

LP14: MACHINES THERMIQUES RÉELLES

22 avril 2018

Milan Rozel & Mohamed Bensmili

“L’ambition est un rêve avec un moteur à injection.”

ELVIS PRESLEY

Niveau : L2

Commentaires du jury

- Les machines thermiques ne sont **pas seulement des moteurs** (en particulier Stirling).
- Expliquer les **modélisations** (cycles simplifiés) et le **choix du fluide caloporteur**, notamment les changements de phase.
- Discuter des causes d’**irréversibilité** (frottements mécaniques, problèmes de diffusion thermique, ...).
- Présenter et utiliser des **diagrammes thermodynamiques** du programme de CPGE comme les diagrammes enthalpiques pour quantifier l’irréversibilité d’une machine réelle.

Prérequis

- Fonction d’état
- Transformations d’un système
- Capacité calorifique
- Chaleur latente
- 1^{er} et 2^{ème} principes de la thermodynamique pour un système fermé
- 1^{er} principe pour un système ouvert

Table des matières

1 Bases de thermodynamique	2
1.1 Modélisation du système étudié	2
1.2 Diagramme de Raveau	3
1.3 Limitation par le théorème de Carnot	4
2 Moteurs thermiques	4
2.1 Cycle de Beau de Rochas	5
2.2 Cycle Diesel	7
2.3 Le duel essence/diesel	8
3 Machine frigorifique : le réfrigérateur	8
3.1 Choix des composants	8
3.2 Etude du cycle à l’aide du diagramme de Mollier	9

Introduction

Tout d’abord, qu’est-ce qu’une machine thermique ? Une machine thermique est un dispositif permettant d’échanger un travail ou de la chaleur en faisant subir un cycle thermodynamique à un système, souvent un fluide. Pour rappel, un cycle thermodynamique est une succession de transformations où le système revient dans son état initial. Les machines thermiques font aujourd’hui une partie intégrante de notre quotidien, mais elles étaient au 19^{ème} siècle en plein cœur de l’évolution de la thermodynamique.

Au cours de cette leçon, nous aurons pour objectif de dégager les lois de la thermodynamique qui aiguillent la construction d’une machine thermique. Nous distinguerons alors deux types de machines : les moteurs thermiques et les machines frigorifiques. A partir de cela, nous présenterons les moteurs essence et diesel. Et forts de nos connaissances, nous chercherons à assembler ensemble les éléments nécessaires à la création d’un réfrigérateur !

1 Bases de thermodynamique

1.1 Modélisation du système étudié

✎ [1] [2]

Dans une machine thermique, on prends comme **système thermodynamique** le fluide caloporteur, plus précisément les N molécules de fluide. Le système est fermé, et va subir des transformations cycliques au cours desquels il va échanger du travail W avec un système mécanique ou électrique, et échanger du transfert thermique Q_i avec un ou plusieurs thermostats aux températures de contact T_i , puis retourner à son état initial. Le système thermodynamique étant fermé, on peut appliquer les deux principes de la thermodynamique au système entre l'instant initial et l'instant final.

Il vient alors :

$$\Delta U = \sum_i^n Q_i + W \quad (1)$$

$$\Delta S = S_{\text{échangée}} + S_{\text{créée}} = \sum_i^n \frac{Q_i}{T_i} + S_{\text{créée}} \quad (2)$$

Sachant que l'état initial est identique à l'état final :

$$W + \sum_i^n Q_i = 0 \quad (3)$$

$$\sum_i^n \frac{Q_i}{T_i} + S_{\text{créée}} = 0 \quad (4)$$

L'entropie créée étant toujours positive (nulle pour une évolution réversible et strictement positive sinon), il vient :

$$\sum_i^n \frac{Q_i}{T_i} \leq 0 \quad (5)$$

Cette inégalité est appelée **inégalité de Clausius- Carnot**.

Elle fournit plusieurs résultats :

- **Enoncé de Kelvin** : Il n'existe pas de moteur cyclique monotherme.

En effet, une machine cyclique monotherme est en contact avec une unique source de chaleur à température T_1 . D'après l'inégalité de Clausius, $Q_1 \leq 0$. Par conséquent d'après le premier principe appliqué à une transformation cyclique : $W \geq 0$. La machine est dite réceptrice, il s'agit d'un radiateur électrique en fait ! Malheureusement, on ne peut donc pas imaginer un bateau qui avancerait en gelant l'eau de la mer. En effet, la mer apporterait un transfert de chaleur positif au moteur qui lui permettrait de fournir un travail négatif !

- **Enoncé de Clausius** : Aucun système décrivant une évolution cyclique ne peut réaliser un transfert thermique parfait d'une source froide à une source chaude.

Considérons deux sources de chaleur, respectivement à T_F et T_C , avec $T_F < T_C$. Le transfert thermique est supposé parfait donc $W = 0$. Le premier principe donne : $Q_F = -Q_C$. En injectant dans l'inégalité de Clausius :

$$Q_C \left(\frac{1}{T_C} - \frac{1}{T_F} \right) \leq 0 \quad (6)$$

D'où $Q_C > 0$ et $Q_F < 0$: la source chaude cède de la chaleur et la source froide reçoit cette même chaleur.

Remarque : Ces énoncés sont longs à écrire, il est préférable de les donner à l'oral.

On sait à présent qu'il existe des contraintes qui vont guider la construction d'une machine thermique. Un moteur monotherme ne peut exister et un transfert de chaleur idéal entre deux sources ne peut se faire que de la source chaude à la source froide. Qu'en est-il si la machine reçoit un travail ? Pour répondre à cette question, nous allons présenter le diagramme de Raveau.



1.2 Diagramme de Raveau

✎ [1] [3]

Le diagramme de Raveau est un outil qui permet d'interpréter le travail en fonction des transferts thermiques Q_C et Q_F . Il est établi à partir des résultats précédents. En effet :

1. D'après le premier principe, $W = -(Q_C + Q_F)$

En traçant $W=0$, ie $Q_C = -Q_F$, on délimite deux zones : une première où la machine est motrice ($W < 0$), une seconde où elle est réceptrice ($W > 0$)

2. L'inégalité de Clausius pour une machine ditherme s'écrit : $\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0$, donc la seule zone autorisée est :

$$Q_C \leq -\frac{Q_F T_C}{T_F} \quad (7)$$

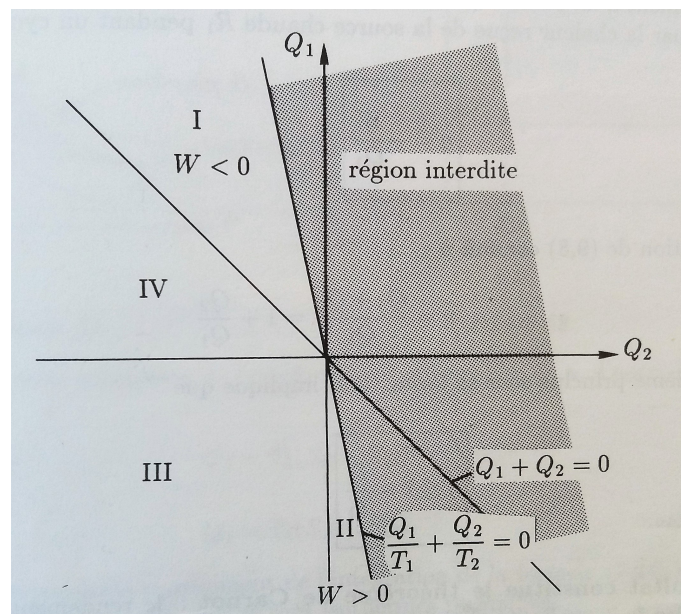


Figure 1 : Diagramme de Raveau [1]

Au final :

La zone I est la seule qui convient pour un moteur thermique. Donc celui-ci reçoit un transfert thermique de la source chaude et cède un transfert thermique à la source froide avec $Q_C > |Q_F|$ (le système reçoit plus de chaleur de la source chaude qu'il n'en cède à la source froide).

Dans la zone II, $W > 0$, $Q_C > 0$ et $Q_F < 0$, le système reçoit un travail pour réaliser un transfert thermique d'une source chaude vers une source froide, c'est inutile !

Dans la zone III, $W > 0$, $Q_C < 0$ et $Q_F < 0$, le système reçoit un travail et cède son énergie sous forme de chaleur aux sources chaude et froide, cela correspond à un système de chauffage central.

Dans la zone IV, $W > 0$, $Q_C < -\frac{Q_F T_C}{T_F} < -Q_F$ et $Q_F > 0$, autrement dit le fluide reçoit un travail qui lui permet de prélever de la chaleur à la source froide et céder de la chaleur à la source chaude.

On a donc répondu à notre problématique, on peut réaliser un transfert d'une source froide vers une source chaude lorsque le système reçoit du travail. Il s'agit du principe des réfrigérateurs et pompes à chaleur.

Remarque : J'ai fait le choix de ne pas développer le cas de la pompe à chaleur dans la leçon, mais il faut ici présenter son fonctionnement rapidement.

⌋ Attention : L'inégalité de Carnot-Clausius, en plus de nous aider à déterminer les formes de machines dithermes nous a limité ! En effet, le rendement/efficacité des machines dithermes va être limité par le théorème de Carnot.

1.3 Limitation par le théorème de Carnot

⚡ [1] [2]

Considérons dans un premier temps un moteur, c'est-à-dire une machine qui reçoit un transfert thermique de la source chaude et cède du travail mécanique et de la chaleur à la source froide. On définit le rendement (ou efficacité) du moteur par :

$$\eta = \left| \frac{\text{Energie utile}}{\text{Energie couteuse}} \right| = \frac{-W}{Q_C} = \frac{Q_C + Q_F}{Q_C} = 1 + \frac{Q_F}{Q_C} \quad (8)$$

Or d'après l'inégalité de Clausius :

$$\frac{Q_F}{Q_C} \leq -\frac{T_F}{T_C} \text{ d'où } \eta \leq \left(1 - \frac{T_F}{T_C}\right) = \eta_C \quad (9)$$

Théorème de Carnot : Le rendement d'un moteur ditherme cyclique réel est inférieur à l'efficacité η_C d'un moteur ditherme cyclique réversible. Le rendement maximal ou rendement de Carnot est indépendant du système thermodynamique qui évolue et correspond au cas de réversibilité ; il ne dépend que des températures des sources.

Odg : $T_F=300\text{K}$ (air atmosphérique), $T_C=1500\text{K}$ (gaz en combustion), $\eta_C=0.80$.
En réalité $\eta_{\text{réel}}=0.35$ pour un moteur essence et 0.45 pour un moteur Diesel

Considérons maintenant une machine frigorifique, ie une machine qui reçoit un travail et réalise un transfert thermique de la source froide vers la source chaude

$$\eta = \left| \frac{\text{Energie utile}}{\text{Energie couteuse}} \right| = \frac{Q_F}{W} \quad (10)$$

Avec l'inégalité de Clausius :

$$\text{COP} \leq \left(\frac{T_F}{T_C - T_F} \right) = e_C \quad (11)$$

Théorème de Carnot : L'efficacité d'un réfrigérateur est inférieure à l'efficacité de Carnot. e_C est indépendant du système qui évolue et ne dépend que des températures de sources.

ATTENTION : On parle ici de coefficient de performance car sa valeur est supérieure à 1 ! On peut toujours parler d'efficacité mais pas de rendement car un rendement est inférieur à 1 !

Odg : $T_F=263\text{K}$, $T_C=293$ (températures des sources), $e_C= 8.8$

ATTENTION : Les valeurs du Gié prenaient en compte les températures extrêmes du fluide, mais il s'agit en fait des températures des sources.

⌋ Nous avons ici calculé des efficacité de Carnot, pour des cycles réversibles, qu'en est-il en vrai ?

2 Moteurs thermiques

Tout d'abord, il faut savoir que les cycles des moteurs ne sont pas toujours fermés, i.e. que le fluide moteur ne revient pas toujours à son état initial en fin de cycle, on parle alors de cycle ouvert. Dans un cycle ouvert, le fluide moteur est renouvelé à chaque fin de cycle, c'est donc le cas des moteurs à combustion.

Pour pouvoir appliquer le premier principe pour un système fermé, il va falloir modéliser ces cycles ouverts avec des cycles fermés. Pour cela on considère les hypothèses d'air standard simplifiées qui consistent à considérer la masse d'air fixe, le fluide d'air comme un gaz parfait, que la combustion est réalisée par une source de chaleur externe et que le cycle se termine par l'évacuation de la chaleur dans le milieu extérieur.

Au quotidien on distingue deux grands types de moteurs, à essence et diesel. Nous commencerons par présenter le

principe du moteur à essence.

Remarque importante : Dans cette deuxième partie, je pars du constat que les cycles des moteurs sont ouverts et qu'il faut les modéliser par des cycles fermés pour utiliser le 1^{er} principe classique. La démarche suivante s'avère plus pédagogique :

1. Présenter un cycle réel, celui de Beau de Rochas ici.
2. Préciser que c'est un cycle ouvert qui nécessite une modélisation par un cycle idéal.
3. Réaliser la modélisation et calculer le rendement idéal
4. Conclure que $\eta_{réel} < \eta_{idéal} < \eta_{Carnot}$. En effet, le cycle contient des étapes irréversibles, d'où la seconde inégalité. L'aire du cycle réel est inférieure à celle du cycle idéal, d'où la première inégalité.

2.1 Cycle de Beau de Rochas

➤ [1] [2] [4]

Le français Beau de Rochas a conceptualisé le moteur en 1862, il s'agissait d'un moteur à 4 temps : le piston fait 2 aller-retours.

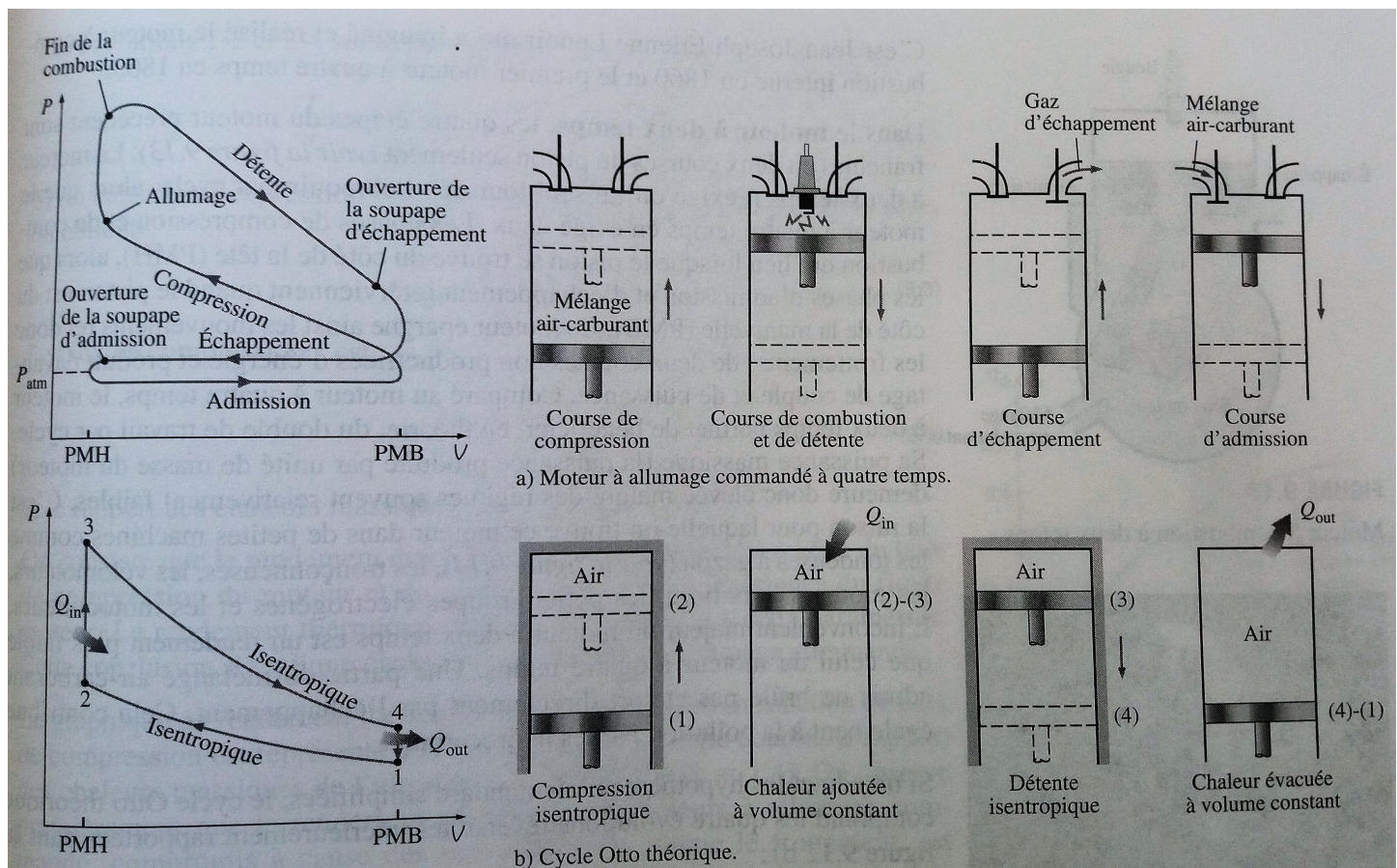


Figure 2 : Cycle de Beau de Rochas [4]

- **Admission AB :** le cylindre a un volume minimal, la soupape d'admission s'ouvre, le mélange air-carburant entre dans le cycle à pression quasi constante entraîné par la dépression provoquée par la rotation du vilebrequin. Le piston descend jusqu'à ce que le volume soit maximal.
- **Compression BC :** Sous l'effet de l'inertie, le vilebrequin pousse le piston vers le haut, ce qui comprime le mélange.
- **Combustion CD et Détente DE :** Lorsque le piston s'apprête à atteindre son volume minimal, une étincelle commandée jaillit et provoque l'inflammation du mélange. On dit qu'il s'agit d'un moteur à allumage commandé. La pression augmente alors fortement, et les gaz brûlés poussent le piston vers le bas : c'est la détente. Le temps MOTEUR!

- **Échappement EBA** : 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 et le volume atteint sa valeur minimale.

Modélisation :

On utilise les hypothèses d'air standard simplifié :

- AB et BA ne sont donc pas pris en compte dans le cycle idéal. Ce sont des étapes isobares et isothermes.
 - BC : On suppose la compression adiabatique (la durée d'évolution est faible devant le temps des transferts thermiques à la paroi) et réversible (pas de frottements).
 - CD : On suppose que la combustion est suffisamment rapide pour négliger la variation de volume. L'évolution est donc isochore.
 - DE : Détente isentropique.
 - EB : Le gaz est de nouveau à pression atmosphérique suffisamment rapidement pour négliger la variation de volume. On suppose de plus que la masse d'air y est constante. L'évolution est donc isochore.
- A l'aide de cette modélisation nous pouvons maintenant calculer le rendement.

$$\eta = \frac{-W}{Q_C} = 1 + \frac{Q_F}{Q_C} \quad (12)$$

- CD étant isochore : $C_v(T_D - T_C) = Q_C$
- EB étant isochore : $C_v(T_E - T_B) = Q_F$
- BC étant isentropique : $T_B V_{max}^{\gamma-1} = T_C V_{min}^{\gamma-1}$
- DE étant isentropique : $T_D V_{min}^{\gamma-1} = T_E V_{max}^{\gamma-1}$

Donc en notant $a = \frac{V_{max}}{V_{min}}$:

$$\eta = 1 + \frac{T_E - T_B}{T_D - T_C} = 1 - \frac{1}{a^{\gamma-1}} \quad (13)$$

Evolution du rendement d'un moteur essence en fonction du taux de compression

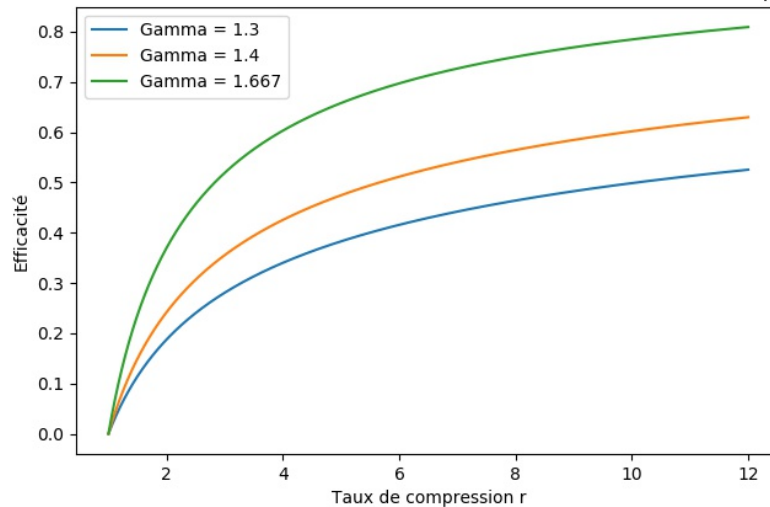


Figure 3 : Évolution de l'efficacité dans un cycle de Beau de Rochas en fonction du taux de compression

Odg : Pour $\gamma = 1.4$ et $a=9$: $\eta = 0.58$

Quelques commentaires :

- Si on augmente a , le rendement augmente. Malheureusement il y a une limitation de a qui doit être inférieure à 9 à cause de la détonation (le mélange s'enflamme avant la fin de la compression).
- Avec un gaz monoatomique, on peut améliorer le rendement.
- 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 détentes ne sont pas réversibles à cause des frottements et des gradients de pression et température, elles 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)
- Le rendement peut encore diminuer à cause des frottements.

Nous avons ici étudié un moteur à allumage commandé, étudions maintenant un moteur à allumage par compression

2.2 Cycle Diesel

✚ [1] [4]

A la différence du cycle essence, le moteur diesel comprime l'air seul, le combustible est injecté par la suite. On parle de moteur à allumage par compression.

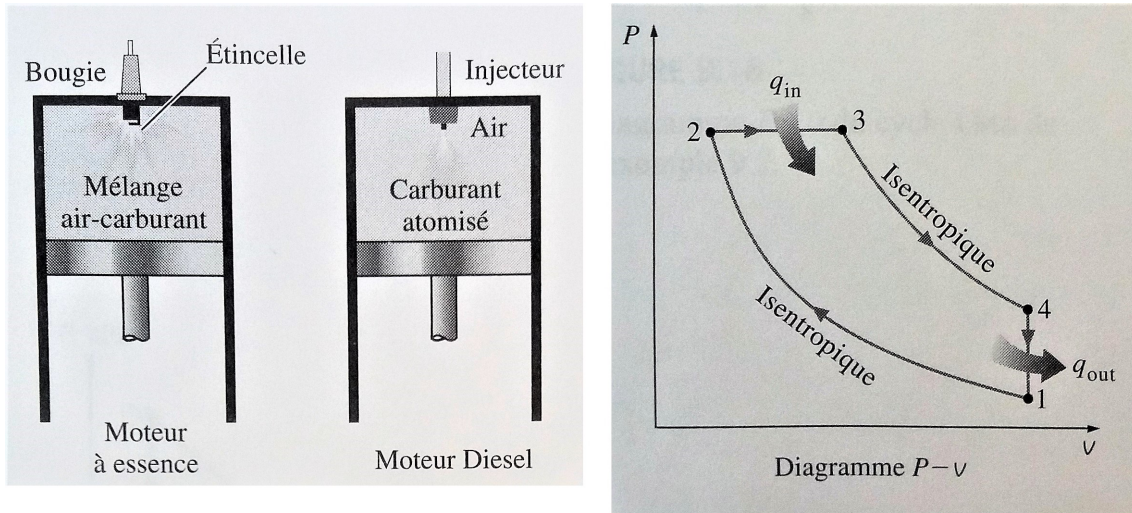


Figure 4 : Cycle Diesel [4]

On commence dès à présent avec l'hypothèse d'air standard simplifié. Un moteur diesel a 4 temps :

AB : Seul l'air est admis.

BC : Compression isentropique de l'air seul.

CD et DE : On injecte le gazole en gouttelettes, le mélange s'enflamme, puis se détend d'abord à pression constante puis détente isentropique quand l'addition de chaleur est terminée Temps MOTEUR! La chaleur est donc transmise au fluide à pression constante.

EBA : Échappement. La chaleur est évacuée à volume constant comme pour Beau de Rochas.

$$\eta = 1 + \frac{Q_F}{Q_C} \quad (14)$$

BC étant isentropique : $T_B V_{max}^{\gamma-1} = T_C V_{min}^{\gamma-1}$

CD étant isobare : $C_p(T_D - T_C) = Q_C$

DE étant isentropique : $T_D V_D^{\gamma-1} = T_E V_{max}^{\gamma-1}$

EB étant isochore : $C_v(T_B - T_E) = Q_F$

$$\eta = 1 + \frac{T_B - T_E}{\gamma(T_D - T_C)} = 1 - \frac{\alpha\beta^{1-\gamma} - \beta\alpha^{1-\gamma}}{\gamma(\alpha - \beta)} \quad (15)$$

avec $\alpha = \frac{V_B}{V_A}$ le rapport de compression et $\beta = \frac{V_B}{V_D}$ un deuxième rapport de volumes important.

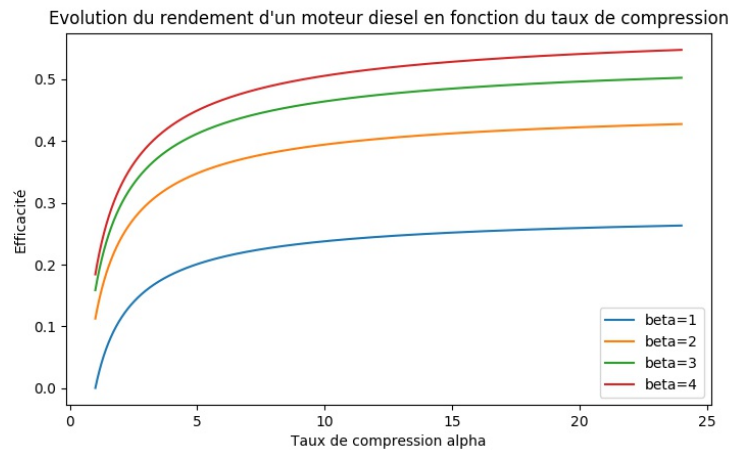


Figure 5 : Évolution de l'efficacité dans un cycle Diesel en fonction du taux de compression

Quelques commentaires : 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.

2.3 Le duel essence/diesel

✍ [4]

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.

Remarque : Les parties 2.2 et 2.3 m'ont semblé nécessaires car elles permettent de comparer deux moteurs et de présenter deux moteurs souvent opposés dans le quotidien. Cependant le coeur du sujet est le III, il faudrait donc faire des choix : présenter les différences avec le moteur essence et donner la formule du rendement et montrer une simulation ? Une alternative consiste à tout simplement inverser les parties 2 et 3.

↓
Ayant traité les moteurs thermiques, on peut maintenant s'intéresser au second type de machine thermiques : les machines frigorifiques.

3 Machine frigorifique : le réfrigérateur

Dans cette troisième partie, comme promis, nous allons présenter le principe de fonctionnement d'un réfrigérateur en assemblant dans un premier temps les éléments nécessaires, puis nous calculerons le rendement et proposerons des pistes d'optimisation du réfrigérateur.

3.1 Choix des composants

✍ [4][5]

Une machine frigorifique (réfrigérateur et pompe à chaleur) fonctionne grâce à un transfert d'énergie d'une source froide vers une source chaude, moyennant un travail fourni au système.

Dans le cas du réfrigérateur, on souhaite refroidir la source froide, il nous faut donc faire en sorte que la source froide cède un transfert thermique au fluide et que celui-ci puisse ensuite restituer cette énergie à la source chaude. Étant donné que ce sont au cours des changements d'état que les échanges d'énergie sous forme de chaleur sont les plus importants, il faut choisir un fluide qui puisse au contact de la source froide se vaporiser et au contact de la source

chaude se condenser. En effet, la vaporisation étant endothermique, c'est la source froide qui va fournir l'énergie et donc se refroidir ; la condensation étant exothermique, c'est le fluide qui va céder de l'énergie à la source chaude et donc la réchauffer. Ces étapes sont réalisées respectivement dans un évaporateur et un condenseur.

On comprends donc le principe des étapes de transferts de chaleur, cependant comment expliquer que le fluide puisse les réaliser successivement ? A même pression, les températures de vaporisation et de condensation sont égales, il va donc falloir modifier la pression de telle sorte qu'au contact de la source froide, la température de vaporisation soit inférieure à la température de la source froide, et de sorte qu'au contact de la source chaude, la température de condensation soit supérieure à la température de la source chaude. Pour y arriver, on doit donc utiliser un condenseur et un détendeur.

En pratique, on choisira comme fluide caloporteur le 1,1,1,2 Tétrafluoroéthane $\text{CF}_3\text{-CH}_2\text{F}$ qui se vaporise à -15°C à 1.64bar et se condense à 25°C à 6.65bar. Celui-ci présente l'avantage de posséder une capacité calorifique massique et une chaleur latente massique de vaporisation élevées, de ne pas détruire la couche d'ozone,...

On peut résumer le fonctionnement que nous venons de détailler par le cycle suivant :

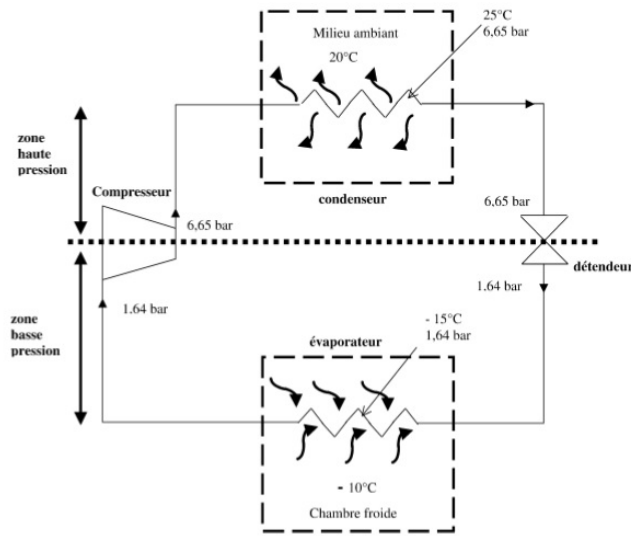


Figure 6 : Cycle de fonctionnement d'un réfrigérateur [5]

3.2 Etude du cycle à l'aide du diagramme de Mollier

Comme nous venons le voir, on peut modéliser le cycle d'un réfrigérateur par 4 étapes :

- 1-2 : Compression isentropique à 1.64bar jusqu'à 6.65bar. Le fluide reçoit un travail électrique.
- 2-3 : Condensation isobare. Le fluide cède un transfert thermique à la source chaude.
- 3-4 : Détente isenthalpique. Le fluide retrouve un équilibre liquide-gaz.
- 4-1 : Évaporation isobare. Le fluide reçoit un transfert thermique de la source froide.

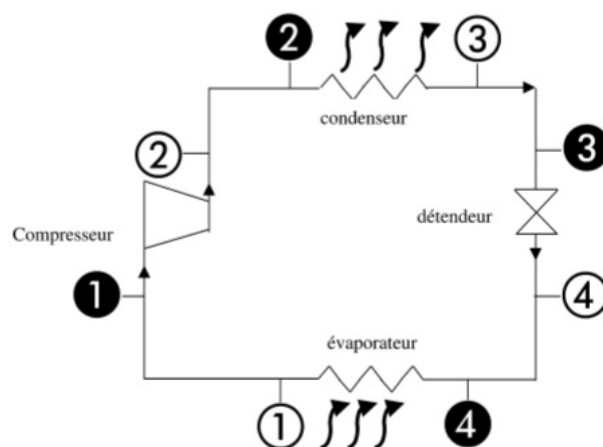


Figure 7 : Diagramme des thermiciens [5]

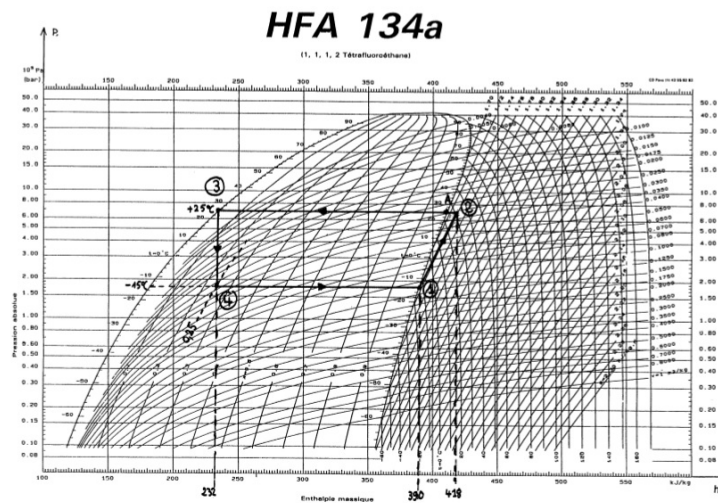


Figure 8 : Diagramme de Mollier d'un réfrigérateur [5]

A l'aide de la modélisation et du diagramme de Mollier, on peut estimer l'efficacité.

$$e = \frac{Q_F}{W} = \frac{\Delta H_{41}}{\Delta H_{12}} = \frac{158}{28} = 5.64 \quad (16)$$

En réalité, nous avons surestimé l'efficacité car nous n'avons pas pris en compte les pertes de charge au sein du condenseur et de l'évaporateur. Le cycle est donc déformé. Prenons maintenant en compte le caractère irréversible de l'étape de compression. Le fluide est déjà vaporisé avant l'étape de compression, et est déjà liquéfié avant de sortir du condenseur. Au final, le cycle réel est de la forme suivante.

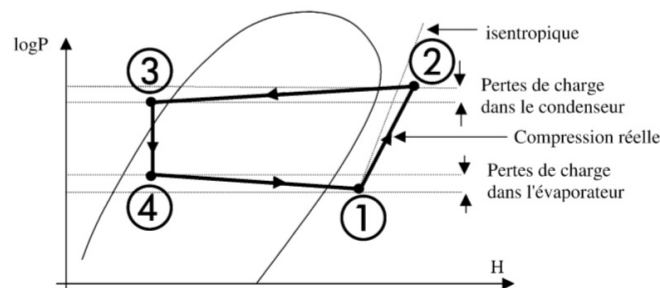


Figure 9 : Cycle réel d'un réfrigérateur [5]

Conclusion Au cours de cette leçon, nous avons présenté les critères nécessaires à la réalisation d'une machine thermique. Nous avons distingué deux types de machines thermiques : les moteurs et les machines frigorifiques. Dans les exemples présentés, nous avons vu que les pertes de charges limitaient notamment l'efficacité réelle, on pourrait se demander comment les limiter.

Afin d'élaborer cette leçon, j'ai utilisé diverses références : les grandes lignes des deux premières parties sont tirées du livre de thermodynamique [1], le diagramme de Raveau a d'ailleurs été repris de celui-ci. Afin de compléter ce diagramme, on peut utiliser une seconde référence [3]. Pour un approfondissement des notions, je conseille une troisième référence qui contient davantage d'ordres de grandeurs [2]. Enfin pour avoir une vision plus concrète et une exploitation des rendements, le livres de Y.A.Cengel et M.A. Boles est intéressant [4]. Pour la dernière partie sur le réfrigérateur, une approche très pédagogique est proposée dans le BUP 862 [5].

Références

- [1] Claire Lhuillier et Jean Rous. *Introduction à la thermodynamique*. Dunod, 1994.
- [2] Stéphane Olivier et Hubert Gié. *Thermodynamique, 1ère et 2ème année*. Tec Doc, 1996.
- [3] Michel Bertin ; Jean-Pierre Faroux et Jacques Renault. *Thermodynamique*. Dunod Université, 1993.
- [4] Yunus A.Cengel et Michael A. Boles. *Thermodynamique : Une approche pragmatique*. Cheneliere, 2008.
- [5] François Martin. Le réfrigérateur. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, pages 531–550, Mars 2001.