

LP 14 : MACHINES THERMIQUES RÉELLES

Niveau

L2

Commentaires du 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.

Pré-requis

- Premier et second principes de la thermodynamique
- Premier principe industriel
- Capacité thermique
- Loi de Laplace

Bibliographie

- *Dictionnaire de physique expérimentale, Tome II, thermodynamique et application* , Donnini et Quaranta (page 289)
- *Physique de la conversion d'énergie* Rax (chap 5 page 131)
- BUP 832 le réfrigérateur Francois Martin. Lien BUP

Table des matières

1	Principe d'une machine thermique	2
1.1	Définition	2
1.2	Une machine thermique simple	3
1.3	Diagramme de Raveau	3
1.4	Efficacité	4
2	Machine frigorifique	5
2.1	Principe d'un réfrigérateur	5
2.1.1	Schéma de principe	5
2.1.2	Présentation du diagramme	6
2.1.3	Tracé sur le diagramme	6
2.1.4	Application numérique	6
2.2	Irréversibilité	8

3 Moteur	8
3.1 Moteur à Combustion (cycle de Beau de Rochas)	8
3.1.1 Présentation	8
3.1.2 Modélisation	10
3.1.3 Calcul du rendement	10
3.1.4 Irréversibilité	11
4 Conclusion	12
4.1 Questions	12
4.2 Remarques	13

Introduction

Nous avons introduits les premiers et second principes de la thermodynamique, nous allons voir aujourd’hui comment les appliquer à des exemples plus concrets : les machines thermiques. En effet, dans votre cours d’histoire géographique, vous avez vu qu’au XVIIIème siècle, il y a la révolution industrielle, qui a été précipitée par l’arrivée de la machine à vapeur. Or ces trains à vapeur par exemple étaient des exemples d’engin utilisant des machines thermiques. Aujourd’hui il est vrai que nous utilisons plus de trains à vapeur, mais en réalité, les machines thermiques continuent de nous entourer : dans les voitures, dans les réfrigérateurs, dans les pompes à chaleurs...

Point culture(Guislain, Wang) : La thermodynamique vient de deux mots grecs *thermon* et *dynamis* : chaleur et puissance. On peut citer le terme de “puissance motrice du feu” utilisé par Sadi Carnot (1824) un des pères de la thermodynamique, qui a connu son essor lors de l’avènement de la machine à vapeur lors de la révolution industrielle.

Objectif : Dans cette leçon nous allons détailler le principe de fonctionnement général d’une machine thermique, puis nous allons nous arrêter sur quelques exemples pour illustrer notre propos et souligner des sources d’irréversibilité.

1 Principe d’une machine thermique

1.1 Définition

Une machine thermique est un dispositif (comportant des pièces mobiles) effectuant des transformations cycliques mettant en jeu des échanges thermiques et du travail. On peut distinguer deux types de machines thermiques :

- Celles qui sont destinées à fournir du travail.
- Celles qui sont destinées à refroidir ou réchauffer un système (*i.e.*, à fournir un flux de chaleur).

En pratique, c’est un moteur, un frigo ou une pompe à chaleur.

Il faut ici faire attention à ce dont on parle lorsque l’on parle de cycle : en effet, pour un réfrigérateur, on a bien une transformation cyclique fermée et c’est le même fluide qui revient après avoir fait un cycle. Cependant dans d’autres exemples, comme le moteur à explosion, la machine est un système ouvert : la machine revient au point initial mais c’est une nouvelle masse de fluide qui est introduite. Il faut donc distinguer le cycle de la machine et la transformation cycle (ou non) du fluide qui la fait fonctionner.(Quaranta)

Le système que l’on considère est le fluide contenu dans la machine thermique supposé en régime permanent. Comme nous considérons des cas cycliques, les fonctions d’état caractérisant notre système ont une variation nulle sur un cycle :

$$\Delta U = 0, \quad \Delta S = 0, \quad \Delta H = 0 \quad (1)$$

Transition : Nous avons défini formellement ce qu’était une machine thermique, nous allons essayer de construire une machine thermique la plus simple possible et nous allons déduire ses propriétés des principes de la thermodynamique.

1.2 Une machine thermique simple

Considérons schématiquement notre système $\Sigma \equiv$ le fluide caloporteur de la machine thermique. Nous prenons comme convention, la convention thermodynamique usuelle, c'est à dire que les grandeurs sont comptées positivement si elles sont reçues par le système. Ainsi d'après la définition de notre machine thermique, elle peut échanger du travail W et de la chaleur Q_i avec différents thermostats. (Notons que l'on a regroupé tous les travaux possibles en une seul composante). La machine sera dite motrice si $W < 0$. En effet dans ce cas, la machine donnera du travail à l'extérieur. Dans l'autre cas, on aura des machines frigorifiques, qui utilisent du travail pour effectuer des échanges thermique. Usuellement, W désigne un travail de forces de pression ou un travail lié à des parties mobiles (ex : hélice).

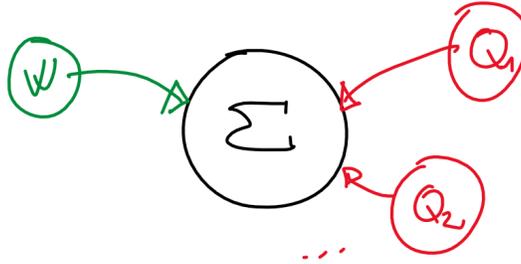


FIGURE 1 – *Schema machine*

Nous pouvons appliquer le premier principe de la thermodynamique :

$$\Delta U = W + \sum_i Q_i = 0 \quad \text{car cyclique} \quad (2)$$

Le second principe nous donne l'équation suivante nommé inégalité de Carnot-Clausius.

$$0 = \Delta S \geq \sum_i \frac{Q_i}{T_i} \quad (3)$$

Ici nous avons pris un cas général à N thermostats, mais nous pouvons commencer par prendre la cas le plus simple, celui avec un seul réservoir de température.

Cas monotherme : Si il n'y a qu'un réservoir de température (comme $T > 0$), l'inégalité de Clausius-Carnot nous donne $Q < 0$. Nous avons donc avec le premier principe : $W = -Q > 0$. Donc il ne peut exister de moteur monotherme. La machine ne peut par ailleurs que donner de l'énergie au thermostat en consommant du travail (comme un radiateur).

On considérera alors dans toute la suite des machines dithermes, qui représentent la grande majorité des cas réels.

1.3 Diagramme de Raveau

On considère une machine ditherme, avec une source froide (resp. chaude) à la température T_f (resp. T_c) fournissant le transfert thermique algébrique Q_f (resp. Q_c). D'après l'inégalité de Clausius,

$$\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0$$

. Cela délimite une zone de fonctionnement des machines réelles dans le diagramme (Q_f, Q_c) appelé diagramme de Raveau. Par ailleurs, on différencie les cas moteurs ($W < 0$) des cas récepteurs ($W > 0$) : sur un cycle, $\Delta U = 0 = Q_f + Q_c + W \implies W = -Q_c - Q_f$. Ces inégalités définissent 2 droites limites sur le diagramme de Raveau, soit 4 zones de fonctionnements différents :

Interpréter le fonctionnement de chaque zone :

- I : $Q_c > 0, Q_f < 0, W < 0$: fonctionnement moteur. La machine reçoit de la chaleur de la source chaude et en donne à la source froide, en fournissant un travail.
- II : $Q_c > 0, Q_f < 0, W > 0$: fonctionnement récepteur. On consomme du travail pour accélérer un transfert thermique du chaud vers le froid (exemple : radiateur d'ordinateur).

- III : $Q_c < 0, Q_f < 0, W > 0$: fonctionnement récepteur. On réchauffe les sources chaude et froide en consommant du travail (exemple : four, radiateur).
- IV : $Q_c < 0, Q_f > 0, W > 0$: fonctionnement récepteur. On consomme du travail pour refroidir la source froide en chauffant la source chaude (exemple : frigo, pompe à chaleur).

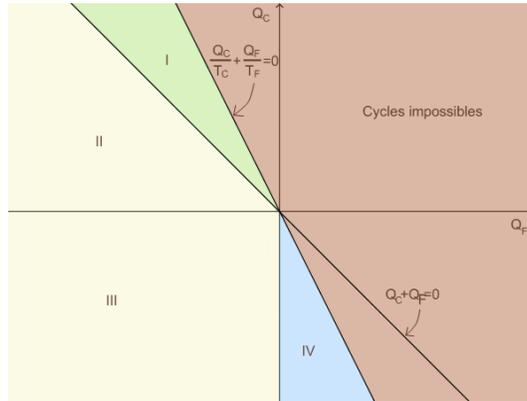


FIGURE 2 – Diagramme de Raveau (source Wikipedia)

1.4 Efficacité

Un rendement ou un coefficient de performance permet de quantifier l'efficacité de la conversion d'énergie thermique en mécanique, ou inversement. Ainsi, on les définit comme le rapport entre l'énergie utile sur l'énergie fournie. Cependant il convient de bien faire attention aux quantités prise en compte et à leurs signe. On distingue ainsi un rendement pour les moteurs et un coefficient de performance pour les pompes à chaleur.

$$\eta = \left| \frac{E_{\text{fournie}}}{E_{\text{consommée}}} \right| \quad (4)$$

- Pour un moteur : on récupère du travail en apportant de l'énergie grâce à la source chaude sous forme de transfert thermique : $\eta = \frac{-W}{Q_c}$ ("on a mis un signe moins pour avoir des grandeurs positives" *je pense qu'il faut éviter de dire ça, ça fait très artificiel. Je propose : on a mis un signe moins car du point de vue de la machine, le transfert de travail est négatif*). ODG : pour Carnot $\eta \approx 0.5$ et est compris entre 0.3 et 0.4 pour les autres à cause d'irrégularités (exemple : moteur essence : 36% max. moteur diesel : 42% max).

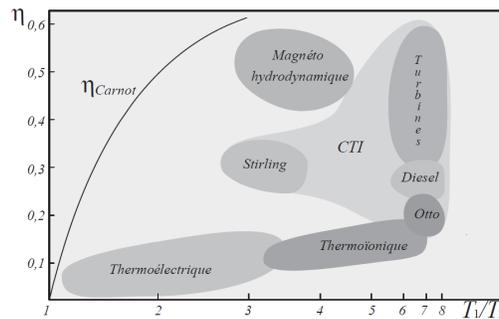


FIGURE 3 – Diagramme de ?? (source Rax)

- Pour une pompe à chaleur, l'idée est de chauffer le milieu déjà chaud en imposant grâce à du travail un flux de chaleur du froid vers le chaud (on refroidit ainsi l'extérieur dans le cas d'une maison). on définit alors le Coefficient de Performance (COP chaud) : $\text{COP} = \frac{-Q_c}{W}$. ODG : 1.5 à 4
 - Pour un réfrigérateur, on va parler d'efficacité (ou de COP froid) : $\eta = \frac{Q_f}{W}$
- On peut se demander comment avoir le rendement maximum : prenons le cas du moteur, avec les équations que l'on a, si on se place dans le cas réversible, alors l'inégalité de Clausius-Carnot devient une égalité. Nous avons alors

les équations suivantes :

$$W = -Q_f - Q_c \quad (5)$$

$$0 = \frac{Q_f}{T_f} + \frac{Q_c}{T_c} \quad (6)$$

Nous avons alors le rendement qui s'écrit :

$$\eta = \frac{-W}{Q_c} = \frac{Q_f + Q_c}{Q_c} = 1 - \frac{T_f}{T_c} \quad (7)$$

Ce rendement est nommé le rendement de Carnot, il correspond à une machine fonctionnant de manière réversible. En pratique il y a de la dissipation. De plus, pour obtenir ce rendement les transformations devraient avoir lieu de manière quasi-statique, ce qui rend un fonctionnement moteur inutile car la puissance libérée est nulle.

Cependant, ce rendement est effectivement atteint par le Cycle (théorique) de Carnot (oh surprise). Ce cycle est constitué des deux isothermes (pour que les échanges de température soient réversibles), et de deux isentropiques.

	Moteur thermique	Machine frigorifique	Pompe à chaleur
Travail	$W < 0$	$W > 0$	$W > 0$
Chaleur	$Q_1 > 0$	$Q_2 > 0$	$Q_1 < 0$
Efficacité	$ W /Q_1$	Q_2/W	$ Q_1 /W$
η_{Carnot}	$1 - (T_2/T_1)$	$T_2/(T_1 - T_2)$	$T_1/(T_1 - T_2)$

FIGURE 4 – Résumé des machines de Carnot (source Rax)

Nous avons regardé comment définir un rendement à partir des transferts thermiques observés et du travail fourni. Cela permet de caractériser la machine finie, mais ne donne aucune indication sur son fonctionnement réel.

2 Machine frigorifique

Nous allons nous intéresser à un réfrigérateur. Un réfrigérateur est une machine thermique qui utilise un travail extérieur pour refroidir.

2.1 Principe d'un réfrigérateur

2.1.1 Schéma de principe

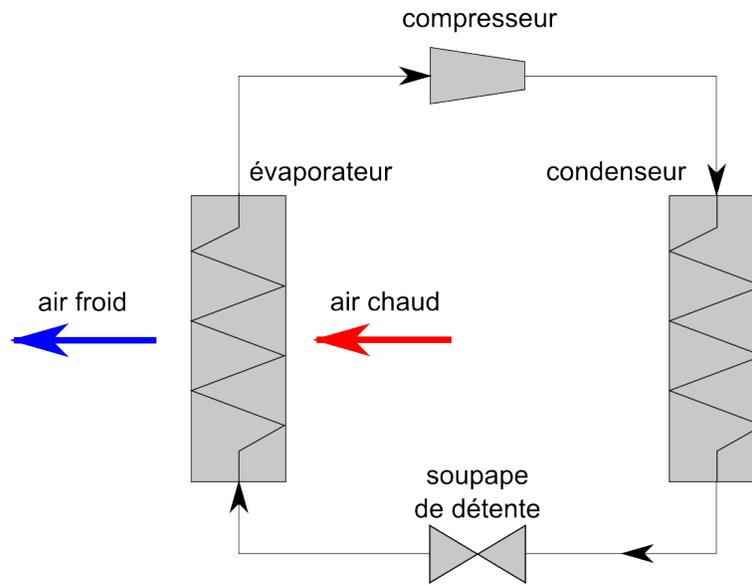
L'idée essentielle d'un réfrigérateur est que l'on utilise le fait que lorsqu'un fluide s'évapore, la réaction est endothermique et le fluide prélève de l'énergie au milieu. On va alors lui faire changer de pression pour que le fluide s'évapore à -10°C (dans le frigo) et se condense à 25°C quand il est en contact avec l'extérieur.

Description du cycle : (faire le schéma des différents composants au fur et à mesure).

- Compresseur : Compression du fluide de 1.64 à 6.65 bar
- Condenseur : Liquéfaction à pression constante. La liquéfaction est exothermique, de l'énergie est cédée à l'air ambiant (on réchauffe l'air extérieur au frigo)
- Détendeur : Le fluide subit une détente isenthalpique (Joule Thomson). La pression redescend à 1.64 bar. La température diminue à -15°C
- Évaporateur : Évaporation endothermique du fluide. C'est l'étape qui refroidit le réfrigérateur.

Quel fluide choisir ? : On remarque que l'on va pas pouvoir utiliser l'eau car sa température d'ébullition ne se trouve pas du tout dans la gamme qui nous intéresse pour un réfrigérateur. Il nous faut un fluide qui puisse s'évaporer à -15°C et se condenser à 25°C . Le premier fluide utilisé est l'ammoniac mais il a été remplacé (car toxique et explosif) par des chlorofluorocarbures eux-mêmes aujourd'hui interdits par le Protocole de Montréal car participant grandement à l'effet de serre. On utilise de HFA134a (ou R134a) dont le nom systématique est 1,1,1,2-tétrafluoroéthane. Lien BUP

On aimerait avoir une représentation graphique de ce cycle. Pour cela on utilise le diagramme des frigoristes. Pourquoi utiliser ce diagramme ?



Cycle frigorifique

FIGURE 5 – Schéma de principe d'un réfrigérateur (source wikipedia)

2.1.2 Présentation du diagramme

Le diagramme des frigoriste est un diagramme Pression - enthalpie massique (p, h), propre à un fluide comportant des valeurs numériques.

Je vous rappelle que pour un système ouvert en régime permanent, nous avons la relation suivante (parfois appelé premier principe industriel) :

$$\Delta h + \Delta e_{meca} = w_u + q$$

Aussi on voit que pour faire apparaître des changements d'état caractérisés par une enthalpie de vaporisation une représentation faisant intervenir l'enthalpie sur l'axe des ordonnées est pertinente, de plus dans un détendeur par exemple, il n'y a pas de variation de l'énergie mécanique, pas de travail utile (s'il n'y a pas de pièce mobile) et pas de transfert thermique donc on aura une isenthalpique, ce qui sera à nouveau très facile à représenter sur ce diagramme.

De plus sont renseignés :

- Les courbes de rosée et d'ébullition.
- Le point critique.
- Des courbes isothermes, isentropes, isobares,...

Sa lecture permet de déduire l'énergie obtenue

2.1.3 Tracé sur le diagramme

Spécification du modèle :

- Compression supposée adiabatique car très rapide. On la suppose également réversible, donc la transformation est isentropique
- Condenseur à pression constante
- Détente isenthalpique
- Évaporateur : Pression constante, on veut bien évaporer tout le liquide pour qu'il n'y ait pas de problème dans la compression.

2.1.4 Application numérique

- 1 : $h_1 = 390 \text{ kJ/kg}$, $P_1 = 1.64 \text{ bar}$
- 2 : $h_2 = 418 \text{ kJ/kg}$, $P_2 = 6.65 \text{ bar}$

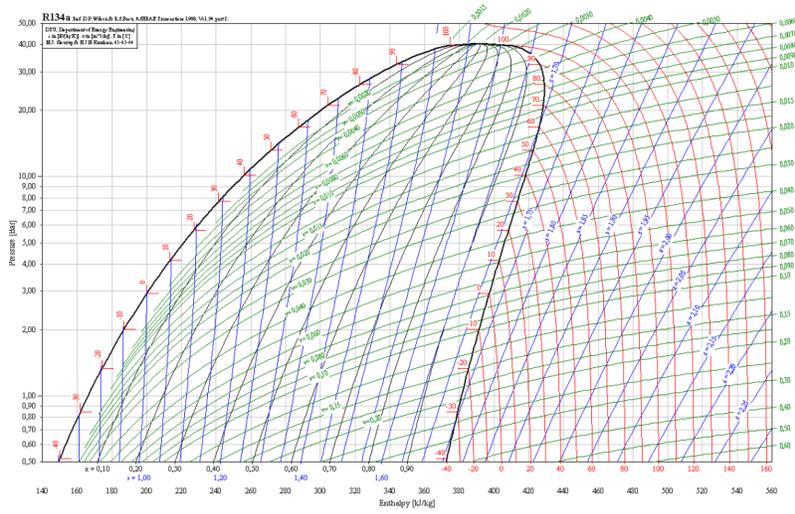


FIGURE 6 – diagramme des frigoriste (source BUP)

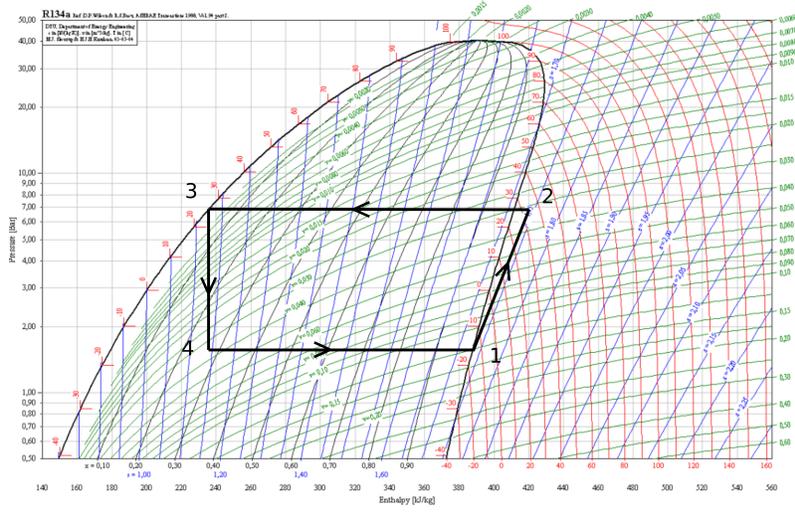


FIGURE 7 – diagramme des frigoriste (source BUP)

- 3 : $h_3 = 232 \text{ kJ kg}$, $P_3 = 6.65 \text{ bar}$
- 4 : $h_4 = 232 \text{ kJ kg}$, $P_4 = 1.64 \text{ bar}$

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

Or avec le premier principe industriel :

$$q_f = h_1 - h_4 = 390 - 232 = 158 \text{ kJ kg}$$

$$w = h_2 - h_1 = 418 - 390 = 28 \text{ kJ kg}$$

Donc

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

On peut comparer a l'efficacité de Carnot qui n'est pas très loin :

$$e = \frac{T_f}{T_c - T_f} = 6.45$$

2.2 Irréversibilité

- Effet de la viscosité : perte de pression
- Les gradient de température donnent entraînent de la diffusion thermique irréversible
- Frottement lors de la Compression

On constate que le travail à fournir est plus grand...

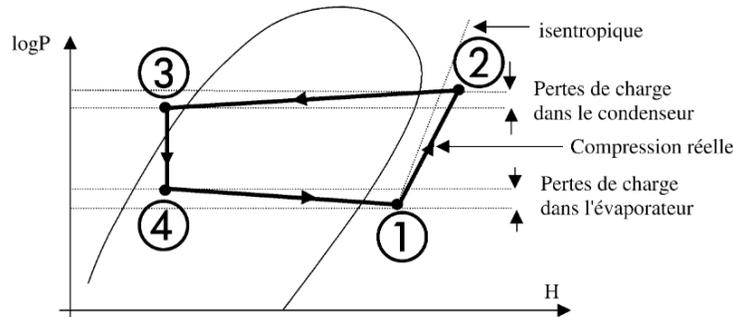


FIGURE 8 – Cycle irréversible (source BUP)

3 Moteur

Un moteur thermique est une machine thermique dont le but est de produire du travail.

3.1 Moteur à Combustion (cycle de Beau de Rochas)

3.1.1 Présentation

Un moteur a explosion fonctionne de la façon suivante : (Animation) comme montré figure 9

- A Admission : La soupape d'admission est ouverte, celle d'échappement est fermé. Le piston part de son point haut et arrive à son point bas. Un mélange d'air et de carburant est aspiré dans la chambre. Les températures sont autour de 70° et les pressions autour du bar.
- B Compression : La soupape d'admission se referme et le piston remonte comprimant ainsi le mélange. Ce qui permet au piston de remonter est à la fois l'inertie de son dernier mouvement moteur et à la fois que sur la même bielle sont mis en série plusieurs moteur déphasé.
- C Combustion : juste avant que le piston atteigne le point haut, les bougies génèrent une étincelle qui enflamme le mélange (étincelle est un arc électrique créé grâce à une bobine, sous haute tension dont on coupe le courant d'un coup). La température l'élève très rapidement (à volume quasi constant car le piston n'est pas encore redescendu) pour atteindre entre 900 et 1000° . Les pressions atteignent entre 60 et 80 bars

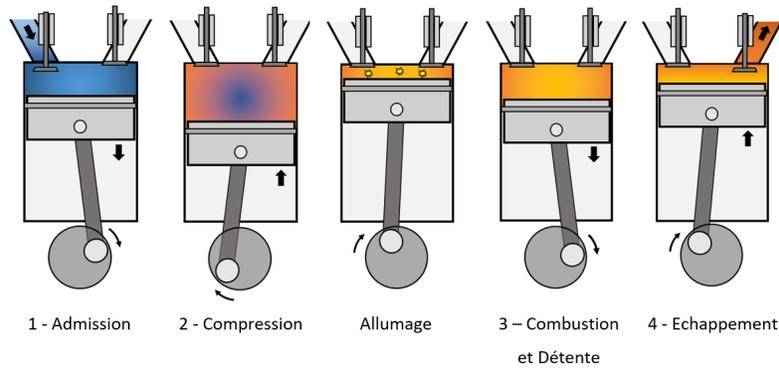


FIGURE 9 – Schéma de principe d'un moteur 4 temps (source lien ils disent que c'est diesel dans leurs site mais il font pas d'injection...) attention les numéros ne correspondent pas...

- D Détente : La combustion ayant entraîné une augmentation de la pression, l'expansion de gaz pousse le piston vers le bas. C'est le seul moment moteur du cycle! (cela correspond à une demis course de piston sur un total de deux tours pour le cycle complet)
- E Échappement : Lorsque le piston arrive au point bas, la sous pape d'échappement s'ouvre laissant sortir le gaz.

On veut une représentation pour le cycle. Comme ce qui nous intéresse c'est le travail des forces de pression ici, une représentation sur un diagramme PV (Clapeyrons) est très efficace, car l'aire sous la courbe (en prenant en compte le sens de parcours) nous indique si le cycle est moteur ou non :

$$W = - \int P dV$$

Nous pouvons alors suivre le profil de pression et de volume du gaz durant le cycle 12.

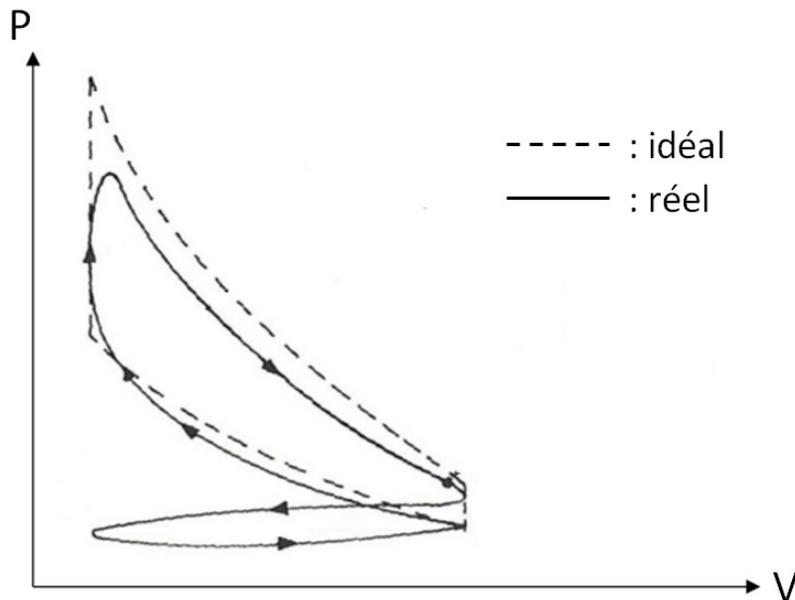
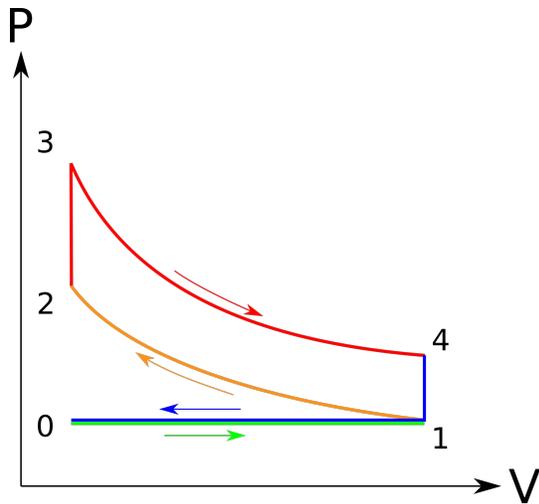
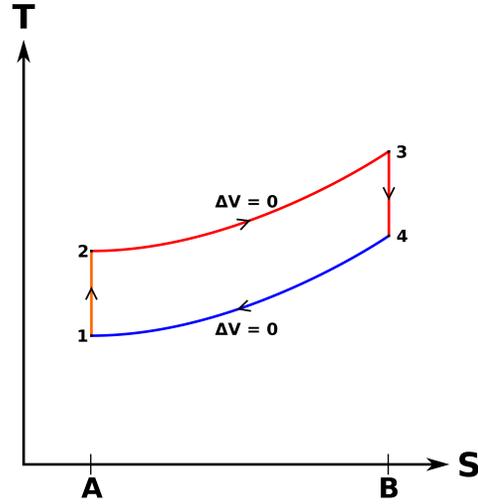


FIGURE 10 – Cycle réel (source lien)

Ici, il y a des subtilités, en effet, le mélange se modifie au cours du cycle (par la combustion) de plus le système est ouvert car le gaz utiliser pour un cycle est ensuite évacué et un nouveau le remplace. Ce cycle peut paraître complexe, notamment, certaines étapes schématiquement expliqués plus haut se chevauchent (comme la combustion et la détente), mais pour pouvoir l'étudier, nous allons le modéliser grâce à des transformations simples.



(a) Cycle PV (source Wikipedia anglais)



(b) Cycle TS (source wikipedia anglais)

3.1.2 Modélisation

Hypothèses

- Nous allons considérer que les étapes d'admission et d'échappement (une partie au moins) se compensent. Aussi, nous allons considérer un système fictif fermé. Ce système décrit le cycle "fermé" 1234.
- Nous considérons que le gaz peut être assimilé à l'air pendant toute la transformation, car la proportion d'essence est faible. De plus nous supposons que c'est un gaz parfait de $\gamma = 1.4$ et que sa capacité thermique C_v est indépendante de la température.
- A Admission $0 \rightarrow 1$: Admission d'un mélange d'air et d'essence. L'admission se fait à pression constante. (on suppose le gaz parfait)
- B Compression $1 \rightarrow 2$: On suppose la compression adiabatique (on néglige les échanges thermiques en considérant que la compression est trop rapide devant le temps de thermalisation du gaz. De plus on néglige les frottements. Cette étape est donc considérée adiabatique réversible donc isentropique. Le gaz vérifie ici la loi de Laplace : $PV^\gamma = cst$
- C Combustion $2 \rightarrow 3$: Combustion rapide du gaz à volume constant. On néglige les variations de constitution du mélange.
- D Détente $3 \rightarrow 4$: C'est la phase motrice!! On a une détente adiabatique et réversible comme pour l'étape 2. (allure en puissance décroissante donnée par la loi de Laplace)
- E Échappement $4 \rightarrow 1$: Détente isochore
- F Échappement $1 \rightarrow 0$: Échappement à pression constante.

3.1.3 Calcul du rendement

$$\eta = \frac{-W}{Q_c} = 1 + \frac{Q_f}{Q_c}$$

On doit donc déterminer $Q_f(4 \rightarrow 1)$ et $Q_c(2 \rightarrow 3)$.

- A et F se compensent
- B Compression $1 \rightarrow 2$: $T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1}$
- C Combustion $2 \rightarrow 3$: $Q_c = C_v(T_3 - T_2)$
- D Détente $3 \rightarrow 4$: $T_3 V_3^{\gamma-1} = T_4 V_4^{\gamma-1}$
- E Échappement $4 \rightarrow 1$: $Q_f = C_v(T_1 - T_4)$

On a donc :

$$\begin{aligned} \eta &= 1 + \frac{C_v(T_1 - T_4)}{C_v(T_3 - T_2)} \\ &= 1 + \frac{T_2 \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1} - T_4}{T_4 \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} - T_2} \\ &= 1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \end{aligned}$$

$r = V_1/V_2 = V_{grand}/V_{petit}$ est le rapport de compression. Plus on augmente r est plus le rendement est bon. Cependant on ne peut pas dépasser 9 (source ??) sans quoi le gaz s'enflamme avant la fin de la compression.

Pour un moteur classique : $r = 8$. On a alors : $\eta = 0.54$. Ceci est pour un cas idéal. On peut comparer à un moteur de Carnot avec $T_f = 25^\circ\text{C}$ et $T_c = 1200^\circ\text{C}$: $\eta = 0.8$

On notera que la mesure de l'aire sous le cycle du diagramme (P, V) donne le travail fourni par le moteur. (je l'ai mis avant pour justifier la représentation PV)

3.1.4 Irréversibilité

Jusqu'à présent, nous avons modélisé le moteur par des transformation "parfaite". Reprenons le diagramme réel : On observe en superposant 2 diagrammes que

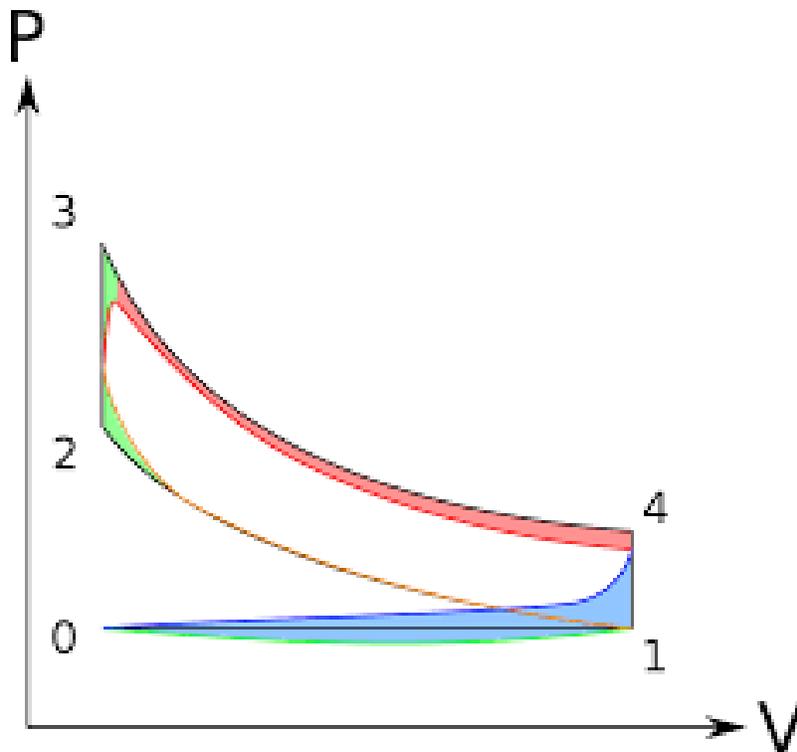


FIGURE 12 – Cycle réel (source corentin paracy et il parait wiki mais j'ai pas trouvé...)

- Frottement du piston. Les compression et détente ne sont donc pas réversibles
- Les gradient (pression et températures) entraînent de la diffusion qui est irréversible.
- Rien n'est exactement adiabatique
- La combustion n'est pas vraiment à volume constant
- On a supposé l'allumage et la combustion très rapide (quasi instantané pour être isochore) ce n'est pas la cas en pratique. D'ailleurs on allume avant que le piston soit en haut.

Il faut trouver le Cargel (il parrait qu'il y a une bonne discussion.) En réalité les rendement sont plus autour de 30 pourcents.

Pour augmenter le rendement on peut introduire le combustible dans le gaz uniquement après la combustion. Cela modifie le cycle et on obtient le cycle Diesel(1893). De cette manière le cycle à même rapport de compression, le moteur Diesel est moins efficace, cependant, avec des moteurs plus gros, lourd et cher on peut obtenir des meilleurs rendements.

4 Conclusion

Dans cette leçon nous avons été capables, en utilisant les deux premiers principes de la thermodynamique, de caractériser les machines thermiques. Nous avons observé que les principes de la thermodynamique limite même dans un cas idéal le rendement que l'on peut atteindre. De plus même ce cas limite correspond à des machines thermique non utilisable car elle nécessite un fonctionnement très lent et donc ne délivrant pas de puissance. Nous avons cependant vu que l'utilisation des machines thermiques reste très utile mais qu'il faut en réalité prendre en compte un certains nombre de limitation dues notamment à l'irréversibilité des transformations.

Malgré le fait que leur invention remonte au XVIIIème siècle (machine à vapeur), le même principe est toujours utilisé aujourd'hui.

	Moteur thermique	Machine frigorifique	Pompe à chaleur
Travail	$W < 0$	$W > 0$	$W > 0$
Chaleur	$Q_c > 0$	$Q_f > 0$	$Q_c < 0$
Efficacité	$ W /Q_c$	Q_f/W	$ Q_c /W$
η_{Carnot}	$1 - T_f/T_c$	$T_f/(T_c - T_f)$	$T_c/(T_c - T_f)$

Passage de Lucas le 6/04

4.1 Questions

- Est-ce que ça existe une machine thermique non cyclique? *Non par définition. On peut fabriquer des machines non cycliques mais elles ne rentrent pas dans ce cadre*
- C'est quoi une fonction d'état? *Une fonction mathématique décrivant l'état macroscopique du système qui admet une différentielle totale exacte. Elle ne dépend pas du chemin suivi. Des exemples?*
- Démontrer l'inégalité de Clausius. Hypothèse? *Température constante lors de la transformation.*
- C'est quoi une machine monotherme en pratique? *Un radiateur.*
- A quoi ça sert les régions II et III du diagramme de Raveau?
- C'est quoi un cycle de Carnot?
- La valeur de 0,36 % obtenue, elle est liée à quoi? *Il y a 3 étapes : déjà, le moteur est limité par le rendement de Carnot : même en fonctionnement réversible, on n'est pas à un rendement maximal. Ensuite, le fonctionnement du moteur doit être irréversible pour libérer une puissance : on est en dessous du rendement de Carnot. Enfin, des pertes énergétiques ont lieu dans la machine : frottements des pièces mobiles, dissipation par viscosité (perte de charge), diffusion thermique à cause de gradients de pression.*
- Différencier efficacité et rendement. *Il faut être clair la-dessus. Pour calculer l'efficacité, on prend un point de vue industriel : on calcule le rapport de l'énergie fournie par la machine sur l'énergie qu'il nous coûte de la faire fonctionner. Pour calculer un rendement, on doit prendre en compte toute l'énergie qui rentre dans la machine (et ainsi, pour un frigo, prendre en compte les échanges avec la source chaude par exemple). Le souci c'est que dans le langage commun, les deux sont substitués.*
- Définir les termes du premier principe industriel?
- Comment limiter les pertes et les sources d'irréversibilité? *C'est un problème industriel : pour les frottements, on met le l'huile pour lubrifier. Pour limiter la perte de charge dans les tuyaux : la loi de Poiseuille prévoit une puissance dissipée en R^4 pour une différence de pression fixée. Il est intéressant d'avoir des tuyaux fin, mais pas trop long. Il y a un premier compromis à faire car si le tuyau est trop long, la perte de charge est très grande aussi. Dans les échangeurs, il y a aussi besoin d'effectuer le changement d'état : pour favoriser les échanges thermiques, la surface d'échange doit être maximale.*
- Comment on fait le mélange air-essence? *Avec des gicleurs.*
- On parle de cylindres pour les "moteurs en série déphasés les un des autres".
- Avantage du moteur diesel? *On injecte le diesel une fois que l'air est comprimé : on peut dépasser le rapport de compression maximal de 9. La combustion est spontanée, il n'y a pas de bougies d'allumage.*
- Pourquoi on n'utilise pas le moteur de Stirling? *Il délivre une faible puissance.*

4.2 Remarques

Pour le diagramme de Mollier : il ne s'appelle pas diagramme de Mollier, c'est juste le diagramme des frigoristes. Il faut le tracer à la main étape par étape avec les différentes courbes, avant de montrer le "vrai".

Décrire le fonctionnement de la machine frigorifique pour justifier le diagramme des frigoristes.

Ne pas coller son frigo contre le mur sinon il chauffe trop et il n'est plus efficace. Parler des limitations en terme de transfert thermique et de changement d'état.

Améliorer l'explication du moteur à explosion, tracer le cycle en direct au tableau dans le diagramme PV (de Clapeyron). Parler des problèmes de combustion incomplète.

Il faut changer le plan. Placer I)1) et I)2) dans les prérequis, en gardant la définition de machines thermiques. Passer plus vite sur le diagramme de Raveau, et l'efficacité. Garder éventuellement la machine monotherme mais c'est chaud. Mettre le cycle de Carnot en prérequis aussi. En revanche, parler des modèles de cycle et insister sur les cycles réels.