

Machines thermiques

« *Thermodynamics is a funny subject. The first time you go through it, you don't understand it at all. The second time you go through it, you think you understand it, except for one or two small points. The third time you go through it, you know you don't understand it, but by that time you are so used to it, it doesn't bother you anymore.* »

Arnold SOMMERFELD, \approx 1950

Sommaire

I Introduction	3
I/A Définition	3
I/B Fonctionnement général	3
I/C Machines monothermes	4
II Machines dithermes	5
II/A Diagramme de RAVEAU	5
II/B Moteur ditherme	6
II/C Machines frigorifiques et pompes à chaleur	7
III Applications	8
III/A Cogénération	8
III/B Cycle moteur de CARNOT	9
III/C Moteur à combustion : cycle de BEAU DE ROCHAS	10
III/D Autres machines	11

✂ Capacités exigibles

- ☐ Donner le sens des échanges énergétiques pour un moteur ou un récepteur thermique ditherme.
- ☐ Analyser un dispositif concret et le modéliser par une machine cyclique ditherme.
- ☐ Définir un rendement ou une efficacité et les relier aux énergies échangées au cours d'un cycle.
- ☐ Justifier et utiliser le théorème de Carnot.
- ☐ Citer quelques ordres de grandeur des rendements des machines thermiques réelles actuelles.
- ☐ Expliquer le principe de la cogénération.

✍ L'essentiel

📖 Définitions

- ☐ Machines thermiques et performance 3
- ☐ Machine monotherme 4
- ☐ Machine ditherme 5

⚙ Propriétés

- ☐ Fonction^t des machines thermiques 3
- ☐ Moteur monotherme 4
- ☐ Diagramme de RAVEAU 5
- ☐ $\eta_C^{\text{mot.}}$ 6
- ☐ $\eta_C^{\text{frig.}}$ 7
- ☐ η_C^{PAC} 8

☰ Démonstrations

- ☐ Fonction^t des machines thermiques 4
- ☐ Moteur monotherme 4
- ☐ Diagramme de RAVEAU 5
- ☐ $\eta_C^{\text{mot.}}$ 6
- ☐ $e_C^{\text{frig.}}$ 7
- ☐ e_C^{PAC} 8

💡 Interprétations

- ☐ Machine monotherme 4
- ☐ Moteurs et réfrigérateurs 6

📊 Ordres de grandeur

- ☐ Rendement d'un moteur 6
- ☐ Efficacité d'un réfrigérateur 7
- ☐ Efficacité d'une pompe à chaleur . 8

♥ Points importants

- ☐ Moteur ditherme 6
- ☐ Réfrigérateur 7
- ☐ Pompe à chaleur 8

⚠ Erreurs communes

- ☐ Échanges algébriques 4

I Introduction

I/A Définition

♥ Définition 5.1 : Machines thermiques et performance

Une machine thermique est un dispositif qui fait subir à un fluide un **cycle thermodynamique**, dans le but d'**extraire du travail** mécanique W ou un **transfert thermique** Q .

Coeff. performance

$$\text{COP} = \left| \frac{\text{production}}{\text{coût}} \right|$$

Machine motrice

Elle fournit un travail :

- ◇ **Production** : $W < 0$
- ◇ **Coût** : $Q > 0$
- ◇ **Rendement**¹ : $\eta = \left| \frac{W}{Q} \right|$

Machine réceptrice

Elle reçoit un travail :

- ◇ **Coût** : $W > 0$
- ◇ **Production** : $Q \leq 0$
- ◇ **Efficacité**² : $e = \left| \frac{Q}{W} \right|$

Exemple 5.1 : Machines thermiques

- ◇ Une locomotive à vapeur convertit la chaleur extraite de la cheminée en mouvement des roues : c'est un moteur.
- ◇ Un radiateur électrique convertit un travail électrique (effet JOULE) en chaleur : c'est un récepteur.
- ◇ Un réfrigérateur récupère un travail électrique et s'en sert pour capter l'énergie thermique des aliments : c'est un récepteur.

I/B Fonctionnement général

♥ Propriété 5.1 : Fonction¹ des machines thermiques

Pour une machine en contact avec n sources de chaleurs, son fonctionnement est régi par les **deux principes** de la thermodynamique :

- ◇ **Premier principe** :

$$\Delta U_{\text{cycle}} = 0 \Leftrightarrow W = - \sum_{i=1}^n Q_i \quad (5.1)$$

- ◇ **Second principe (inégalité de CLAUSIUS)** :

$$S_{\text{ech}} \leq 0 \Leftrightarrow \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{T_i} \leq 0 \quad (5.2)$$

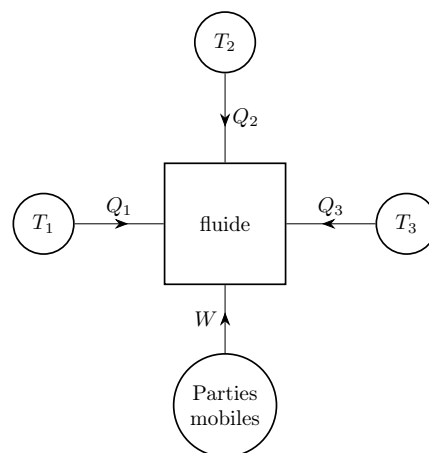


FIGURE 5.1 – Représentation des échanges

1. On parle de **rendement** pour un **moteur**, car il décrit une conversion d'énergie. On a donc $\eta < 1$.

2. On parle d'**efficacité** pour un **récepteur** puisqu'elle quantifie un transfert thermique, pas une conversion. On peut donc avoir $e > 1$.

♥ Attention 5.1 : Échanges algébriques

Pour rappel, les énergies échangées sont **algébriques**, et dans le premier principe W et Q sont des énergies **reçues** : les flèches sont donc dirigées **vers le fluide**, même si les échanges sont négatifs. On indiquera explicitement le signe des échanges pour lever la confusion selon le type de machine.

♥ Démonstration 5.1 : Fonction^t des machines thermiques

Premier principe

$$\begin{aligned}\Delta U_{\text{cycle}} &= 0 \\ \Leftrightarrow W + \sum_i Q_i &= 0 \\ \Leftrightarrow \sum_i Q_i &= -W\end{aligned}$$

Inégalité de CLAUSIUS

$$\begin{aligned}\Delta S_{\text{cycle}} &= 0 \\ \Leftrightarrow \sum_i S_{\text{ech},i} + \underbrace{S_{\text{cr}}}_{\geq 0} &= 0 \\ \Leftrightarrow \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{T_i} &\leq 0\end{aligned}$$

I/C Machines monothermes

♥ Définition 5.2 : Machine monotherme

Une machine thermique monotherme est composée d'un fluide en contact avec un **unique thermostat**.

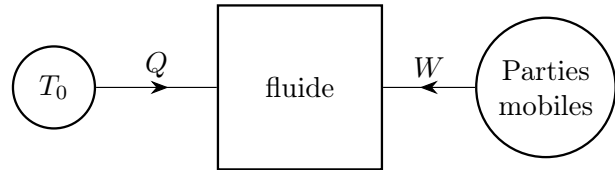


FIGURE 5.2 – Machine monotherme.

♥ Propriété 5.2 : Moteur monotherme

Il est impossible de réaliser un moteur avec une unique source de chaleur.

♥ Démonstration 5.2 : Moteur monotherme

On applique les règles de fonctionnement (Propriété 5.1) :

1^{er} ppe $\Delta U_{\text{cycle}} = 0 \Leftrightarrow W = -Q$

2^d ppe $S_{\text{ech}} \leq 0 \Leftrightarrow \frac{Q}{T_0} \leq 0$

D'où $\Rightarrow Q \leq 0 \Leftrightarrow W \geq 0$

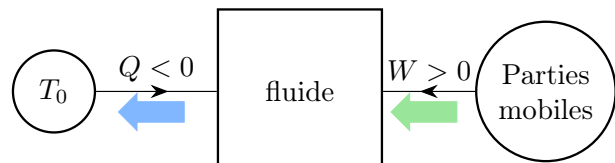


FIGURE 5.3 – Sens des transferts.

♥ Interprétation 5.1 : Machine monotherme

Une machine monotherme est donc forcément réceptrice, et fournit un transfert thermique vers l'extérieur, c'est uniquement le cas pour un chauffage... Si on souhaite obtenir un autre type de machine thermique on a forcément besoin d'au moins deux thermostats.

II Machines dithermes

II/A Diagramme de RAVEAU

♥ Définition 5.3 : Machine ditherme

Une machine ditherme possède 2 sources de chaleur :

◇ **Thermostat froid** : T_F et Q_F ;

◇ **Thermostat chaud** : T_C et Q_C .

♥ Propriété 5.3 : Diagramme de RAVEAU

Le diagramme de RAVEAU est une visualisation permettant de voir les machines thermiques possibles :

① **Vert** : $Q_C > 0, Q_F < 0$ et $W < 0$

C'est un moteur.

② **Rouge** : $Q_C > 0, Q_F < 0$ et $W > 0$

C'est une machine inutile, elle accélère le transfert thermique du chaud vers le froid.

③ **Jaune** : $Q_C < 0, Q_F < 0$ et $W > 0$

C'est une machine inutile, elle réchauffe les deux sources.

④ **Bleu** : $Q_C < 0, Q_F > 0$ et $W > 0$

C'est le domaine des réfrigérateurs et pompes à chaleur. L'inversion du sens spontané du transfert thermique coûte un travail.

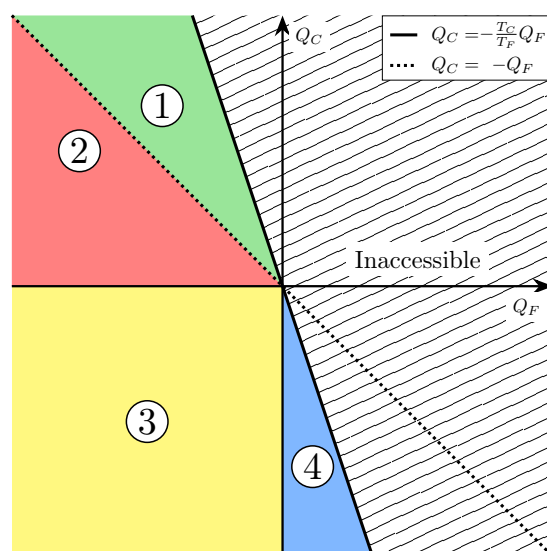


FIGURE 5.4 – Diagramme de RAVEAU

♥ Démonstration 5.3 : Diagramme de RAVEAU

On applique le principe de fonctionnement :

1^{er} ppe. $W = -Q_C - Q_F$

2^d ppe. $\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0 \Leftrightarrow Q_C \leq -\frac{T_C}{T_F} Q_F$

Le second principe empêche l'existence des machines ne respectant pas cette inégalité. De plus, pour un moteur

$$W < 0 \Leftrightarrow Q_F + Q_C > 0 \Leftrightarrow Q_C > -Q_F$$

Les moteurs sont au-dessus de cette droite, les autres sont récepteurs.

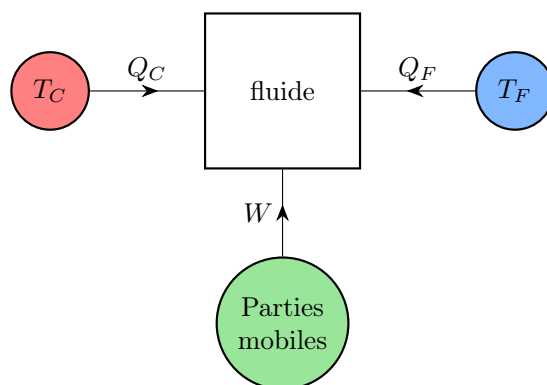


FIGURE 5.5 – Schéma de fonctionnement



♥ Interprétation 5.2 : Moteurs et réfrigérateurs

On peut représenter plus explicitement le fonctionnement des moteurs et réfrigérateurs comme suit :

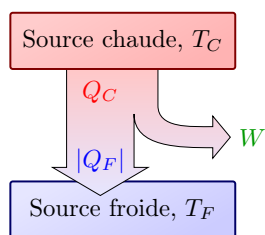


FIGURE 5.6 – Flux énergétique d'un moteur.

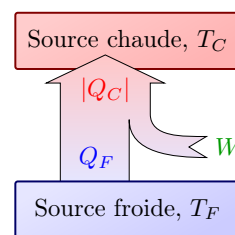


FIGURE 5.7 – Flux énergétique d'un frigo³.

II/B Moteur ditherme

♥ Important 5.1 : Moteur ditherme

Domaine ① du diagramme de RAVEAU :

$$Q_C > 0, Q_F < 0 \text{ et } W < 0$$

- ◇ **But** : créer un travail
- ◇ **Source chaude** : cheminée
- ◇ **Source froide** : atmosphère

Production	Coût	Perte
$-W$	Q_C	Q_F

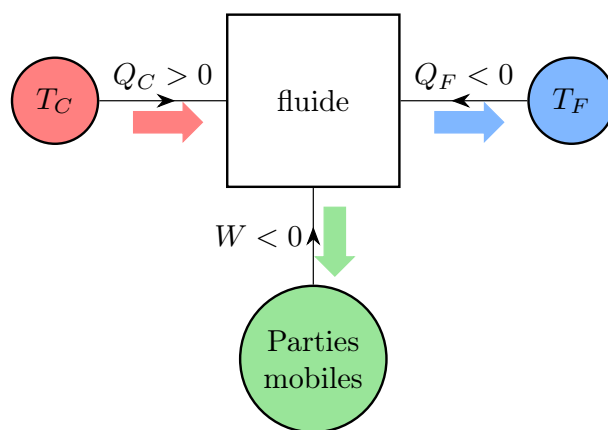


FIGURE 5.8 – Schéma moteur ditherme.

♥ Propriété 5.4 : Th. de CARNOT^{mot.}

Il existe un cycle thermique optimal donnant un coefficient de performance maximal, appelé **rendement de Carnot** :

$$\eta \leq \eta_C = 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

Il correspond au rendement idéal d'une machine réversible.

♥ Démonstration 5.4 : $\eta_C^{\text{mot.}}$

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{-W}{Q_C} \stackrel{(5.1)}{=} \frac{Q_C + Q_F}{Q_C} \\ \Leftrightarrow \eta &= 1 + \frac{Q_F}{Q_C} \quad \left(\begin{array}{l} \frac{Q_F}{T_F} \leq -\frac{Q_C}{T_C} \text{ (5.2)} \\ \text{Or, } Q_C > 0 \end{array} \right) \\ \Leftrightarrow \eta &\leq 1 - \frac{T_F}{T_C} = \eta_C \end{aligned}$$

♥ Ordre de grandeur 5.1 : Rendement d'un moteur

Avec $T_C = 700 \text{ K}$ et $T_F = 300 \text{ K}$:

$$\underline{\eta_C = 0,6} \quad \text{et} \quad \underline{\eta_{\text{réel}} \approx 0,4}$$

En pratique, les rendements observés sont de 35 ; 40 %. En effet, le rendement de CARNOT est le meilleur rendement énergétique possible, mais correspond à des transformations réversibles donc assez lentes : la puissance fournie est faible et il faut trouver un compromis.

3. C'est aussi le flux d'une pompe à chaleur, en inversant qui représente la source froide (aliments du frigo ou air extérieur) et qui représente la source chaude (cuisine du frigo ou air intérieur).

II/C Machines frigorifiques et pompes à chaleur

♥ Important 5.2 : Réfrigérateur

Domaine ④ du diagramme de RAVEAU :

$$Q_C < 0, Q_F > 0 \text{ et } W > 0$$

◇ **But** : Refroidir une source froide

◇ **Source chaude** : atmosphère

◇ **Source froide** : aliments

Production	Coût	Perte
Q_F	W	Q_C

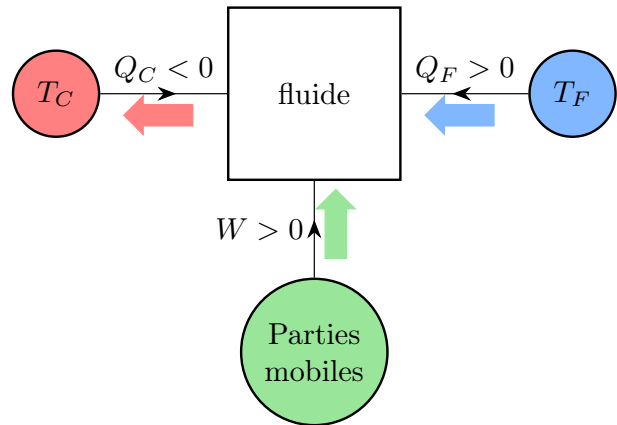


FIGURE 5.9 – Schéma réfrigérateur.

♥ Propriété 5.5 : Th. de CARNOT^{frig.}

Il existe un cycle thermique optimal donnant un coefficient de performance maximal, appelé **efficacité de Carnot** :

$$e^{\text{frig.}} \leq e_C^{\text{frig.}} = \frac{T_F}{T_C - T_F}$$

Elle correspond à l'efficacité idéale d'une machine réversible.

♥ Démonstration 5.5 : $e_C^{\text{frig.}}$

$$\begin{aligned} e &= \frac{Q_F}{W} \stackrel{(5.1)}{=} -\frac{Q_F}{Q_C + Q_F} \\ \Leftrightarrow e &= -\frac{1}{1 + \frac{Q_C}{Q_F}} \stackrel{(5.2)}{\left. \begin{array}{l} \frac{Q_C}{T_C} \leq -\frac{Q_F}{T_F} \\ \text{Or, } Q_F > 0 \\ 1 + \frac{Q_C}{Q_F} \leq 1 - \frac{T_C}{T_F} \end{array} \right\}} \\ \Leftrightarrow e &\leq -\frac{1}{1 - \frac{T_C}{T_F}} \\ \Leftrightarrow e &\leq \frac{T_F}{T_C - T_F} = e_C \end{aligned}$$

♥ Ordre de grandeur 5.2 : Efficacité d'un réfrigérateur

Avec $T_C = 298 \text{ K}$ et $T_F = 278 \text{ K}$:

$$\underline{e_C^{\text{frig.}} = 13} \quad \text{et} \quad \underline{e_{\text{réel}}^{\text{frig.}} \approx 3}$$

Interprétation 5.3 : Différence rendement/efficacité

◇ Les coefficients de performance ont un sens plus **industriel** que physique. Ceci explique qu'on puisse avoir notamment des efficacités supérieures à 1. **Cela ne veut pas dire que l'on a créé de l'énergie.**

C'est plutôt que, dans l'énergie coûteuse, une partie n'est pas directement fournie par l'utilisateur, mais implicitement donnée par l'environnement.

◇ La **chaleur** est la **forme finale** de l'énergie : tout mouvement est voué à s'arrêter (à cause des frottements), en libérant l'énergie sous forme de chaleur.

Ainsi il est toujours beaucoup **plus simple d'extraire un transfert thermique d'un travail** plutôt que l'inverse. Ce qui explique que les **efficacités** sont toujours plus grandes que les **rendements**.

♥ Important 5.3 : Pompe à chaleur

Domaine ④ du diagramme de RAVEAU :

$$Q_C < 0, Q_F > 0 \text{ et } W > 0$$

- ◇ **But** : Réchauffer une source chaude
- ◇ **Source chaude** : intérieur
- ◇ **Source froide** : atmosphère

Production	Coût	Perte
$-Q_C$	W	Q_F

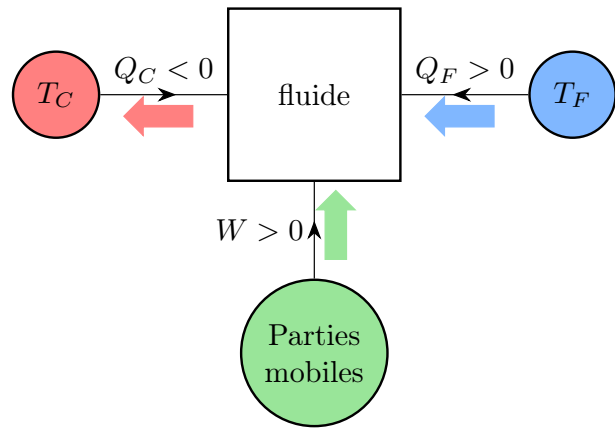


FIGURE 5.10 – Schéma pompe à chaleur.

♥ Propriété 5.6 : Th. de CARNOT^{PAC}

Il existe un cycle thermique optimal donnant un coefficient de performance maximal, appelé **efficacité de Carnot** :

$$e^{\text{PAC}} \leq e_C^{\text{PAC}} = \frac{T_C}{T_C - T_F}$$

Elle correspond à l'efficacité idéale d'une machine réversible.

♥ Démonstration 5.6 : e_C^{PAC}

$$\begin{aligned} e &= \frac{-Q_C}{W} \stackrel{(5.1)}{=} \frac{Q_C}{Q_C + Q_F} \\ \Leftrightarrow e &= \frac{1}{1 + \frac{Q_F}{Q_C}} \stackrel{(5.2)}{\left. \begin{array}{l} \frac{Q_F}{T_F} \leq -\frac{Q_C}{T_C} \\ \text{Or, } Q_C < 0 \end{array} \right\}} \frac{Q_F}{Q_C} \leq -\frac{T_C}{T_F} \\ \Leftrightarrow e &\leq \frac{1}{1 - \frac{T_C}{T_F}} \\ \Leftrightarrow e &\leq \frac{T_C}{T_C - T_F} = e_C \end{aligned}$$

♥ Ordre de grandeur 5.3 : Efficacité d'une pompe à chaleur

Avec $T_C = 293 \text{ K}$ et $T_F = 278 \text{ K}$:

$$e_C^{\text{PAC}} = 20 \quad \text{et} \quad e_{\text{réel}}^{\text{PAC}} \approx 3$$

L'intérêt d'une pompe à chaleur est qu'une partie de l'énergie servant à chauffer est prélevée dans l'environnement, et ne coûte donc rien. Son efficacité dépasse donc 1.

Elle est également plus élevée que l'écart $T_C - T_F$ est petit, donc que l'on chauffe peu ou qu'il fasse doux dehors : il vaut mieux garder une pompe allumée que de chauffer par intermittence. Comme vu dans le TDT3, **ça n'est pas le cas d'un radiateur** (machine monotherme).

III Applications

III/A Cogénération

Définition 5.4 : Cogénération

La cogénération est un principe visant à valoriser toute l'énergie grâce à une production simultanée de plusieurs formes de puissance.

Exemple 5.2 : Cogénération

Les centrales électrique créent également beaucoup de chaleur. Il peut être intelligent de la récupérer afin de chauffer directement les habitations environnantes.

III/B Cycle moteur de CARNOT

♥ Application 5.1 : Cycle moteur de CARNOT

On appelle cycle de CARNOT un cycle ditherme réversible. On considère une quantité n de gaz parfait, et on appelle $\alpha = \frac{V_B}{V_A}$ subissant les transformations suivantes :

- ◇ **AB** : détente isoT. quasi-statique à T_{ch} ; ◇ **BC** : détente adia. réversible de T_{ch} à T_{fr} ;
- ◇ **CD** : compre° isoT. quasi-statique à T_{fr} ; ◇ **DA** : compre° adia. réversible de T_{fr} à T_{ch} .

- [1] Tracer ce cycle en diagramme de WATT, en indiquant sur quelles transformations il y a transfert thermique. En déduire le signe du travail total. Représenter schématiquement la machine correspondante, et exprimer son coefficient de performance.
- [2] Exprimer ΔU_{AB} , W_{AB} et Q_{AB} en fonction de n , R , T_{ch} et α .
- [3] Exprimer ΔU_{BC} , W_{BC} et Q_{BC} . Exprimer $\frac{V_C}{V_B}$ en fonction de T_{ch} , T_{fr} et γ .
- [4] Exprimer ΔU_{CD} , W_{CD} et Q_{CD} en fonction de n , R , T_{fr} , V_C et V_D .
- [5] Exprimer ΔU_{DA} , W_{DA} et Q_{DA} . Exprimer $\frac{V_A}{V_D}$ en fonction de T_{ch} , T_{fr} et γ . En déduire que

$$\alpha = \frac{V_C}{V_D}$$
- [6] Par application du premier principe, déterminer alors le rendement du cycle. Commenter.
- [7] Déterminer l'entropie créée pour chaque transformation. Conclure.

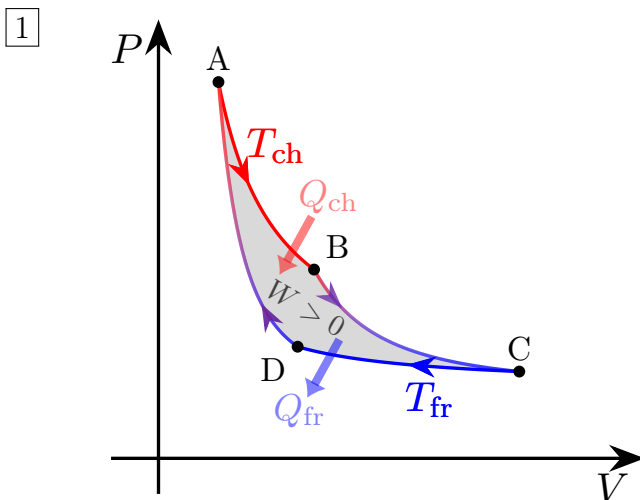


FIGURE 5.11 – Cycle de CARNOT.

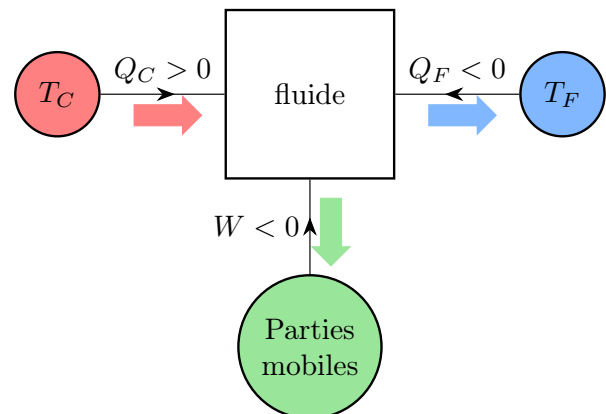


FIGURE 5.12 – Moteur ditherme.

On cherche

$$\eta = \frac{-W}{Q_C}$$

- [2] IsoT $\Rightarrow \Delta T_{AB} = 0 \Leftrightarrow \Delta U_{AB} = 0 \Rightarrow W_{AB} = -Q_{AB} = -Q_{\text{ch}}$
 QS $\Rightarrow P = P_{\text{ext}} = \frac{nRT_{\text{ch}}}{V} \Rightarrow W_{AB} = -nRT_{\text{ch}} \ln \alpha = -Q_{\text{ch}}$
- [3] Adia $\Rightarrow Q_{BC} = 0 \Rightarrow \Delta U_{BC} = W_{BC} = C_V(T_{\text{fr}} - T_{\text{ch}})$
 Rév. $\Rightarrow PV^\gamma = \text{cte} \Leftrightarrow TV^{\gamma-1} = \text{cte} \Rightarrow \frac{V_C}{V_B} = \left(\frac{T_{\text{ch}}}{T_{\text{fr}}}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}}$

- 4 IsoT $\Rightarrow \Delta T_{CD} = 0 \Leftrightarrow \Delta U_{CD} = 0 \Rightarrow W_{CD} = -Q_{CD} = -Q_{fr}$
- QS $\Rightarrow P = P_{ext} = \frac{nRT_{fr}}{V} \Rightarrow W_{CD} = -nRT_{fr} \ln \frac{V_D}{V_C} = -Q_{fr}$
- 5 Adia $\Rightarrow Q_{DA} = 0 \Rightarrow \Delta U_{DA} = W_{DA} = C_V(T_{ch} - T_{fr})$
- Rév. $\Rightarrow \frac{V_A}{V_D} = \left(\frac{T_{fr}}{T_{ch}}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \Leftrightarrow \frac{V_D}{V_A} = \left(\frac{T_{ch}}{T_{fr}}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} = \frac{V_C}{V_B} \Leftrightarrow \frac{V_B}{V_A} = \alpha = \frac{V_C}{V_D}$
- 6 1^{er} ppe. $\Delta U_{cycle} = 0 \Leftrightarrow W = -Q_{ch} - Q_{fr}$
- Soit $W = nR(T_{fr} - T_{ch}) \ln \alpha$ et $Q_{ch} = nRT_{ch} \ln \alpha$
- Rendement $\eta = \frac{-W}{Q_C} \Leftrightarrow \eta = \frac{T_{ch} - T_{fr}}{T_{ch}} \Leftrightarrow \eta_C = 1 - \frac{T_{fr}}{T_{ch}}$
- 7 AB : $\Delta S_{AB} = nR \ln \frac{V_B}{V_A}$ et $S_{ech,AB} = \frac{Q_{ch}}{T_{ch}} = nR \ln \frac{V_B}{V_A} \Leftrightarrow S_{cr,AB} = 0$
- BC : adia $\Rightarrow Q_{BC} = 0 \Rightarrow S_{ech,BC} = 0$ et rév. $\Rightarrow S_{cr,BC} = 0$ (BC isentropique)
- CD : $\Delta S_{CD} = nR \ln \frac{V_D}{V_C}$ et $S_{ech,CD} = \frac{Q_{fr}}{T_{fr}} = nR \ln \frac{V_D}{V_C} \Leftrightarrow S_{cr,CD} = 0$
- DA : adia $\Rightarrow Q_{DA} = 0 \Rightarrow S_{ech,DA} = 0$ et rév. $\Rightarrow S_{cr,DA} = 0$ (DA isentropique)

Conclusion : le rendement de CARNOT correspond bien à une machine réversible, et est par conséquent le plus grand rendement possible.

III/C Moteur à combustion : cycle de BEAU DE ROCHAS

Dans un moteur à explosion, un mélange air-carburant est enflammé et explose. L'énergie libérée par la transformation chimique de combustion est récupérée, et « convertie » sous forme de travail. Le cycle de **Beau de Rochas**⁴ est l'un des cycles possibles d'un moteur à explosion. On peut décomposer le cycle d'un moteur à explosion en quatre phases successives, appelées « temps »⁵, par l'étude d'un cylindre :

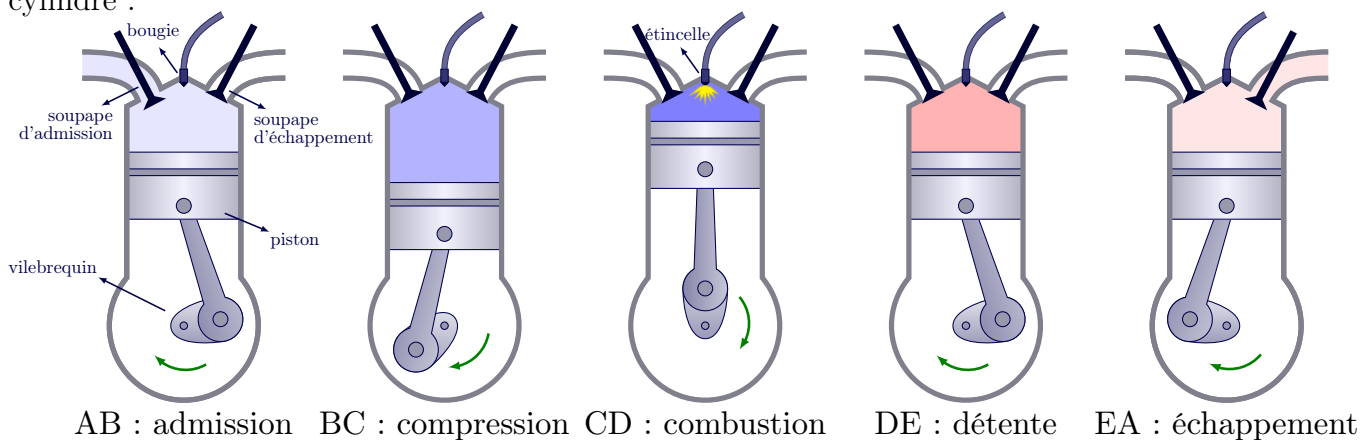


FIGURE 5.13 – Cycle de transformations d'un cylindre d'un moteur à explosion.

4. Il a été proposé théoriquement en 1862 par Alphonse BEAU DE ROCHAS. Sa réalisation pratique date de 1876 par Nikolaus OTTO, en Allemagne : on parle aussi du cycle d'OTTO. En France, il a été réalisé la même année par Étienne LENOIR, qui vivait à Saint-Maur-des-Fossés : avec son véhicule, il va de Joinville-le-Pont à Paris (9 km) en trois heures.

5. D'où le nom « moteur 4 temps ».

◇ Temps 1 : admission AB

Le piston part de son point le plus élevé (entre E et A), de volume minimal, et redescend : la soupape d'admission s'ouvre et permet le passage du mélange gazeux air-carburant.

Modèle : AB isobare et isotherme (mais système ouvert).

◇ Temps 2 : compression BC

À son point le plus bas, à volume maximal, le piston remonte et la soupape d'admission se ferme. Le gaz est comprimé dans la chambre jusqu'à son volume minimal.

Modèle : BC adiabatique et réversible, donc isentropique.

◇ Temps 3 : explosion et détente CDE.

Au volume minimal, une bougie crée une étincelle qui provoque l'explosion, c'est-à-dire la combustion très rapide des gaz. La pression augmente fortement. Le gaz ainsi chauffé repousse violemment le piston vers le bas : c'est le **temps moteur**, où du travail est effectivement reçu par le piston. Il redescend jusqu'à son volume maximal.

Modèle : explosion CD rapide, donc isochore, et détente DE isentropique.

◇ Temps 4 : échappement EA.

Au point E, la soupape d'échappement s'ouvre sur l'atmosphère et le piston remonte vers le point A en expulsant les gaz brûlés. La soupape d'échappement se ferme alors, celle d'admission s'ouvre, on revient au premier temps.

Modèle : EA isobare et isotherme, mais système ouvert.

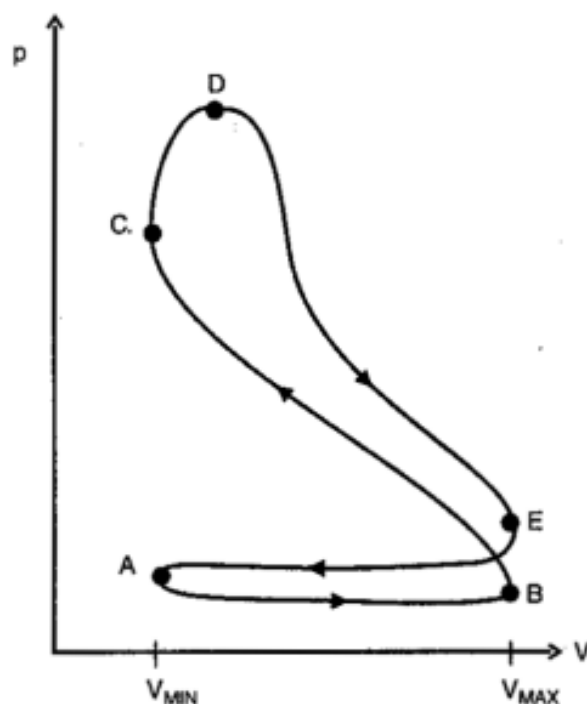


FIGURE 5.14 – Cycle réel.

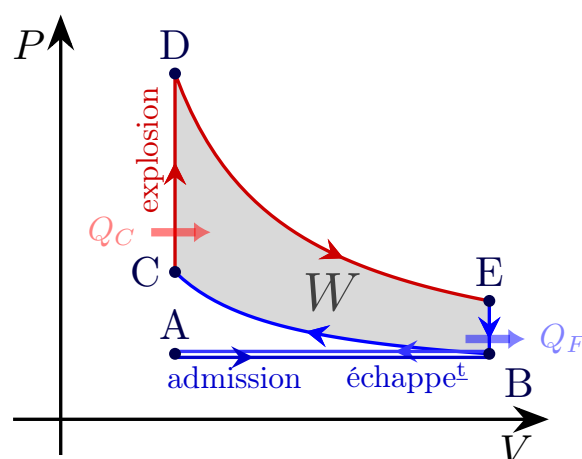


FIGURE 5.15 – Cycle idéal.

III/D Autres machines

- ◇ Moteur diesel : compression adiabatique, chauffage isobare, détente adiabatique, refroidissement isochore ;
- ◇ Moteur STIRLING (voir TD) : deux isothermes, deux isochores ;
- ◇ La turbine à gaz, modélisée par le cycle de JOULE-BRAYTON : deux adiabatiques, deux isobares.

Le réfrigérateur et la pompe à chaleur font intervenir des changements d'états et des systèmes ouverts : on y reviendra au prochain chapitre.