

# THERMODYNAMIQUE 4

## MACHINES THERMIQUES

### Table des matières

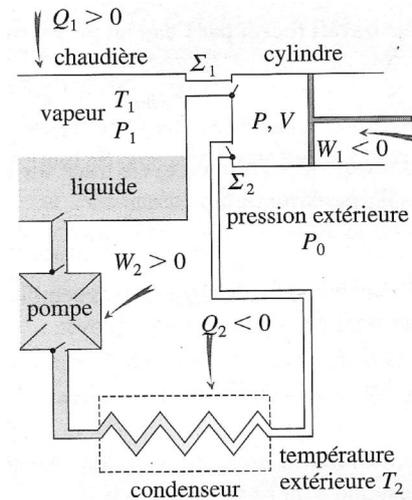
<b>1 Définitions et conventions</b>	<b>2</b>
1.1 Machine à vapeur de Watt . . . . .	2
1.2 Machine thermique . . . . .	2
1.3 Définition qualitative du rendement . . . . .	2
<b>2 Application des principes de la thermodynamique aux machines thermiques</b>	<b>2</b>
2.1 Bilan d'énergie interne . . . . .	2
2.2 Bilan d'entropie . . . . .	3
<b>3 Applications</b>	<b>3</b>
3.1 Moteur ditherme . . . . .	3
3.1.1 Rendement maximal . . . . .	3
3.1.2 Cycle de Carnot . . . . .	3
3.2 Machines frigorifiques . . . . .	4
3.2.1 Etude théorique . . . . .	4
3.2.2 Suivi du cycle . . . . .	4
3.3 Pompe à chaleur . . . . .	5
<b>4 Exemple de machine réelle : moteur à essence</b>	<b>5</b>
4.1 Fonctionnement et cycle expérimental . . . . .	5
4.2 Modèle théorique : cycle de Beau de Rochas . . . . .	6
4.2.1 Modèle . . . . .	6
4.2.2 Rendement . . . . .	6

On a motivé l'étude de la thermodynamique par une approche historique, le but étant d'expliquer et d'améliorer le fonctionnement des moteurs thermiques (machines à vapeur, moteurs diesel, etc). Toutefois, ces moteurs ne sont qu'une partie de ce qu'on appelle **machines thermiques** qui sont des systèmes permettant d'échanger du travail et de la chaleur avec l'extérieur. On va donc dans ce chapitre étudier les machines thermiques.

## 1 Définitions et conventions

### 1.1 Machine à vapeur de Watt

La machine à vapeur développée par Watt est composée de la manière suivante. De l'eau est chauffée dans une chaudière afin d'être transformée en vapeur sous pression (l'eau reçoit une quantité de chaleur). Cette vapeur est ensuite acheminée vers un piston, mis en mouvement par la différence de pression entre la vapeur et l'extérieur (la vapeur fournit alors du travail à l'extérieur). La vapeur à pression atmosphérique est alors acheminée vers un condenseur où elle revient à l'état liquide à température ambiante (en fournissant de la chaleur à l'extérieur). Enfin, l'eau liquide est ramenée dans la chaudière par une pompe (l'eau reçoit alors du travail).



### 1.2 Machine thermique

On définit une **machine thermique** comme un dispositif dans lequel un système fluide subit une succession de transformations qui forment un **cycle** permettant une conversion d'énergie. Au cours d'un cycle le système fluide échange du travail et de la chaleur avec l'extérieur.

Dans ce chapitre, on ne s'intéressera qu'aux machines thermiques **dithermes** : les échanges de chaleur ne se feront qu'en contact avec deux thermostats, un à la température froide  $T_f$ , l'autre à la température chaude  $T_c$ . C'est le modèle le plus simple permettant de décrire un moteur.

On représente alors une machine thermique ditherme sous la forme d'un diagramme "pivvre". Comme tout le temps en thermodynamique, on compte le travail et les chaleur **reçus**.

### 1.3 Définition qualitative du rendement

Selon le type de machine considéré, on va fournir de l'énergie sous une certaine forme au système, et en récupérer une partie qui nous sera utile.

Par exemple, dans le cas de la machine à vapeur, ce qui est fourni au système est de la chaleur dans la chaudière et du travail dans la pompe (c'est l'énergie que l'on paye), et on récupère du travail au niveau du piston. Il y a aussi de la chaleur qui est dégagée au niveau du condenseur, mais elle n'est pas valorisable, donc pas comptée pour le rendement.

On peut alors définir le **rendement** ou l'**efficacité** de la machine comme le rapport entre l'énergie utile et l'énergie payée.

## 2 Application des principes de la thermodynamique aux machines thermiques

### 2.1 Bilan d'énergie interne

Appliquons le premier principe au système fluide d'une machine ditherme au cours d'un cycle :  $\Delta U = W + Q_c + Q_f$ . Or l'énergie interne est une fonction d'état, donc  $\Delta U = 0$  sur un cycle (on est revenu dans le même état).

On obtient alors le bilan d'énergie interne pour le système fluide sur un cycle  $W + Q_c + Q_f = 0$ .

On distingue alors deux types de machines

- celles pour lesquelles  $W < 0$ , qui fournissent effectivement du travail (mécanique) à l'extérieur : ce sont des **moteurs**. Le cycle est parcouru dans le sens horaire dans un diagramme de Clapeyron  $(P, V)$  ;
- celles pour lesquelles  $W > 0$  qui reçoivent effectivement du travail de l'extérieur : ce sont des machines **réceptrices**. Le cycle est parcouru dans le sens trigonométrique dans un diagramme  $(P, V)$ . Il s'agit par exemple des frigidaire ou des pompes à chaleur.

## 2.2 Bilan d'entropie

Appliquons le second principe au système fluide d'une machine ditherme au cours d'un cycle :  $\Delta S = S_{ech} + S_{cr}$ . Puisque l'entropie est une fonction d'état,  $\Delta S = 0$ .

On a donc  $S_{ech} = \frac{Q_f}{T_f} + \frac{Q_c}{T_c} = -S_{cr} \leq 0$ .

Pour le système fluide d'une machine thermique ditherme, on a au cours d'un cycle l'**inégalité de Clausius** :  $\frac{Q_f}{T_f} + \frac{Q_c}{T_c} \leq 0$ . L'égalité est atteinte uniquement si  $S_{cr} = 0$ , c'est-à-dire pour une évolution réversible.

Conséquence : Si on avait une seule source de chaleur (par exemple, uniquement la source chaude, donc on prend  $Q_f = 0$ ), les deux principes de la thermodynamique donnent  $W = -Q_c$  et  $Q_c/T_c \leq 0$ . On en déduit directement  $W \geq 0$ , donc le fluide reçoit effectivement du travail : il est impossible d'avoir un moteur monotherme !

## 3 Applications

### 3.1 Moteur ditherme

#### 3.1.1 Rendement maximal

Pour un moteur, on veut  $W > 0$ , et on aura une source chaude que l'on paye, et une source froide "gratuite" (l'atmosphère la plupart du temps).

On peut donc définir le rendement d'un moteur  $r = \frac{-W}{Q_c}$  car le travail utile récupéré par l'utilisateur est l'opposé du travail fourni au fluide.

Utilisons alors les bilans d'énergie et d'entropie :  $-W = Q_c + Q_f$  et  $\frac{Q_f}{T_f} \leq \frac{T_f}{T_c}$ .

On a donc l'expression du rendement maximal d'un moteur ditherme  $r \leq r_{max} = 1 - \frac{T_f}{T_c}$ .

Remarques :

- le rendement est forcément positif, donc on ne peut pas se tromper entre  $T_c$  et  $T_f$  dans l'expression de  $r_{max}$  ;
- le rendement maximal est atteint dans le cas d'un cycle réversible ;
- le rendement maximal est croissant avec l'écart entre les températures  $T_f$  et  $T_c$ .

#### 3.1.2 Cycle de Carnot

On peut alors se poser la question de savoir si le rendement maximal est atteint.

Pour ceci, on étudie le **cycle de Carnot** composé de 4 étapes : 2 évolutions isothermes en contact avec les thermostats et 2 évolutions isentropiques produisant du travail.

Ce cycle est nécessairement réversible : lors des isentropiques, l'évolution se fait sans échange de chaleur (uniquement du travail), donc  $S_{cr} = \Delta S - S_{ech} = 0$ , et lors des isothermes, la seule source d'irréversibilité pourrait être des différences de température, nulles lors d'une isotherme.

Démonstration : le long d'une isotherme, on applique le premier principe  $\Delta U = Q + W = 0$  puisque  $U$  ne dépend que de  $T$ . Il y a une relation qui donne la variation d'énergie interne au cours d'une évolution infinitésimale (pas au programme, mais très utile) :  $dU = TdS - PdV$  donc pour une isotherme  $\Delta S = \frac{-W}{T}$ . On a alors  $S_{cr} = \Delta S - S_{ech} = \frac{-W-Q}{T} = 0$ .

On va donc atteindre le rendement maximal lors d'un cycle de Carnot.

La représentation du cycle dans le diagramme de Clapeyron est assez facile : lors des isothermes, on a doit avoir  $PV = nRT = cte$ , donc  $P \propto 1/V$ , et les isothermes sont des branches d'hyperbole. Lors des isentropiques, on applique la loi de Laplace et  $PV^\gamma = cte$  donc  $P \propto V^{-\gamma}$ . On aura alors des courbes qui ressemblent à des branches d'hyperboles, et puisque  $\gamma > 1$ , elles seront plus pentues que les isothermes.

Inconvénients du cycle de Carnot :

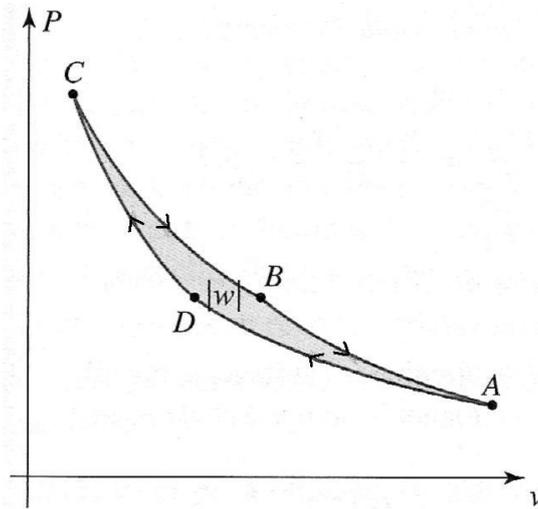


FIGURE 1 – Représentation d'un cycle de Carnot dans le diagramme de Clapeyron.

- Comme on peut voir sur le diagramme de Clapeyron, le travail fourni par le moteur (l'aire du cycle) est très faible, donc ce moteur ne va pas fournir une grande énergie mécanique à chaque cycle ;
- sur les isothermes, pour qu'il n'y ait pas d'irréversibilité, les transferts thermiques doivent être lents (pas de différences de température grande, sinon, irréversibilité), donc on ne va pas pouvoir faire beaucoup de cycles par unité de temps.

## 3.2 Machines frigorifiques

### 3.2.1 Etude théorique

Dans une machine frigorifique, le but est de transférer de la chaleur d'une source froide vers une source chaude (il n'y a pas besoin de machine dans l'autre sens, le transfert se fait naturellement en mettant les deux sources en contact). Par exemple, un frigidaire refroidit l'intérieur et dégage de la chaleur par un radiateur à l'arrière de l'appareil.

On veut donc  $Q_f > 0$  et  $Q_c < 0$ .

Le bilan d'entropie sur un cycle dit alors que  $\Delta S = S_{ech} + S_{cr} = 0$ , donc  $S_{ech} = -S_{cr} \leq 0$ .

On doit donc vérifier  $Q_f \leq -Q_c \frac{T_f}{T_c}$ , donc en valeur absolue  $|Q_f| \leq |Q_c|$ .

Le bilan d'énergie est alors  $\Delta U = W + Q_f + Q_c = 0$  donc  $W = -Q_f - Q_c > 0$ , donc on doit fournir du travail au fluide : c'est la raison pour laquelle il y a un moteur sur les frigidaires.

Calcul de l'efficacité : dans le cas d'une machine frigorifique, l'énergie payée par l'utilisateur est le travail fourni  $W$ , et la quantité utile est la chaleur transférée au fluide  $Q_f$ .

On a donc  $e = \frac{Q_f}{W} \geq \frac{T_f}{T_c - T_f}$ . Contrairement à un rendement, l'efficacité peut être plus grande que 1. Par exemple pour un frigidaire assurant une température de  $4^\circ\text{C}$  dans une pièce à  $20^\circ\text{C}$ , s'il fonctionne de manière réversible, le rendement maximal est  $e = \frac{T_f}{T_c - T_f} = \frac{277,15}{16} = 17$ .

En pratique, on n'obtient pas de telles efficacités, on est autour de 3 à 7 pour une machine thermique réceptrice.

### 3.2.2 Suivi du cycle

Dans le diagramme de Clapeyron, on distingue 4 étapes :

1. le fluide sous forme gazeuse est comprimé grâce au moteur ;
2. au contact de la source chaude, le fluide se liquéfie en dégageant de la chaleur, à pression constante ;
3. au contact de la source froide, le fluide sous forme liquide se détend (détente de Joule-Thomson, isenthalpique  $\Delta H = 0$ ) ;
4. le fluide se vaporise à basse pression et absorbe de la chaleur de la source froide.

Un autre diagramme utilisé pour représenter ce cycle est un diagramme pression enthalpie (massique)  $(P, h)$ , puisque deux évolutions sont isobares, et une isenthalpique.

On obtient alors un diagramme assez similaire au diagramme de Clapeyron, avec un cycle de forme trapézoïdale.

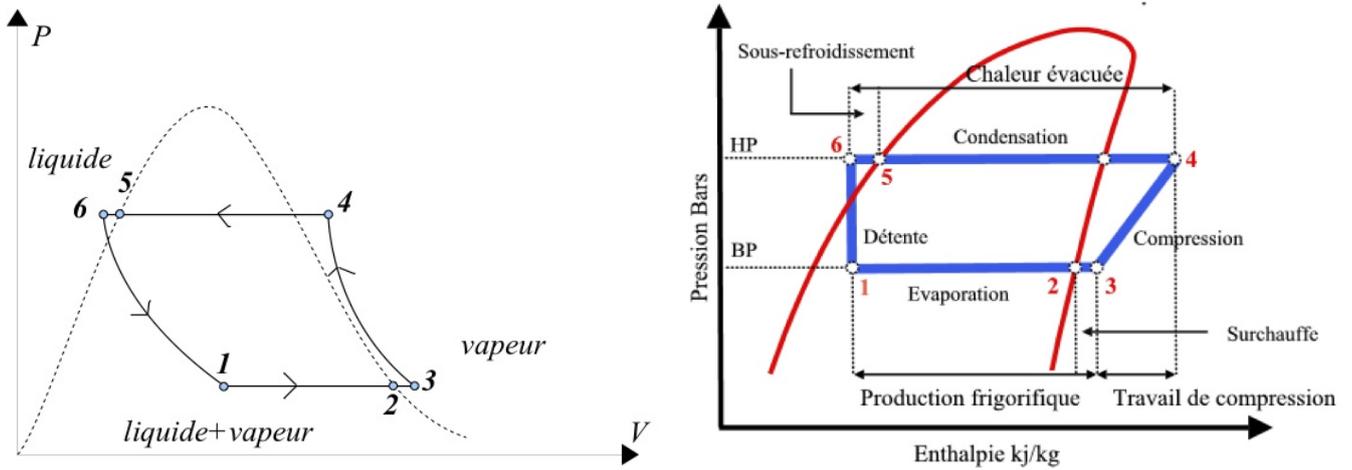


FIGURE 2 – Cycle du fluide d’une machine frigorifique dans le diagramme de Clapeyron et dans le diagramme des frigoristes.

L’avantage de ce diagramme est qu’il permet de mesurer l’efficacité directement, on qualifie d’ailleurs ce diagramme de **diagramme des frigoristes** ( $\log P, h$ ). On a en lecture directe au niveau des abscisses les valeurs de  $Q_f$  et  $W$  sur l’isobare basse pression et  $Q_c$  sur l’isobare haute pression.

### 3.3 Pompe à chaleur

Une pompe à chaleur fonctionne exactement de la même manière qu’un frigidaire en mode été (climatisation), donc on ne va pas refaire cette étude.

En hiver, la source chaude est la pièce à chauffer, et la source froide est le sol en profondeur, l’atmosphère ou bien encore l’eau d’un lac. On a donc pour le fluide  $Q_f > 0$  et  $Q_c < 0$ .

Ce que l’on a fait pour la machine frigorifique est toujours valide, on a donc  $W = -Q_f - Q_c \geq 0$ , il faut donc fournir du travail pour que la pompe à chaleur fonctionne.

Ce qui change est ce coup-ci l’efficacité de la pompe à chaleur : ce qu’on paye est toujours le travail  $W$  mais la grandeur utile est la chaleur reçue par la source chaude.

On a donc comme utilité  $e = \frac{Q_c}{W} \leq \frac{T_c}{T_c - T_f}$ . Ici, l’efficacité est toujours plus grande que 1, et ceci est dû au fait que l’on ne paye pas la chaleur  $Q_f$ .

En pratique, l’efficacité d’une pompe à chaleur est de l’ordre de 3 à 5 (alors qu’un radiateur électrique a une efficacité de 1 : toute l’énergie donnée à une résistance est transformée en chaleur par effet Joule).

Le suivi du cycle est le même que pour la machine frigorifique : la seule différence étant que le transfert d’énergie qui nous intéresse est  $Q_c$ .

## 4 Exemple de machine réelle : moteur à essence

### 4.1 Fonctionnement et cycle expérimental

Un moteur à essence est un moteur 4 temps suivant les 4 étapes suivantes :

1. Admission : le piston se baisse et le carburant et le comburant sont injectés dans la chambre ;
2. compression combustion : le piston remonte, augmentant la pression dans la chambre puis la bougie produit une étincelle, entraînant la combustion des gaz
3. détente : détente, le piston redescend ;
4. échappement : les gaz brûlés sont évacués quand le piston remonte.

A chaque cycle, le piston fait deux allers retours.

On obtient alors le cycle expérimental dans le diagramme  $(P, V)$ .

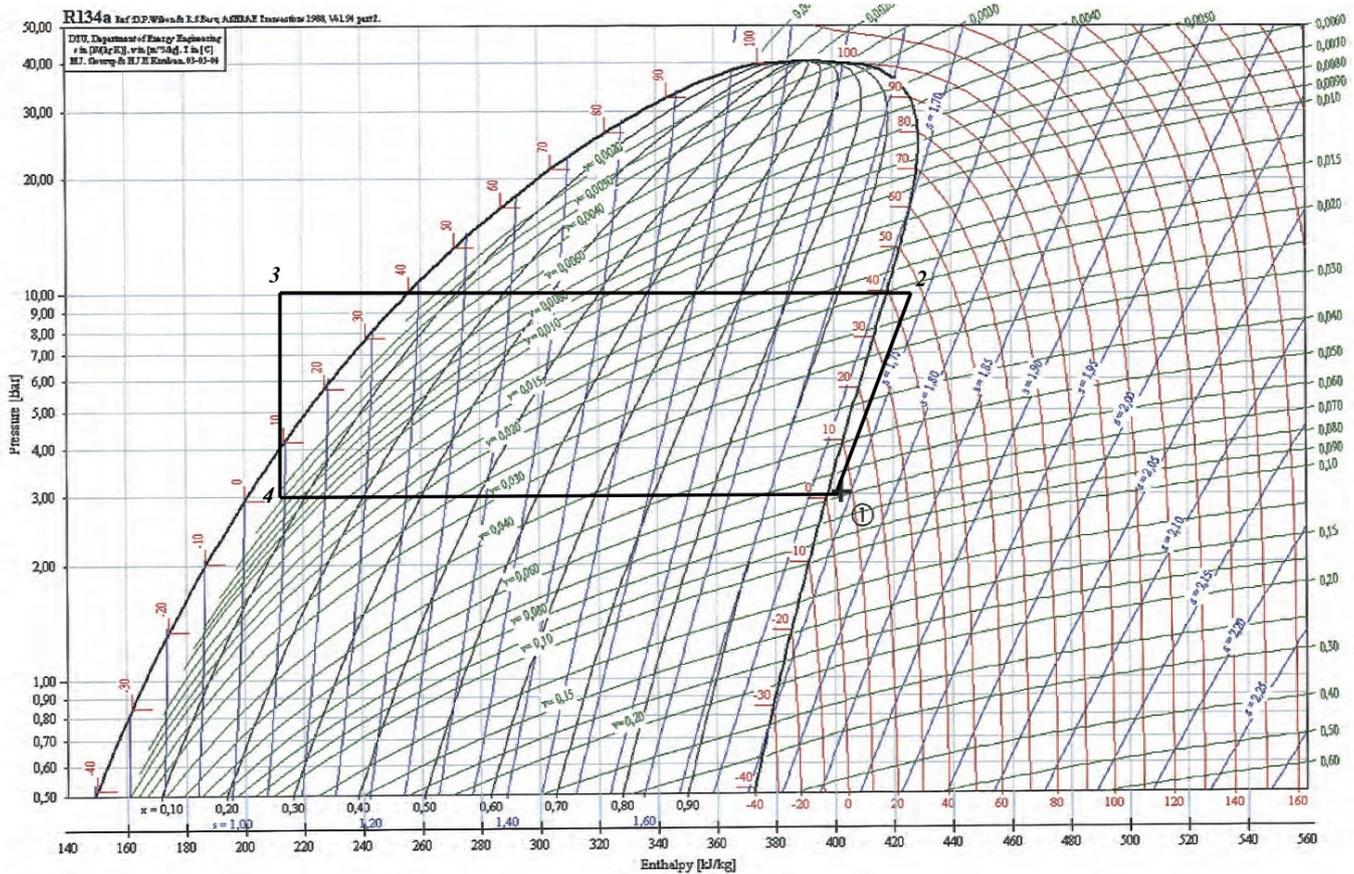


FIGURE 3 – Cycle du fluide d’une pompe à chaleur dans le diagramme des frigorigères.

## 4.2 Modèle théorique : cycle de Beau de Rochas

### 4.2.1 Modèle

Il apparait difficile d’étudier le cycle expérimental, on va donc essayer de s’en approcher par un modèle plus simple, le **cycle de Beau de Rochas**.

1. AB : l’admission est isobare à  $P = 1 \text{ bar}$ ,  $T \simeq 60^\circ\text{C}$  ;
2. BC : la compression est adiabatique réversible (donc isentropique) ;
3. CD : la combustion est une évolution isochore (la température monte jusqu’à  $1000^\circ\text{C}$  et la pression jusqu’à  $80 \text{ bar}$ ) ;
4. DE : la détente est adiabatique réversible ;
5. EB puis BA : l’échappement se fait en deux temps, une détente isochore (on ouvre la soupape) puis une évolution isobare (les gaz s’échappent effectivement).

Le cycle qui nous intéresse est seulement BCDE, l’admission et l’échappement correspondant à un "changement" du gaz, donc on considèrera qu’il n’y a ni travail, ni chaleur reçue pendant l’aller-retour BAB.

On va supposer de plus que le gaz est un gaz parfait de  $\gamma = 1,4$  (majoritairement de l’air).

### 4.2.2 Rendement

Le rendement est donné par l’énergie fournie  $-W$  (on étudie un moteur...) obtenue en brûlant de l’essence, donc l’énergie payante est la chaleur reçue lors de la combustion  $Q_c$ .

Il y a enfin aussi de la chaleur reçue lors de l’échappement  $Q_f$ .

Appliquons alors le bilan d’énergie interne :  $\Delta U = Q_f + Q_c + W = 0$ .

Le rendement est donc  $\eta = \frac{-W}{Q_c} = 1 + \frac{Q_f}{Q_c}$ .

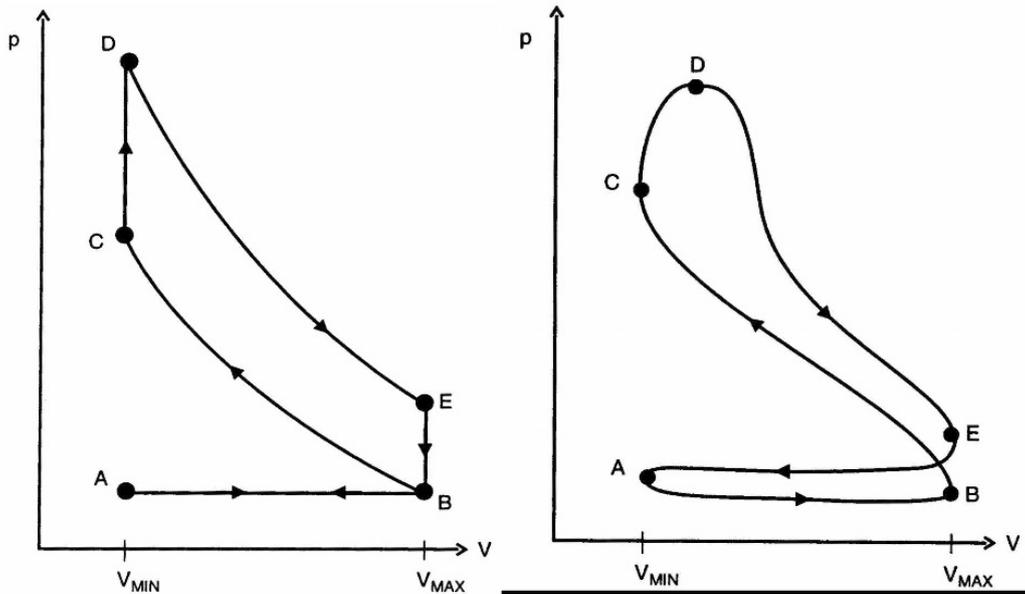


FIGURE 4 – Représentations dans le diagramme de Clapeyron du cycle théorique (Beau de Rochas) et du cycle réel d’un moteur à essence

On cherche ici à étudier un moteur réel, donc on n’est pas intéressé par la détermination d’un rendement maximal. On va donc chercher à exprimer  $Q_f$  et  $Q_c$ .

On exprime donc le premier principe lors des deux évolutions concernées, les évolutions isochores. On a alors  $\Delta U = Q + W = C_v \Delta T$ .

On a donc  $Q_c = C_v(T_D - T_C)$  et  $Q_f = C_v(T_B - T_E)$ .

On obtient donc pour le rendement  $r = 1 + \frac{T_B - T_E}{T_D - T_C}$ .

Expérimentalement, il est très dur de déterminer les températures atteintes, par contre, on peut facilement mesurer les volumes à chaque point, et une grandeur utile est alors le rapport de compression volumétrique  $a = \frac{V_B}{V_C}$ .

On veut relier températures et volumes, on va donc utiliser la loi de Laplace lors de l’évolution adiabatique réversible du gaz parfait, donc  $TV^{\gamma-1} = cte$ .

On a donc  $T_C V_C^{\gamma-1} = T_B V_B^{\gamma-1}$  donc  $T_C = T_B a^{\gamma-1}$  et de même  $T_D = T_E a^{\gamma-1}$

On trouve donc  $r = 1 - a^{1-\gamma}$ .

Le rendement augmente avec  $a$ . En pratique  $a \approx 9$ , donc le rendement du cycle de Beau de Rochas est de l’ordre de 60 %. En pratique, les écarts entre le cycle réel et celui de Beau de Rochas sont tels que le rendement est de l’ordre de 30 % : seulement un tiers de l’énergie dégagée lors de la combustion de l’essence est utilisée...