut trouver un compromis à trouver en pratique entre rendement/efficacité (petit f) et entre puissance développée/puissance frigorigique nette d'autre part (grand f).

2 Réfrigérateur

2.1 Principe de fonctionnement

On construit le diagramme du cycle au fur et à mesure de l'histoire

Objectif Le but de la machine frigorigique est d'utiliser un travail mécanique pour refroidir un système.

Principe du réfrigérateur Le principe est de fournir du travail au fluide $W > 0$, pour refroidir l'intérieur du réfrigérateur à $T_F = -10^\circ\text{C}$ (source froide), plus froid que le fluide donc $Q_F < 0$ et évacuer cette énergie dans l'air extérieur à $T_C = 20^\circ\text{C}$ (source chaude), souvent à l'arrière du réfrigérateur, plus chaude que le fluide, donc $Q_C > 0$. On souhaite donc se placer dans la partie IV du diagramme de Raveau : $Q_F > 0$, $Q_C < 0$, $W > 0$. *En pratique, le réfrigérateur ne fonctionne pas en continu, mais se met en route dès que la température dépasse une certaine valeur consigne.*

Description du cycle Le fluide subit les transformations suivantes

- l'évaporation à pression constante permet de refroidir le réfrigérateur. En effet, l'évaporation est endothermique, elle a tendance à refroidir. C'est comme la transpiration ou quand on sort de la douche.
- la compression amène le fluide de 1.64 bar à 6.65 bar, ce qui change sa température de liquéfaction.
- la liquéfaction à pression constante dans le condenseur est exothermique, l'énergie est cédée à l'air ambiant.
- à la sortie du condenseur, le fluide subit une détente isenthalpique (Joule Thompson) de 6.65 bar à 1.64 bar et le cycle recommence

Justifier les changements d'état Les échanges thermiques se font au moyen du chauffage et refroidissement d'un fluide (caloporteur). Donnons des ordres de grandeur : pour l'eau, la capacité calorifique est $c_p = 4.18\text{kJ/kg/K}$ donc il faut 418 kJ pour chauffer 1 kg d'eau de 0 à 100°C , mais comme la chaleur latente de vaporisation est $L_{vap} = 2257\text{kJ/kg}$ à pression atmosphérique, il faut 2265 kJ pour en vaporiser la même quantité. Ainsi, le changement d'état permet un plus grand échange d'énergie qu'une élévation de température. Ce résultat est assez général. C'est pourquoi les machines thermiques mettent souvent en jeu des changements d'états d'un fluide. *L'évaporation est endothermique et sert au refroidissement, comme indique la sensation de froid en sortant de la douche à cause de l'eau qui s'évapore, ou le refroidissement par la transpiration. La liquéfaction est exothermique, le fluide doit donc s'évaporer au contact de la source froide et se condenser au contact de la source chaude.*

Nécessité du détendeur et compresseur Pour exploiter les changements d'état, il faut un fluide qui puisse s'évaporer à -10°C et se condenser à 25°C . Or on sait que les températures de vaporisation et de liquéfaction sont strictement égales à pression donnée, il va donc falloir changer la pression entre les deux échangeurs thermiques, c'est là que la réfrigération va fournir du travail. Puisque la formule de Clapeyron donne $dP/dT > 0$ pour la transition liquide-vapeur, il faut un compresseur avant le condenseur et un détendeur avant l'évaporateur.

Bonus : détendeur et débit Le détendeur contrôle le débit massique du fluide par le réglage de son ouverture. Le débit, en régime permanent, est fixé de telle manière que la température de sortie soit égale à une valeur dite de consigne T_0 supérieure à celle du changement d'état. Ainsi on est sûr que le fluide s'est entièrement vaporisé avant de sortir de l'évaporateur : on dit qu'il sort sous forme de vapeur surchauffée.

Choix du fluide L'eau ne convient pas car il ne se vaporise pas à -15°C (on est à gauche du point triple). Historiquement le premier fluide utilisé fut l'ammoniac. Comme il est toxique et explosif en présence d'air, il a été remplacé par les chlorofluorocarbures (maintenant interdits) et les fluorocarbures. Comme fluide réfrigérant, on utilise

le fluide calorifique R134a, qui est le 1,1,1,2-Tétrafluoroéthane ($F_3C - CH_2F$) car il se vaporise à -10°C à 1.64 bar et se liquéfie à 25°C à 6.65 bar, possède une capacité calorifique ($\simeq 1.3\text{ kJ}$)³ et une enthalpie de liquéfaction ($\simeq 225\text{ kJ}$) relativement élevées, et n'a pas d'impact sur la couche d'ozone (mais est à effet de serre). *Il est le remplaçant du R12, le fameux « freon 12 » fluide très utilisé dans les aérosols et les cycles frigorifiques jusqu'à ce qu'on se rende compte de son effet nocif sur la couche d'ozone (les fameux CFC ou HCFC, qui sont interdits d'usage depuis l'an 2000 dans les pays qui ont ratifié le protocole de Montréal, en 1987).*

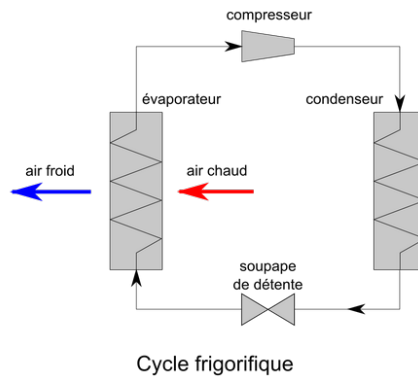


FIGURE 2 – Schéma de fonctionnement d'un cycle frigorifique. (Source : Wikipédia, libre de partage et d'utilisation)

2.2 Description thermodynamique

Hypothèses Les conduites reliant les différents appareils (compresseur, détendeur, échangeurs) sont parfaitement calorifugées donc il n'y a pas d'échange d'énergie avec le milieu extérieur. Les frottements et la viscosité du fluide sont négligeables. Ainsi les chutes de pression dans les conduites sont considérées comme nulles : pression et température y restent constantes. On se place en régime permanent, Nous négligerons toutes les variations de vitesse du fluide ce qui est tout à fait justifié dans le cas d'un réfrigérateur. *On utilise ainsi le premier principe en écoulement.*

Description du cycle *On les écrit au fur et à mesure au tableau, on fera le reste sur le diagramme de Mollier.* On a tous les outils pour schématiser le cycle décrit par la machine. *On pourrait donner les étapes au fur et à mesure de la partie et les rappeler rapidement ici.*

- 1 : On a une compression de 1.64 bar à 6.65 bar. La compression est si rapide que nous pouvons supposer qu'elle se fait sans échange de chaleur entre le fluide et l'extérieur. On dit que la transformation est adiabatique. On la suppose de plus réversible (on va en discuter plus tard), elle est donc isentropique.
- 2 : Puis une liquéfaction à pression constante dans le condenseur. L'énergie est cédée à l'air ambiant.
- 3 : À la sortie du condenseur, le fluide subit une détente isenthalpique (Joule Thompson) de 6.65 bar à 1.64 bar.
- 4 : On a évaporation à pression constante qui permet de refroidir le réfrigérateur. On cherche à retourner à l'état initial, et surtout à bien évaporer tout le fluide car le liquide (incompressible) pourrait endommager le compresseur.



Maintenant qu'on a dégagé les propriétés du cycle, comment étudier son efficacité ?

Diagramme de Mollier/des frigoristes L'état d'un fluide est caractérisé par deux paramètres intensifs : (P,V), (T,s) ou (P,h). On peut représenter le cycle parcouru par le fluide dans un diagramme à deux dimensions, permettant de visualiser les différentes transformations. Pour l'étude d'un réfrigérateur, on utilise le diagramme de Mollier (H,ln(P)) relatif au R134a.

Lecture du diagramme des frigoristes

- phases. On distingue les zones où (i) coexistence de la phase liquide avec la phase vapeur, avec le titre x correspondant (qu'on pourrait retrouver avec le théorème des moments) (ii) le fluide est uniquement sous phase vapeur

3. ref : THERMODYNAMIC PROPERTIES OF R134a (1,1,1,2-TETRAFLUOROETHANE) Marcia L. Huber and Mark O. McLinden

- isothermes. Dans la zone (i) du changement d'état, les isothermes sont horizontales confondues avec les isobares (droites horizontales non représentées). En effet, au cours d'un changement d'état, pression et température restent constantes. Dans la zone (ii), les isothermes sont presque verticales (2e loi de Joule pour le gaz parfait).
- isentropiques. Seules sont représentées les isentropiques en phase gazeuse.
- isochores. Pas utile pour nous.
- isenthalpiques sont des droites verticales parallèles à l'axe des ordonnées.
- isobares, droites horizontales, ne sont pas représentées.

Dans le domaine liquide, les courbes isentropes sont quasi-verticales.

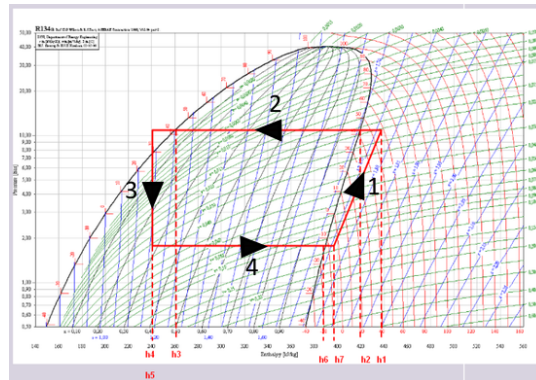


FIGURE 3 – Cycle idéal d'un réfrigérateur. (Source : <http://ecoconstruction.rpn.univ-lorraine.fr/res/R134correction.png>, libre de modification, de partage et d'utilisation.)

Traçage du cycle

- Le fluide doit sortir de l'évaporateur sous forme gazeuse pour ne pas détériorer le compresseur ne pouvant aspirer de la vapeur humide (fluide à la fois sous forme gazeuse et liquide). Le liquide, n'étant pas compressible, peut provoquer la rupture de certaines pièces mécaniques. Le cas limite est celui où le fluide vient tout juste d'achever son évaporation : sa pression est de 1,64 bar, sa température de -15°C , son titre est $x=1$.
- 1 : Compression isentropique du fluide de la pression 1,64 bar jusqu'à la pression 6,65 bar. Sur le diagramme, le fluide suit l'isentropique (1), intersection avec l'isobare 6,65 bar.
- 2 : Le fluide sous forme gazeuse subit une transformation isobare dans le condenseur. Il se refroidit d'abord sous forme gazeuse jusqu'au A se trouvant sur l'isotitre $x = 1$, puis il se condense jusqu'au point B sur l'isotitre $x = 0$. Si l'échangeur est correctement dimensionné et le réfrigérateur correctement réglé, au point B le fluide est, à peu près sous forme de liquide à la sortie du condenseur.
- 3 : Le fluide subit une détente isenthalpique à travers le détendeur de la pression 6,65 bar à la pression de 1,64 bar. Sur le diagramme, le fluide suit l'isenthalpique, verticale 3. On constate qu'il se vaporise partiellement. Au point C, son titre est $x = 0.25$ (25 % de vapeur, 75 % de liquide)
- 4 : Le fluide continue de se vaporiser mais de manière isobare dans l'évaporateur.

Conclusion Dans le réfrigérateur idéal, le fluide décrit deux isobares, une isentropique et une isenthalpique.

↓ Comment quantifier l'efficacité ?

2.3 COP et causes de pertes

Grandeur utile, grandeur coûteuse Dans le cas d'une machine frigorifique (climatisation, réfrigérateur...), le but est de transformer un travail reçu de l'extérieur pour refroidir le milieu froid (intérieur d'un réfrigérateur par exemple). La grandeur utile est $|Q_F|$. D'où vient l'énergie ? Un réfrigérateur utilise un compresseur qui est entraîné par un moteur électrique utilisant de l'énergie électrique facturée par EDF. Le coût énergétique associé est W . De

plus, le cycle entraîne le réchauffement de l'air ambiant, ce qui a peu d'importance : donc Q_C n'intervient pas. On définit alors pour le réfrigérateur

$$e(frigo) = \frac{|Q_F|}{W}$$

ODG: $T_F = 263\text{K}$, $T_C = 293\text{K}$ (températures des sources).

Calcul du COP La diagramme de Mollier nous permet de calculer le COP du réfrigérateur. L'énergie utile est celle qui est reçue dans l'évaporateur :

$$q_F = \Delta h(4) = 158\text{ kJ kg}^{-1}$$

. Le fluide reçoit un travail utile lors du passage dans le compresseur

$$w = \Delta h(1) = 28\text{ kJ kg}^{-1}$$

. Soit une efficacité

$$e = \frac{q_F}{w} = 5.64$$

. Pour 1 kJ d'énergie dépensée, on soutire 5.64 kJ à l'intérieur du réfrigérateur.

Comparaison avec le cycle de Carnot Cependant cette valeur est à comparer avec l'efficacité maximale suivant un cycle de Carnot, elle est : $e^{rev} = \frac{T_F}{T_C - T_F} = 6.45$. On en est pas trop éloigné.

Sources de pertes et d'irréversibilité On a fait des hypothèses pour pouvoir écrire le cycle précédent. On a notamment négligé :

- les effets de viscosité. la perte de pression (perte de charge) lors du passage du fluide dans la tuyauterie, dans le compresseur.
- les effets de conduction thermique. les gradients de température conduisent à la conduction thermique, irréversible.
- frottements lors de la compression.

Modification du cycle, cycle réel On doit alors modifier le cycle obtenu (∇ BUP) : la transformation subit par le fluide dans le compresseur n'est pas isentropique : s est plus élevé en réalité, donc w_u aussi (cf. schéma capturé). A cause de l'irréversibilité, la température maximale du cycle augmente, ce qui traduit qu'on a utilisé de l'énergie pour chauffer le fluide au lieu de le comprimer. De plus, il y a des pertes de charge dues à la viscosité dans les deux échangeurs et les tuyaux, cela entraîne des baisses de pression en sortie du condenseur et de l'évaporateur. Il peut y avoir surchauffe de la vapeur entre la sortie de l'évaporateur et l'entrée du compresseur. Finalement, on constate alors une augmentation du travail à fournir w_u pour obtenir le même refroidissement, l'efficacité diminue.

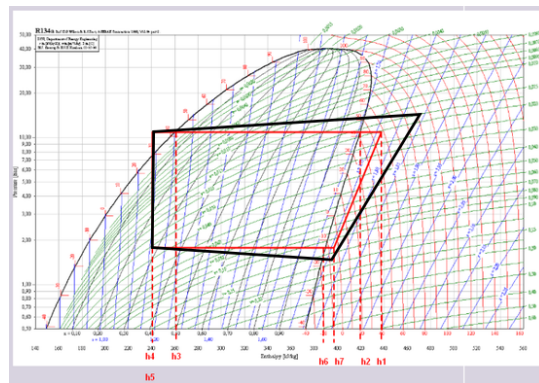


FIGURE 4 – Modification du cycle frigorifique en prenant en compte certaines causes d'irréversibilité. On devrait aussi avoir disparition des points anguleux. (Source : <http://ecoconstruction.rpn.univ-lorraine.fr/res/R134correction.png>, libre de modification, de partage et d'utilisation.)

Finalement :

$$e_{reel} < e_{theo} < e_{reversible}$$

Améliorations : réfrigération en cascade/ à compression étagée ∇ diapo avec diagrammes Il est à noter qu'il existe de nombreuses améliorations possibles (Cengel parle de cycles frigorifiques innovants) comme la réfrigération en cascade ou la réfrigération à compression étagée. Une cascade est constituée d'une succession d'installation

thermodynamique (compresseur, condenseur, détendeur, évaporateur). The evaporation-condensation temperatures of each cycle are sequentially lower with some overlap to cover the total temperature drop desired, with refrigerants selected to work efficiently in the temperature range they cover. Les différents étages sont couplés thermiquement par un échangeur, qui sert de condenseur pour l'un et d'évaporateur pour l'autre. On peut aussi utiliser des modules Peltier (étages). Pour une réfrigération à compression étagée, on exploite les diagrammes binaires, dans la même idée que la distillation.

Bonus : réfrigérateur à absorption de gaz ↗ [Page wiki](#) Le réfrigérateur à absorption de gaz utilise une source de chaleur pour faire tourner le cycle qui permettra d'extraire la chaleur, à la place du compresseur utilisé habituellement. Ce mode de fonctionnement est intéressant lorsque l'électricité n'est pas disponible facilement (trop rare, trop chère, compliqué à produire par exemple dans un camping car), ou bien lorsque l'on dispose d'une source de chaleur pratiquement gratuite (fort ensoleillement, gaz ou liquide chaud issu d'une turbine ou d'un procédé industriel, etc.). Comme dans les réfrigérateurs à compression, c'est l'évaporation d'un liquide à basse température qui absorbe la chaleur du milieu à refroidir. La différence réside dans la façon dont on crée la haute et la basse pression. Pour le réfrigérateur à compression, c'est le compresseur qui crée la haute et la basse pression. Pour le réfrigérateur à absorption, c'est le phénomène d'absorption (dilution ?) qui crée la basse pression alors que la haute pression est obtenue par chauffage. Ce réfrigérateur utilise deux fluides au lieu d'un seul : le fluide réfrigérant (par exemple l'ammoniac) et un fluide appelé absorbeur qui fait office de compresseur à l'échelle moléculaire (l'eau pour notre exemple, ou plutôt de l'ammoniaque, car il reste toujours de l'ammoniac en solution dans cette eau, à une concentration variable selon les étapes).

Nous avons étudié le fonctionnement d'un réfrigérateur réel simplifié. L'autre partie intéressante du diagramme de Raveau est la zone I, où l'on utilise l'énergie de la source chaude pour produire un travail. Il existe de nombreux types de telles machines : Moteur de Stirling, centrales thermiques (cycle de Rankine, voir Sanz), propulsion par jet, cycle de Brayton (turbine à gaz), moteurs à combustion. (voir Cengel). Nous allons maintenant étudier un cycle utilisé pour les moteurs à combustion, le cycle du moteur essence.

Nous avons étudié le fonctionnement d'un réfrigérateur réel simplifié. L'autre partie intéressante du diagramme de Raveau est la zone I, où l'on utilise l'énergie de la source chaude pour produire un travail. Il existe de nombreux types de telles machines : Moteur de Stirling, centrales thermiques (cycle de Rankine, voir Sanz), propulsion par jet, cycle de Brayton (turbine à gaz), moteurs à combustion. (voir Cengel). Nous allons maintenant étudier un cycle utilisé pour les moteurs à combustion, le cycle du moteur essence

3 Les moteurs thermiques

3.1 Le moteur à essence

Description du cycle On va partir du fonctionnement du moteur à 4 temps. On présente son fonctionnement en commentant la vidéo : <https://youtu.be/16KcKnQ0hHQ?t=40>.

- 0-1 : Admission. Le cycle commence au point mort haut. La soupape d'échappement est fermée, la soupape d'admission est ouverte, le piston descend, un mélange d'air et de carburant venant du carburateur ou de l'injection est aspiré dans le cylindre. **ODG**: La température du mélange est alors de l'ordre de 60 à 80°C et sa pression de l'ordre du bar.
- 1-2 : Compression. La soupape d'échappement reste fermée, la soupape d'admission se referme, le piston remonte comprimant le mélange admis.
- 2-3 : Combustion. Les deux soupapes restent fermées. Lorsque le piston s'apprête à atteindre son volume minimal, le mélange air-carburant est enflammé, une étincelle commandée jaillit et provoque l'inflammation du mélange. On dit qu'il s'agit d'un moteur à allumage commandé. **ODG**: La combustion du mélange détonant s'effectue, à volume constant, en une fraction de seconde. La température s'élève très rapidement entre 900 et 1 000°C, quant à la pression elle est de l'ordre de 60 à 80 bar (étape CD)
- 3-4 : Détente. La combustion du mélange air-carburant provoque une forte augmentation de la pression dans le cylindre, ainsi l'expansion des gaz force le piston à descendre. C'est le temps moteur !
- 4-1 : Echappement. Lorsque le piston arrive au point mort bas, la soupape d'échappement s'ouvre, le piston remonte et chasse les gaz brûlés vers l'extérieur. La pression diminue jusqu'à 1 bar et le volume atteint sa valeur minimale.
- 1-0 : Échappement à pression constante

En pratique, la combustion et la détente se font ensemble. Les étapes peuvent se chevaucher légèrement : pour le cycle de compression par exemple, les soupapes se referment après que le piston commence sa remontée. On parle donc d'un retard.

Nature du cycle : changement de composition et système ouvert Remarquons que la nature du mélange gazeux varie au cours du cycle : de mélange combustible en début de cycle, il devient gaz de combustion en fin de cycle. En outre, le système que nous venons de décrire est un système ouvert : le mélange gazeux transite, à travers le cylindre, du carburateur où s'effectue le mélange détonant, à l'atmosphère où le gaz de combustion est perdu.

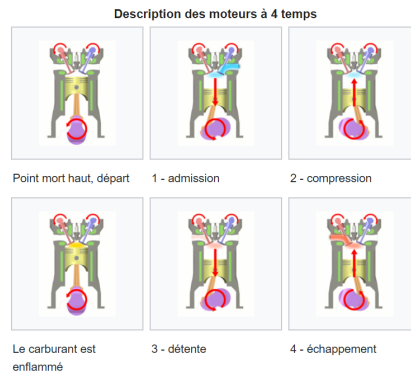


FIGURE 5 – Fonctionnement d'un moteur 4 temps. (source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Cycle_de_Beau_de_Rochas, libre de réutilisation) ou voir Cengel p419

Bonus : moteur à 2 temps In two-stroke engines, all four functions of the four-stroke engine are executed in just two strokes : the power stroke and the compression stroke. Also, the intake and exhaust valves are replaced by openings in the lower portion of the cylinder wall. Le remplissage a lieu pendant la compression car le piston découvre la voie d'arrivée d'air/carburant. Les deux temps sont : admission compression combustion puis détente remplissage échappement. Le piston fait 1 aller-retour par explosion tandis que pour le moteur à 4 temps, il en fait 2 par cycle. Un moteur à deux temps pollue plus et est moins efficace mais est plus simple à entretenir, plus léger et est plus puissant à cylindrée égale. On les utilise pour : motorcycles, chain saws, and lawn mowers.

↓ On fait une modélisation thermodynamique

3.2 Modélisation thermodynamique

Système et hypothèses Le système est ouvert mais comme les passages de 0 à 1 se compensent, on se ramène idéalement à un système fictif fermé. On effectue les hypothèses :

- le combustible est en faible proportion comparé à l'azote, qui domine le mélange gazeux. La variation de composition au cours de la combustion n'en affecte une faible proportion du gaz. Nous ferons donc l'hypothèse simplificatrice d'un mélange gazeux possédant, tout le long du cycle, les propriétés thermodynamiques de l'air avec un coefficient $\gamma = 1.4$ gaz parfait.
- The combustion process is replaced by a heat-addition process from an external source
- Nous pouvons aussi remarquer que l'étape AB d'admission et l'étape BA d'échappement ne sont que des étapes de transvasement à transfert thermique et à travail nul pour l'ensemble de ces deux étapes. En conséquence, nous pouvons aussi considérer que le mélange gazeux forme un système fermé décrivant le cycle BCDEB.
- Les étapes adiabatiques sont considérées réversibles et donc isentropiques.

Modélisation du cycle idéal On modélise le cycle en donnant les transformation thermodynamiques associées, en les reportant dans un diagramme (P,V), dit diagramme de Watt, dans l'hypothèse où le gaz est parfait. C'est le cycle de Beau de Rochas, cycle à quatre temps ou encore cycle d'Otto, qui est un cycle thermodynamique théorique. On peut faire le dessin au tableau vu qu'on fait le frigo sur diapo, on met des flèches.

- 0-1 : Admission à pression constante, de V_0 à V_1 (horizontale)

- 1-2 : Compression adiabatique et réversible donc isentropique. On néglige les frottements et la diffusion thermique en supposant les temps courts devant la thermalisation. L'allure est celle d'un isentrope donnée par la loi de Laplace $PV^\gamma = \text{cte}$. (*puissance décroissante*)
- 2-3 : Combustion des gaz à volume constant (combustion rapide). On néglige la modification de la composition chimique. *Le carburant est une petite fraction de l'air.* (*verticale*)
- 3-4 : Détente adiabatique et réversible (isentropique). L'allure est encore celle d'un isentrope donnée par la loi de Laplace. (*puissance décroissante*)
- 4-1 : Echappement : détente isochore. (*verticale*)
- 1-0 : Échappement à pression constante

Interprétation de l'aire du cycle La signification physique de l'aire du cycle du diagramme (P,V) est le travail algébrique fourni : $W = \int p dV$. En sens horaire pour un cycle moteur. En diagramme (T,S), comme $\delta Q = T dS$, l'aire du cycle correspond à Q.

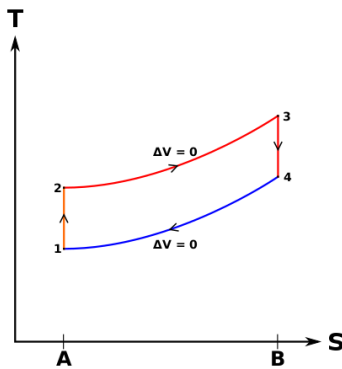


FIGURE 6 – Cycle de Beau de Rochas ou Cycle Otto dans le diagramme T-S (source : wikipédia, libre d'utilisation)

Calcul de rendement On cherche alors à calculer le rendement sous les hypothèses que l'air est assimilé à un gaz parfait. On part de : $\eta = \frac{-W}{Q_C} = 1 + \frac{Q_F}{Q_C}$. On traduit mathématiquement les hypothèses formulées.

- 0-1 et 1-0 se compensent
- 1-2 : isentropique, $T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_0^{\gamma-1}$
- 2-3 : $Q_C = C_v(T_3 - T_2)$
- 3-4 : isentropique, $T_3 V_0^{\gamma-1} = T_4 V_1^{\gamma-1}$
- 4-1 : $Q_F = C_v(T_1 - T_4)$

donc

$$\eta = 1 + \frac{C_v(T_1 - T_4)}{C_v(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \quad \text{où} \quad r = \frac{V_1}{V_0} \quad (4)$$

est le rapport de compression.

- Si on augmente le rapport de compression r , le rendement augmente. Malheureusement il y a une limitation de r qui doit être inférieure à 9 à cause de la détonation : le mélange s'enflamme avant la fin de la compression.
- La dépendance en γ nous dit qu'un gaz monoatomique a un meilleur rendement.

Application numérique Pour un moteur à essence typique, $r = 8$, soit en prenant $\gamma = 7/5 = 1.4$ pour un gaz parfait diatomique ,

$$\eta_{\text{idéal}} = 0.56$$

. On peut comparer au rendement du cycle de Carnot en contact avec des thermostats à températures : $T_C = 1200^\circ\text{C}$ et $T_F = 25^\circ\text{C}$, soit

$$\eta^{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_F}{T_C} = 0.8$$

. Les moteurs thermiques sont donc peu efficaces.

Sources d'irréversibilité On a en fait surestimé la valeur du rendement car il existe des sources d'irréversibilité non prises en compte dans le modèle :

- les compressions et détente ne sont pas réversibles à cause des frottements solides du piston contre l'enceinte
- il existe des gradients de pression et température, ce qui crée de la diffusion de quantité de mouvement et de température, phénomènes irréversibles
- les transformations ne sont pas non plus adiabatiques car de la chaleur est communiquée aux parois du cylindre
- le volume peut également changer au cours des transformations supposées isochores (pour CD le piston peut amorcer sa descente pendant la combustion, retards mentionnés avant)
- Lors de l'admission, la viscosité du mélange gazeux crée une légère dépression
- L'explosion a lieu avant que le piston ne parvienne à son point mort haut. Cette avance à l'allumage est provoquée pour tenir compte de la durée de l'étincelle et de celle de la combustion.
- La soupape d'échappement s'ouvre avant que le piston arrive à son point mort bas afin de permettre une évacuation convenable des gaz de combustion.

On voit apparaître un comportement récepteur lors de l'échappement-admission (d'où l'association par paires) et la réduction de l'aire (réduction de travail fourni par les frottements et la création d'entropie) (discussion poussée Cengel p 423). **ODG:** Le rendement est généralement de 25% à 30% on obtient :

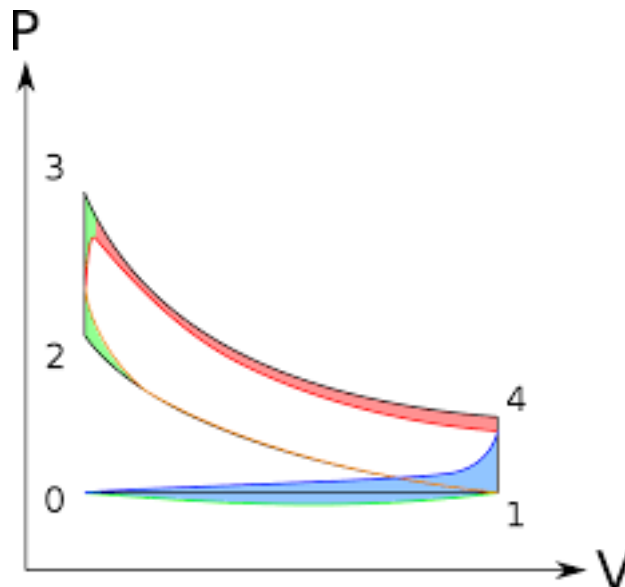


FIGURE 7 – Cycle de Beau de Rochas plus réaliste. (source : commons.wikimedia.org, libre de partage et d'utilisation), voir Cengel p419 pour un schéma plus complet

Discussion sur les pertes Finalement,

$$\eta_{\text{réel}} < \eta_{\text{idéal}} < \eta_{\text{Carnot}}$$

3.3 Le Cycle diesel

Moteur diesel, différence On présente succinctement le cycle du moteur diesel, dont la différence principale avec le moteur à essence est que l'on comprime l'air seul, puis qu'on injecte le combustible, la combustion s'effectue en partie pendant la détente. Il n'y a donc pas de bougie d'allumage. Cela permet d'atteindre des rapports de compression plus élevés (jusqu'à $r = 24$). Donc même si il est à rapport égal moins efficace, au prix d'un moteur plus lourd et plus cher, on peut avoir un meilleur rendement avec un moteur diesel. On obtient typiquement des rendements de 35% à 45%. De plus, le diesel peut accepter des hydrocarbures plus lourds grâce à sa pression plus élevée. *Un phénomène d'auto-inflammation est lié aux températures élevées dans la chambre de combustion. Celles-ci sont atteintes grâce à un fort taux de compression (rapport volumétrique de 14 à 25 :1), permettant d'obtenir une température de 700 à 900 °C. Pour le démarrage des petits moteurs, des bougies de préchauffage sont souvent utilisées pour permettre un meilleur démarrage à froid, en créant un point chaud dans la chambre de combustion. Pour les moteurs de bateaux et les gros moteurs fixes à fioul lourd, on chauffe celui-ci à haute température pour permettre le démarrage. Le moteur*

Diesel peut être soit à deux temps (surtout sur les navires, avec suralimentation par compresseur et injection pneumatique) soit à quatre temps comme sur les camions. The fuel injection process in diesel engines starts when the piston approaches TDC and continues during the first part of the power stroke. Therefore, the combustion process in these engines takes place over a longer interval. Because of this longer duration, the combustion process in the ideal Diesel cycle is approximated as a constant-pressure heat-addition process. In fact, this is the only process where the Otto and the Diesel cycles differ. The remaining three processes are the same for both ideal cycles.

Bonus : essence contre diesel L'essence se compose d'un mélange d'hydrocarbures légers constitués entre 5 et 11 atomes de carbone ; Le diesel se constitue d'hydrocarbures plus lourds constitués entre 12 et 25 atomes de carbone.

Rapport des volumes et rendement On définit un autre rapport des volumes lié à la compression qui a lieu pendant la combustion, alors $a_c = V_3/V_2$. Le rendement est alors (▲ Cengel)

$$\eta_{diesel} = 1 - \frac{1}{a^{\gamma-1}} \frac{a_c^\gamma - 1}{\gamma(a_c - 1)}$$

Comparaison numérique avec le moteur à essence.

[On montre les plot python de bb.](#)

Cycle diesel

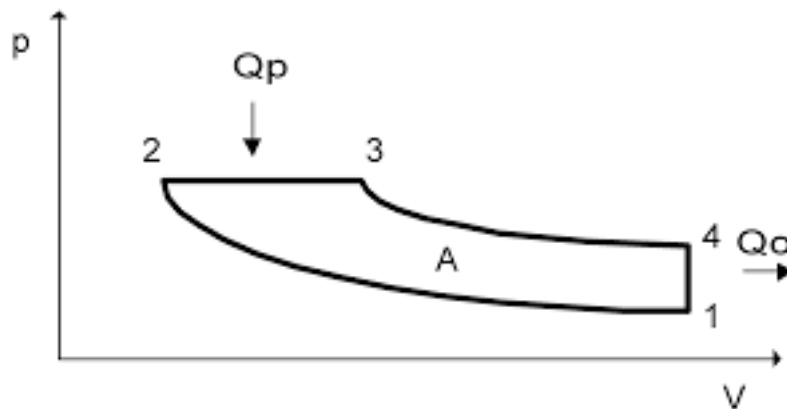


FIGURE 8 – Cycle diesel

Causes d'irréversibilité : les sources d'irréversibilité sont les mêmes que pour Beau de Rochas à la différence qu'ici la combustion est trop rapide pour que l'on puisse avoir une détente isobare isentropique, d'abord il y a compression quasi isochore puis quasi isobare.

Comparaison Diesel-essence Pour un même taux de compression, le rendement du diesel est inférieur au beau de Rochas, mais à la différence du moteur essence limité par la détonation, le diesel peut prendre de grandes valeurs de taux de compression et donc augmenter son rendement. Cela se fait au prix d'un moteur plus bruyant et plus cher ! Par ailleurs, bien que par litre le diesel soit plus polluant, avec un litre de diesel on parcourt plus de kilomètres. Donc le diesel émet moins de CO2 par km.

3.4 Centrales thermiques

Si on a le temps on peut présenter le cycle de Rankine (Cengel p469, et il y a plein de complexification possible : surchauffe, régénération) où la propulsion jet (système ouvert) en une sorte d'approche documentaire.

Conclusion

Les machines thermiques, qui occupent pour le moment une place centrale dans nos vies peuvent être étudiée à l'aide des deux premiers principes de la thermodynamique. Ces machines peuvent être des pompes à chaleur, des réfrigérateurs ou des moteurs. Toutes ces machines ont une efficacité limitée par les phénomènes irréversibles, et il est à noter que l'utilisation des diagrammes thermodynamiques est très utile pour étudier des machines réelles.

Ouverture les moteurs électromécaniques n'ont pas de limite de rendement. Rieutord p310 : les ouragans peuvent être modélisés par des machines de Carnot.

4 Compléments

Moteur de Stirling Le cycle est constitué de deux isochores et de deux isothermes. On peut noter que les échanges thermiques des deux transformations isochores se compensent l'un l'autre et que finalement il ne reste que ceux qui ont lieu lors des transformations isothermes. Sur les isothermes, la variation d'énergie interne est nulle, ce qui implique que le travail des forces de pression et le transfert thermique sont opposés.

D'autre part, en anticipant sur la partie suivante, il est possible de faire fonctionner la machine de Stirling en réfrigérateur et en pompe à chaleur en fournissant un travail (en pratique, il suffit d'entraîner le volant dont la rotation entraîne le piston). Cela permet d'illustrer la possibilité d'inverser le fonctionnement des machines thermiques. A noter qu'en inversant alors le sens de rotation du volant, on passera d'un fonctionnement en pompe à chaleur (en plaçant un thermomètre au niveau de la source chaude, on peut constater une augmentation de la température) à celui d'un réfrigérateur (en plaçant un thermomètre au niveau de la source froide, on peut constater une diminution de la température).

Premier principe industriel On montre que la variation d'enthalpie du fluide à la traversée d'un système est égale à la somme du travail échangé avec les parties mobiles du système, W_M (appelé travail machine) et de la chaleur Q : $\Delta H = W_M + Q$.

Machine à vapeur : Après les machines de Papin à la fin du XVII^e siècle, le moteur à vapeur fut perfectionné jusqu'à prendre sa forme définitive avec James Watt entre 1772 et 1782 .

Principe :  Hprépa

- Elements : chaudière, cylindre, condensateur, pompe.
- 1) Eau est vaporisée dans la chaudière sous $P = P_s$. Nécessite le chauffage de la chaudière. $Q_1 > 0$ coût
- 2) Détente adiabatique de la vapeur dans le cylindre. C'est le travail qu'on récupère. $W_1 < 0$ récupéré
- 3) Condensation (sous $T_2 = T_{ext}$ dans le condensateur. Fournit de la chaleur à l'extérieur $Q_2 < 0$.
- 4) L'eau condensée est recyclée dans la chaudière à l'aide de la pompe. Nécessite un apport de travail $W_2 > 0$. coût

Réalisation du rendement de Carnot *optionnel, mais utile pour la partie moteur à 4 temps lorsqu'on compare à ce cycle !* On considère maintenant ce dernier cas de figure en prenant le cas d'une machine thermique composé d'un fluide caloporteur décrit comme un gaz parfait effectuant un cycle réversible et ditherme, appelé cycle de Carnot. Ce cycle est composé de deux isothermes et de deux isentropiques.

Reversible isothermal heat transfer is very difficult to achieve in reality because it would require very large heat exchangers and it would take a very long time (a power cycle in a typical engine is completed in a fraction of a second). Therefore, it is not practical to build an engine that would operate on a cycle that closely approximates the Carnot cycle.

D'après l'expression du rendement de Carnot, on voit que : Thermal efficiency increases with an increase in the average temperature at which heat is supplied to the system or with a decrease in the average temperature at which heat is rejected from the system.

The source and sink temperatures that can be used in practice are not without limits, however. The highest temperature in the cycle is limited by the maximum temperature that the components of the heat engine, such as the piston or the turbine blades, can withstand. The lowest temperature is limited by the temperature of the cooling medium utilized in the cycle such as a lake, a river, or the atmospheric air.

Brayton cycle The Brayton cycle was first proposed by George Brayton for use in the reciprocating oil-burning engine that he developed around 1870. Today, it is used for gas turbines only where both the compression and expansion processes take place in rotating machinery. Gas turbines usually operate on an open cycle.

Principe :

- De l'air frais rentre dans le compresseur
- L'air à haute pression rentre dans la chambre de combustion, où on injecte du carburant qui est brûlé (@ P constant).
- Les gaz à hautes températures rentrent dans une turbine, détente jusqu'à P_{atmo} : produit du travail.
- Les gaz sont éjectés.
- Au lieu de définir le rapport de compressibilité, on définit le rapport des pressions.

- Utilisation : The two major application areas of gas-turbine engines are aircraft propulsion and electric power generation. When it is used for aircraft propulsion, the gas turbine produces just enough power to drive the compressor and a small generator to power the auxiliary equipment. The high-velocity exhaust gases are responsible for producing the necessary thrust to propel the aircraft. Gas turbines are also used as stationary power plants to generate electricity as stand-alone units or in conjunction with steam power plants on the high-temperature side. In these plants, the exhaust gases of the gas turbine serve as the heat source for the steam. The gas-turbine cycle can also be executed as a closed cycle for use in nuclear power plants. This time the working fluid is not limited to air, and a gas with more desirable characteristics (such as helium) can be used.

Cycle de Rankin ➤ Cengel Pour les machines à vapeur. Constitué de : 1)pompe, 2)boiler 3)turbine 4)condenseur. Pleins de détails dans le ➤ Cengel [todo]

5 Questions

- Quelles sont les causes limitant l'efficacité ? Ce qui provoque de l'irréversibilité, en particulier les frottements mécaniques, la diffusion thermique, et la viscosité dans le cas de liquides.
- Peut-on obtenir un moteur d'efficacité supérieur à Carnot ? Oui, un moteur électrique car la conversion électromécanique a un rendement théorique de 1.
- Est-il utile d'ouvrir la porte d'un réfrigérateur pour refroidir une pièce ?
- Quelles sont les problèmes des cycles réversibles ?
- Quelles sont les différences entre une pompe à chaleur et un réfrigérateur ?
- Quels sont les intérêts des changements d'états ?
- Quelles peuvent être les sources d'irréversibilité ?
- Quel est le principe de fonctionnement de l'autocuiseur ? (La vaporisation de l'eau fait augmenter la pression dans l'enceinte, ce qui augmente le point d'ébullition. On peut ainsi cuire à des températures supérieures à 100 °C, donc plus rapidement.)
- Est-il impossible d'extraire du travail d'une unique source de chaleur ? Existe-t-il un paradoxe où cela apparaît possible ? (Il n'est clairement pas nécessaire de le connaître pour la présentation de la leçon, mais il reste possible que le démon de Maxwell soit évoqué lors des questions, il vaut donc mieux avoir une petite idée de ce dont il s'agit.)
- Quelle est la définition du rendement ? (On ne s'en sert que dans le cas des moteurs, où il s'identifie à l'efficacité. On peut le définir plus généralement comme le rapport de l'efficacité sur l'efficacité maximale.)
- Pourquoi les gradients de pression sont source de dissipation ? (Les gradients sont souvent associés à des courants qui sont des phénomènes irréversibles, leur présence indique donc que la production d'entropie n'est pas nulle.)
- Quel est le problème des cycles réversibles ? (Les transformations doivent être quasi-statiques. Le cycle est donc très lent et ne délivre que peu de puissance. Pour un principe d'optimisation de la puissance, voir les machines endoréversibles dans [Callen] par exemple.)
- Identifier les différents éléments du schéma du moteur de Stirling sur le dispositif présenté. Quel est le volume considéré ? Pourquoi faut-il lancer le dispositif ? (Probablement à cause de l'existence de frottements solides.)
- À quoi ressemble le cycle d'un moteur Stirling réel ? (À un ellipsoïde. Il faut comprendre que les cycles étudiés théoriquement sont des modélisations des cycles réels.)
- Autres exemples de cycles ? (Carnot, Beau de Rochas, Diesel, Rankine, ...)
- Quelle est la forme de la courbe pour une isotherme ? (branche d'hyperbole, $PV = nRT$.) Pour une adiabatique ? ($PV^\gamma = \text{cst.}$)
- Dans quel sens le cycle est-il parcouru ? (En sens horaire pour un cycle moteur, le travail fourni est l'aire algébrique du cycle : $W_{\text{fourni}} = + \oint P dV$.)
- Qu'est-ce que la cylindrée d'un moteur ? (C'est le volume balayé par le piston, ou par l'ensemble des pistons si le moteur est composé de plusieurs cylindres.)

- Pourquoi utiliser un fluide pour le réfrigérateur ? (Les changements d'état mettent en jeu des énergies importantes.) Exemple dans la vie quotidienne ? (La sensation de froid en sortant de la douche à cause de l'eau qui s'évapore, le refroidissement par la transpiration, ...)
- Quelles qualités attend-on d'un fluide frigorigène ? (forte chaleur latente de changement d'état, changements d'état accessibles à des pressions et températures raisonnables, ininflammable, non corrosif, non toxique, non polluant.)

6 Commentaires

Correction 2017 : "le jury souhaite actuellement une étude des systèmes réels, avec une discussion très précise des causes d'irréversibilité, donc du fonctionnement des différents organes constituant une machine réelle. Il est alors impératif de présenter le premier principe généralisé, dit abusivement industriel, valable pour des fluides en écoulement stationnaire et qui privilégie l'emploi de la fonction d'état enthalpie massique. Il en découle alors tout naturellement l'usage et l'explication du diagramme de Mollier ($\log P, h$) dits des frigoristes".

Correction 2017 : "Il ne faut alors pas avoir peur de passer à des applications numériques très concrètes afin d'évaluer les contributions des différentes transformations et divers organes ... On peut ainsi discuter très avantageusement de la validité des différentes hypothèses du modèle choisi et de l'optimisation de certains paramètres caractéristiques de la machine."

Etre plus clair sur la notion de système fermé/système ouvert, dans quels cas elles interviennent et comment les traiter. Entrer plus dans les détails pour les débits. Être plus clair sur le passage en système ouvert.

Préciser les hypothèses de travail.

Marquer la différence entre rendement, efficacité, COP. Expliquer pourquoi on utilise pas le rendement partout.

Attention à la cohérence des notations (sur les schémas, entre les parties).

Exploiter à fond les diagrammes (en particulier le diagramme de Mollier, très important). Montrer toutes les infos qu'on peut en tirer (variation d'entropie, titre avec le théorème des moments...), pas seulement regarder la variation d'enthalpie, sans forcément faire tous les calculs.

Il faut absolument préciser d'où vient l'énergie (intérieur/extérieur)

On ne parle pas de "chaleur" dans les programmes mais de "transfert thermique"

Les profs de prépa sont à fond sur les diagrammes!!!

Mettre des ODG en intro (ou conclu) sur les rendements.

Capacités thermiques : préciser si molaires ou massiques (mettre un n ou m)

Moteur : faire le lien avec des grandeurs concrètes (chevaux, cylindrée, tour/min...)

Manques : rigueur sur explications des transferts énergétiques ; démontrer ou justifier le premier principe en système ouvert et l'utilisation industrielle, préciser les hypothèses (hypothèses sur un transparent), le domaine d'application. Bien faire la distinction fermé/ouvert. Faire directement le premier et deuxième principe en système ouvert.

Le Dunod est bien!!

7 Questions vrac

Causes d'irréversibilité : s'agit-il de frottements mécaniques ou de problèmes de diffusion thermique ?

Les moteurs réversibles ont forcément un fonctionnement lent : comment peut-on alors récupérer de la puissance avec une telle machine thermique ?

Pourquoi certaines machines utilisent-elles des fluides subissant des changements d'état ?

Vous avez dit qu'une machine thermique est un modèle thermodynamique de transformations cycliques. Est-ce que c'est toujours le cas ?

Comment on peut faire en pratique pour s'approcher d'un cycle réversible ?

Expliquer le principe d'un réfrigérateur. Pourquoi il y a besoin de fournir du travail ?

Écrire le 1er principe en écoulement permanent.

Comment fonctionnent les moteurs électriques ? Connaissez-vous des modèles ?

Le rendement est-il le seul moyen d'étudier l'intérêt d'une machine thermique ? Quels sont autres moyens ?

Est-il vraiment intéressant pédagogiquement de parler des cycles réels par rapport aux théoriques ? Vaut-il mieux commencer par les cycles réels pour amener ou théoriques ou l'inverse ?

Dans le diagramme de Raveau, détailler le cas $W < 0$, $Q < 0$ (ni moteur, ni réfrigérateur). Est-ce vraiment inutile ? Dans quel cas ça peut être intéressant ?

Pourquoi le rendement maximal est-il inférieur à 1 ? Quels autres moteurs n'ont pas cette limitation ? 2e principe.

Industriellement, préfère-t-on des cycles rapides ou lents ?

La durée des transferts thermiques est-elle à minimiser ou bien maximiser ?

Peut-on faire une machine frigorifique en l'absence d'un travail extérieur : $W = 0$? Quel doit être le signe de l'échange avec la troisième source ? C'est possible en pratique ou ça n'existe que sur le papier ? oui, il suffit de remplacer par une troisième source de chaleur

Comment définit-on un thermostat idéal ? comment, en pratique, le réaliser ? Qu'est-ce qui change si la température des sources varie lentement ? (notion de pseudo sources) Système en contact avec le système étudié, beaucoup plus grand et avec une énergie plus grande.

Est-ce qu'il y a des sources d'irréversibilité au niveau du thermostat ? Oui, c'est en fait une des sources d'irréversibilité les plus importantes, car le système n'est jamais à la même température que le thermostat, donc échanges d'énergie, visible sur le cycle de Mollier.

définition du rendement/efficacité : pour les récepteurs, comment se fait-il qu'elle soit supérieure à 1 ? rapport de 2 grandeurs effectivement reçues (Q_f et W pour le frigo), et non une grandeur fournie et une grandeur reçue comme on en a l'habitude.

Comment définit-on la température thermodynamique ? y en a-t-il d'autres ? Statistique ?

Définition de la chaleur ? Quantité d'énergie thermique échangée entre une source chaude et une source froide ;

Discuter de l'importance du nombre de tour/min pour un fonctionnement périodique des machines ?

Pourquoi emploie-t-on des échelles log pour la pression dans le diagramme de Mollier ?

A l'aide de ce diagramme peut-on fixer une limite de validité du modèle gaz parfait pour la vapeur sèche ?

Les courbes iso-titres sont-elles indispensables ? Théorème des moments.

Sur les cycles réels donner la signification des transformations de « déchauffe », « surchauffe »...

Tu as mis des points sur Q et W : qu'es-ce que ça veut dire ? Mais tu n'as jamais parlé de débit, est-ce que c'est une notion importante ? Massiques

On fait des raisonnements sur des systèmes ouverts, comment se ramener à des systèmes fermés ?

Est-ce que les machines monothermes sont utiles ? Différence radiateur/pompe à chaleur ? Oui, radiateur.

Bilan d'entropie et d'énergie : est-ce que ça change quelque chose si le thermostat n'est pas idéal ? s'il y a changement d'état ? Thermostat idéal : il faut intégrer l'entropie d'échange sur tout le thermostat. Changement d'état : il faut prendre en compte la chaleur latente.

Rendement, efficacité, COP : c'est tout pareil ? Nope, efficacité et COP comparent deux quantités récupérées (peuvent être plus grand que 1), alors que rendement = rapport récupérée/fournie.

Pédagogie : pourquoi avoir choisi de présenter en détail le réfrigérateur ? Tout le monde en a un, cycle relativement simple, permet d'illustrer pas mal de notions (échanges d'énergie mis en jeu, COP), et d'introduire le diagramme de Mollier, qui est un diagramme important..

Diagramme de Mollier : que donne l'aire du cycle ? Est-ce que c'est intéressant ? Pas très simple ici, mais un autre diagramme qui est beaucoup utilisé : (T,S), permet de discuter plus finement les variations d'entropie.

Diagramme de Mollier : est-ce que tu peux commenter la forme des isothermes ? Phase gazeuse : quasi des isenthalpiques (verticales)

Gaz réel, à pression faible, on tend vers un gaz parfait, or la loi de Joule dit que l'enthalpie ne dépend que de la température (pour un gaz parfait).

Diagramme de Mollier : détente isenthalpe, quelle information peut-on en tirer ? Exploitation du théorème des moments pour déterminer le titre.

Comment améliorer l'efficacité d'un réfrigérateur ?

Culture gé : pourquoi on appelle l'enthalpie H ? Vient de l'allemand ("température")

Culture gé : qu'est-ce qui est apparu en premier, thermo ou machines thermiques ? Machines thermiques

Culture gé : qui en a parlé en premier ? Carnot (Feynman : un des seuls cas où les techniques de l'ingénieur ont dépassé la physique).

Autres cycles ? Rendements associés ? Rankine (centrales thermiques), Brayton (projection par jet), Erikson, Stirling...

Machines avec rendements supérieurs ? Machines électriques, avec effet Peltier/Seebeck.

Moteur à essence ou diesel : lequel est le plus intéressants ? Moteur à essence plus puissant mais plus polluant (deux temps : tondeuse à gazon, quatre temps : voiture), limité par rapport de compression.

Diesel : rapport de compression plus faible donc rendement plus élevé, moins besoin de raffiné, mieux de faire des longs trajets pour éviter l'encrassement

Conversion chevaux/kJ (écrit en chevaux sur la carte grise) ?

A quoi correspond la cylindrée ?

Nombre de tour/min pour une voiture ? A quoi ça correspond ? Tour/min : nombre de cycles.

Comment fait-on l'étincelle dans les moteurs ? Bobine, induction

Comment fonctionne les moteurs électriques ?

Moteur de Stirling : Si je vous vend un moteur de Stirling réversible vous êtes contente ? Quelles sont les causes de pertes de rendement pour le moteur de Stirling ? Comment on pourrait améliorer le régénérateur dans le moteur de Stirling pour avoir un meilleur rendement ? Quel est l'intérêt (pédagogique) de présenter le moteur de Stirling ? Pourquoi cette application et pas une autre ? Quelles différences entre le moteur de Stirling et un moteur de voiture ? J'ai dit que le rendement de 0.5 était mauvais. Ordre de grandeur du rendement des machines thermiques usuelles ? Par rapport à quoi 0.5 est-il un mauvais rendement ? Le moteur de Stirling présentait à l'époque de sa découverte le meilleur rendement parmi les autres moteurs. Pourtant il n'a pas eu beaucoup d'applications, à part les américains qui en utilisent dans leurs missions d'explorations spatiales. Pourquoi ? Peut-on facilement modifier le couple fourni par le moteur de Stirling (à puissance fixée) ?