

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	9
III/A Cogénération	9
III/B Cycle moteur de CARNOT	9
III/C Moteur à combustion : cycle de BEAU DE ROCHAS	10
III/D Autres machines	12

✂ 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. | ☐ Citer quelques ordres de grandeur des rendements des machines thermiques réelles actuelles. |
| ☐ Justifier et utiliser le théorème de CARNOT. | ☐ Expliquer le principe de la cogénération. |

✓ L'essentiel

📖 Définitions

- ☐ T5.1 : Machines thermiques et performance 3
- ☐ T5.2 : Machine monotherme 4
- ☐ T5.3 : Machine ditherme 5
- ☐ T5.4 : Cogénération 9

⚙️ Propriétés

- ☐ T5.1 : Fonction^t des machines thermiques 3
- ☐ T5.2 : Machine monotherme 4
- ☐ T5.3 : Diagramme de RAVEAU 5

📋 Démonstrations

- ☐ T5.1 : Fonction^t des machines thermiques 4
- ☐ T5.2 : Machine monotherme 4
- ☐ T5.3 : Diagramme de RAVEAU 5

⚡ Théorèmes

- ☐ T5.1 : de CARNOT moteur 6
- ☐ T5.2 : de CARNOT réfrigérateur 7
- ☐ T5.3 : de CARNOT pompe à chaleur 8

📋 Preuves

- ☐ T5.1 : Rendement de CARNOT moteur 6
- ☐ T5.2 : Efficacité de CARNOT réfrigérateur 7
- ☐ T5.3 : Efficacité de CARNOT PAC 8

📊 Ordres de grandeur

- ☐ T5.1 : Rendement d'un moteur 6
- ☐ T5.2 : Efficacité d'un réfrigérateur 7
- ☐ T5.3 : Efficacité d'une pompe à chaleur 8

💡 Interprétations

- ☐ T5.1 : Machine monotherme 4
- ☐ T5.2 : Moteurs et réfrigérateurs 6
- ☐ T5.3 : Différence rendement/efficacité 7

🔧 Applications

- ☐ T5.1 : Cycle moteur de CARNOT 9

♥️ Points importants

- ☐ T5.1 : Moteur ditherme 6
- ☐ T5.2 : Réfrigérateur 7
- ☐ T5.3 : Pompe à chaleur 8

⚠️ Erreurs communes

- ☐ T5.1 : Échanges algébriques 4
 - ☐ T5.2 : Cycle et rendement de CARNOT 10
-

I Introduction

I/A Définition

♥ Définition T5.1 : 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 $\mathcal{W}$ ou un **transfert thermique** $\mathcal{Q}$.

Coeff. performance

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

Machine motrice

Elle fournit un travail :

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

Machine réceptrice

Elle reçoit un travail :

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

Exemple T5.1 : 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 T5.1 : Fonction^t 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** (bilan d'énergie) :

$$\Delta \mathcal{U}_{\text{cycle}} = 0 \Leftrightarrow \boxed{\mathcal{W} = - \sum_{i=1}^n \mathcal{Q}_i} \quad (\text{T5.1})$$

- ◇ **Second principe** (bilan d'entropie³) :

$$\mathcal{S}_{\text{ech}} \leq 0 \Leftrightarrow \boxed{\sum_{i=1}^n \frac{\mathcal{Q}_i}{T_i} \leq 0} \quad (\text{T5.2})$$

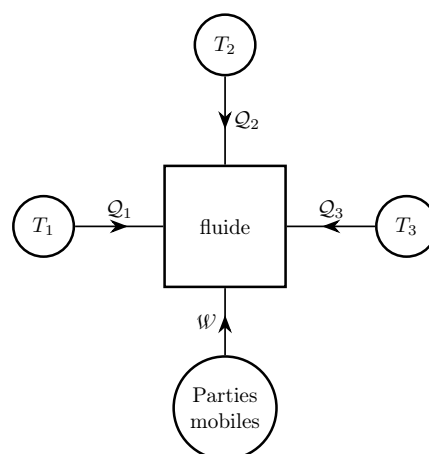


FIGURE T5.1 – Représentation des échanges

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 T5.1 : 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 T5.1 : Fonction^t des machines thermiques

Bilan d'énergie (1^{er} ppe.)

$$\Delta \mathcal{U}_{\text{cycle}} = 0$$

$$\Leftrightarrow \mathcal{W} + \sum_i Q_i = 0$$

$$\Leftrightarrow \boxed{\mathcal{W} = - \sum_i Q_i} \quad \blacksquare$$

Bilan d'entropie (2^d ppe.)

$$\Delta \mathcal{S}_{\text{cycle}} = 0$$

$$\Leftrightarrow \sum_i \mathcal{S}_{\text{ech},i} + \underbrace{\mathcal{S}_{\text{cr}}}_{\geq 0} = 0$$

$$\Leftrightarrow \boxed{\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{T_i} \leq 0} \quad \blacksquare$$

I/C Machines monothermes

Définition T5.2 : Machine monotherme

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

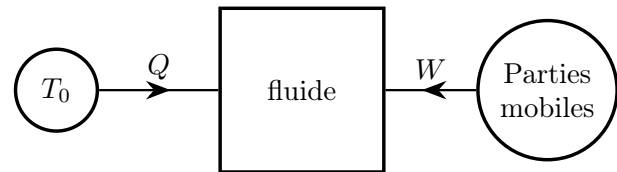


FIGURE T5.2 – Machine monotherme.

♥ Propriété T5.2 : Machine monotherme

Une machine monotherme est forcément réceptrice ; il est impossible de réaliser un moteur avec une unique source de chaleur.

♥ Démonstration T5.2 : Machine monotherme

Règles de fonctionnement, propriété T5.1 :

1^{er} ppe $\Delta \mathcal{U}_{\text{cycle}} = 0 \Leftrightarrow \boxed{\mathcal{W} = -Q}$

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

D'où $\Rightarrow Q \leq 0 \Leftrightarrow \boxed{\mathcal{W} \geq 0}$

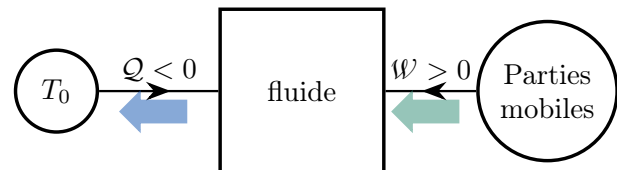


FIGURE T5.3 – Sens des transferts.

Interprétation T5.1 : 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.

3. On appelle aussi cette relation spécifique l'inégalité de CLAUSIUS.

II Machines dithermes

II/A Diagramme de RAVEAU

Définition T5.3 : Machine ditherme

Une machine ditherme possède 2 sources de chaleur :

◇ **Thermostat froid** : T_F et Q_F ;

◇ **Thermostat chaud** : T_C et Q_C .

♥ Démonstration T5.3 : Diagramme de RAVEAU

On applique le principe de fonctionnement :

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

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

$$\mathcal{W} < 0 \Leftrightarrow Q_C + Q_F > 0 \Leftrightarrow Q_C > -Q_F$$

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

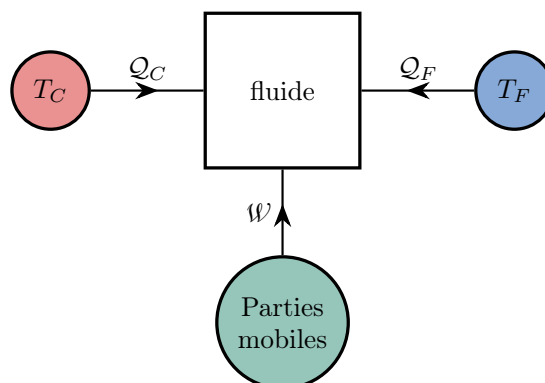


FIGURE T5.4 – Schéma de fonctionnement

Propriété T5.3 : Diagramme de RAVEAU

Le diagramme de RAVEAU est une visualisation des machines thermiques possibles :

① **Vert** : $Q_C > 0, Q_F < 0$ et $\mathcal{W} < 0$

C'est un **moteur**.

② **Rouge** : $Q_C > 0, Q_F < 0$ et $\mathcal{W} > 0$

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

③ **Jaune** : $Q_C < 0, Q_F < 0$ et $\mathcal{W} > 0$

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

④ **Bleu** : $Q_C < 0, Q_F > 0$ et $\mathcal{W} > 0$

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

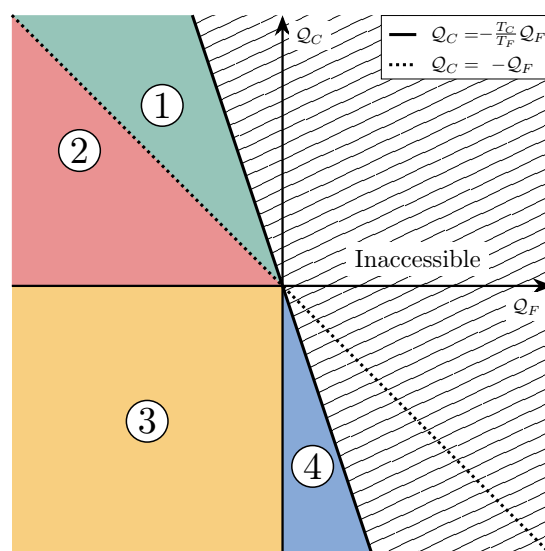


FIGURE T5.5 – Diagramme de RAVEAU



Interprétation T5.2 : Moteurs et réfrigérateurs

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

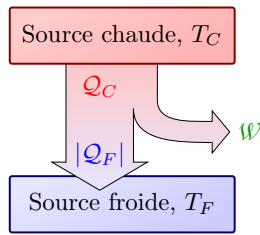


FIGURE T5.6 – Flux énergétique d'un moteur.

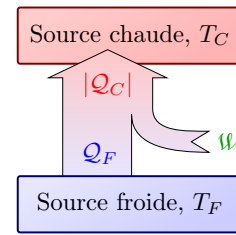


FIGURE T5.7 – Flux énergétique d'un frigo⁴.

II/B Moteur ditherme

Important T5.1 : Moteur ditherme

Domaine ① du diagramme de RAVEAU :

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

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

Production	Coût	Perte
$-\mathcal{W}$	Q_C	Q_F

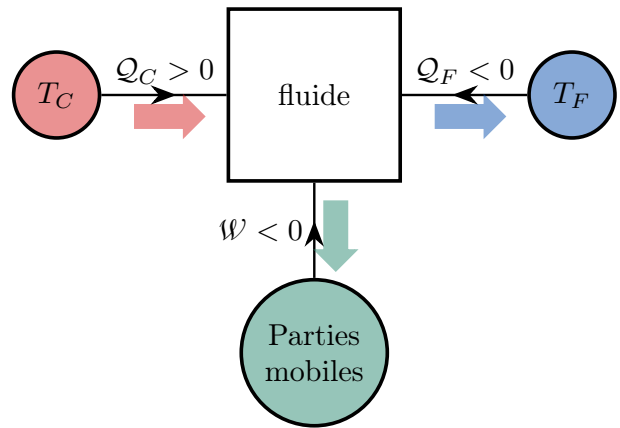


FIGURE T5.8 – Schéma moteur ditherme.

♥ Théorème T5.1 : de CARNOT moteur

Par second principe, le rendement d'un moteur est majoré par le **rendement de Carnot** :

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

Il correspond au rendement idéal d'une machine réversible ($S_{cr} = 0$ donc $\sum \frac{Q_i}{T_i} = 0$).

♥ Preuve T5.1 : Rendement de CARNOT moteur

$$\eta = \frac{-\mathcal{W}}{Q_C} \stackrel{(T5.1)}{=} \frac{Q_C + Q_F}{Q_C} = 1 + \frac{Q_F}{Q_C}$$

Or,

$$\frac{Q_F}{T_F} \stackrel{(T5.2)}{\leq} -\frac{Q_C}{T_C} \stackrel{Q_C > 0}{\Leftrightarrow} \underbrace{1 + \frac{Q_F}{Q_C}}_{=\eta} \leq \underbrace{1 - \frac{T_F}{T_C}}_{=\eta_C}$$

♥ Ordre de grandeur T5.1 : Rendement d'un moteur

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

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

4. 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).

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.

II/C Machines frigorifiques et pompes à chaleur

Important T5.2 : Réfrigérateur

Domaine ④ du diagramme de RAVEAU :

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

◇ **But** : Refroidir une source froide

◇ **Source chaude** : atmosphère

◇ **Source froide** : aliments

Production	Coût	Perte
Q_F	$\mathcal{W}$	Q_C

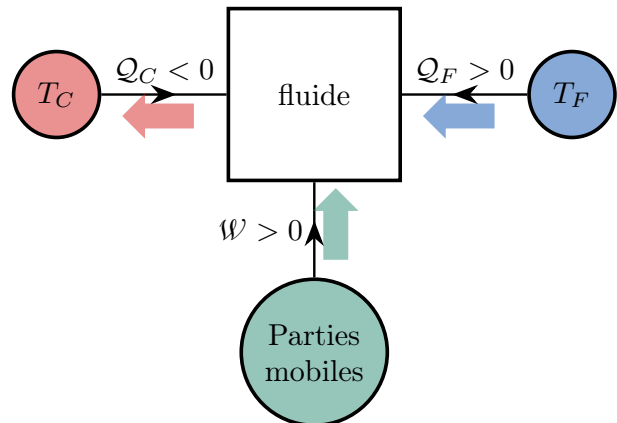


FIGURE T5.9 – Schéma réfrigérateur.

♥ Théorème T5.2 : de CARNOT réfrigérateur

Par second principe, l'efficacité d'un réfrigérateur est majoré par le **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 ($S_{\text{cr}} = 0$ donc $\sum \frac{Q_i}{T_i} = 0$).

♥ Preuve T5.2 : Efficacité de CARNOT réfrigérateur

$$e^{\text{frig.}} = \frac{Q_F}{\mathcal{W}} \stackrel{\text{(T5.1)}}{=} -\frac{Q_F}{Q_F + Q_C} = -\frac{1}{1 + \frac{Q_C}{Q_F}}$$

$$\text{Or, } \frac{Q_C}{T_C} \stackrel{\text{(T5.2)}}{\leq} -\frac{Q_F}{T_F} \Leftrightarrow 1 + \frac{Q_C}{Q_F} \leq 1 - \frac{T_C}{T_F} \Leftrightarrow \frac{1}{1 + \frac{Q_C}{Q_F}} \geq \frac{1}{1 - \frac{T_C}{T_F}} \Leftrightarrow -\frac{1}{1 + \frac{Q_C}{Q_F}} \leq -\frac{1}{1 - \frac{T_C}{T_F}}$$

$$\text{Ainsi, } e^{\text{frig.}} \leq -\frac{1}{1 - \frac{T_C}{T_F}} \Leftrightarrow e^{\text{frig.}} \leq \frac{T_F}{T_C - T_F} = e_C^{\text{frig.}}$$

♥ Ordre de grandeur T5.2 : Efficacité d'un réfrigérateur

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

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

Interprétation T5.3 : Différence rendement/efficacité

Les coefficients de performance ont un sens plus **industriel** que physique, donc peuvent être supérieurs à 1. Ils traduisent qu'une partie de l'énergie n'est pas directement fournie par

l'utilisateur, mais implicitement donnée par l'environnement : pour 1 J de travail fourni, on dirige $e \times 1$ J de chaleur vers la source d'intérêt.

La **chaleur** étant la **forme finale** de l'énergie, il est toujours beaucoup **plus simple d'extraire un transfert thermique d'un travail** plutôt que l'inverse.

Important T5.3 : Pompe à chaleur

Domaine ④ du diagramme de RAVEAU :

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

◇ **But** : Réchauffer une source chaude

◇ **Source chaude** : intérieur

◇ **Source froide** : atmosphère

Production	Coût	Perte
$-Q_C$	$\mathcal{W}$	Q_F

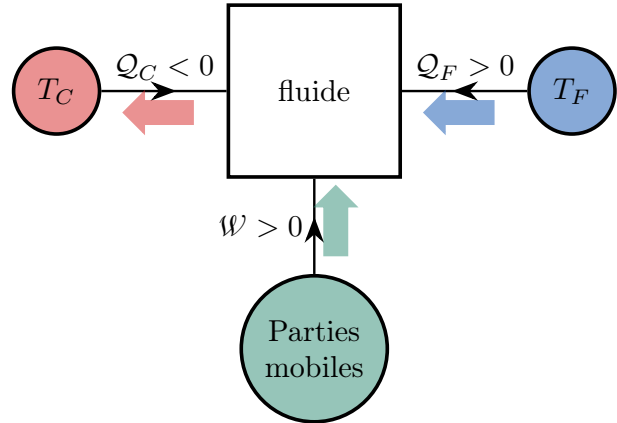


FIGURE T5.10 – Schéma pompe à chaleur.

♥ Théorème T5.3 : de CARNOT pompe à chaleur

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.

♥ Preuve T5.3 : Efficacité de CARNOT PAC

$$e^{\text{PAC}} = \frac{-Q_C}{\mathcal{W}} \stackrel{(\text{T5.1})}{=} \frac{Q_C}{Q_C + Q_F} = \frac{1}{1 + \frac{Q_F}{Q_C}}$$

$$\text{Or, } \frac{Q_F}{T_F} \stackrel{(\text{T5.2})}{\leq} -\frac{Q_C}{T_C} \stackrel{Q_C < 0}{\Leftrightarrow} 1 + \frac{Q_F}{Q_C} \geq 1 - \frac{T_F}{T_C} \Leftrightarrow \frac{1}{1 + \frac{Q_F}{Q_C}} \stackrel{Q_C < 0}{\leq} \frac{1}{1 - \frac{T_F}{T_C}}$$

$$\text{Ainsi, } e^{\text{PAC}} \leq \frac{1}{1 - \frac{T_F}{T_C}} \Leftrightarrow e^{\text{PAC}} \leq \frac{T_C}{T_C - T_F} = e_C^{\text{PAC}}$$

♥ Ordre de grandeur T5.3 : Efficacité d'une pompe à chaleur

Avec $T_C = 293$ K et $T_F = 278$ 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 T5.4 : Cogénération

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

Exemple T5.2 : 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 T5.1 : 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_C ; ◇ **BC** : détente adia. réversible de T_C à T_F ;
- ◇ **CD** : compre° isoT. quasi-statique à T_F ; ◇ **DA** : compre° adia. réversible de T_F à T_C .

- 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} , $\mathcal{W}_{AB}$ et $\mathcal{Q}_{AB}$ en fonction de n , R , T_C et α .
- 3 Exprimer Δu_{BC} , $\mathcal{W}_{BC}$ et $\mathcal{Q}_{BC}$. Exprimer $\frac{V_C}{V_B}$ en fonction de T_C , T_F et γ .
- 4 Exprimer Δu_{CD} , $\mathcal{W}_{CD}$ et $\mathcal{Q}_{CD}$ en fonction de n , R , T_F , V_C et V_D .
- 5 Exprimer Δu_{DA} , $\mathcal{W}_{DA}$ et $\mathcal{Q}_{DA}$. Exprimer $\frac{V_A}{V_D}$ en fonction de T_C , T_F et γ . En déduire $\alpha = \frac{V_C}{V_D}$
- 6 Par application du premier principe, déterminer alors le rendement du cycle. Commenter.
- 7 Déterminer l'entropie créée pour chaque transformation. Conclure.

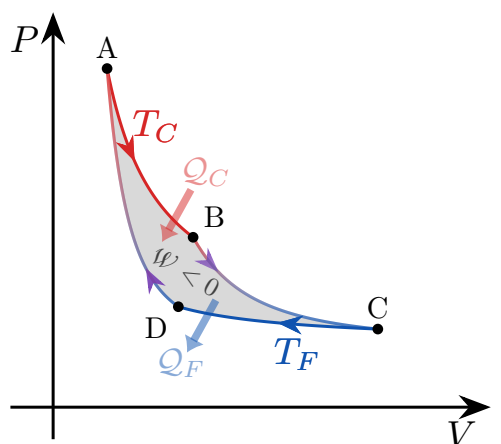


FIGURE T5.11 – Cycle de CARNOT.

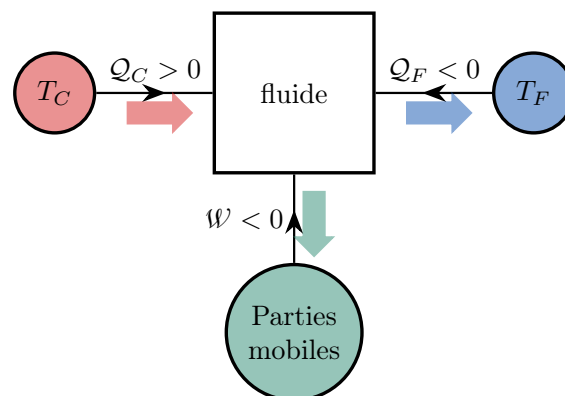


FIGURE T5.12 – Moteur ditherme.

On cherche

$$\eta = \frac{-\mathcal{W}}{\mathcal{Q}_C}$$

- 2 IsoT $\Rightarrow \Delta T_{AB} = 0 \Leftrightarrow \Delta u_{AB} = 0 \Rightarrow \mathcal{W}_{AB} = -\mathcal{Q}_{AB} = -\mathcal{Q}_C$

$$\text{QS} \Rightarrow P = P_{\text{ext}} = \frac{nRT_C}{V} \Rightarrow \boxed{\mathcal{W}_{AB} = -nRT_C \ln \alpha = -\mathcal{Q}_C}$$

$$[3] \text{ Adia} \Rightarrow \mathcal{Q}_{BC} = 0 \Rightarrow \Delta \mathcal{U}_{BC} = \mathcal{W}_{BC} = C_V(T_F - T_C)$$

$$\text{Rév.} \Rightarrow PV^\gamma = \text{cte} \Leftrightarrow TV^{\gamma-1} = \text{cte} \Rightarrow \boxed{\frac{V_C}{V_B} = \left(\frac{T_C}{T_F}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}}}$$

$$[4] \text{ IsoT} \Rightarrow \Delta T_{CD} = 0 \Leftrightarrow \Delta \mathcal{U}_{CD} = 0 \Rightarrow \mathcal{W}_{CD} = -\mathcal{Q}_{CD} = -\mathcal{Q}_F$$

$$\text{QS} \Rightarrow P = P_{\text{ext}} = \frac{nRT_F}{V} \Rightarrow \boxed{\mathcal{W}_{CD} = -nRT_F \ln \frac{V_D}{V_C} = -\mathcal{Q}_F}$$

$$[5] \text{ Adia} \Rightarrow \mathcal{Q}_{DA} = 0 \Rightarrow \Delta \mathcal{U}_{DA} = \mathcal{W}_{DA} = C_V(T_C - T_F)$$

$$\text{Rév.} \Rightarrow \boxed{\frac{V_A}{V_D} = \left(\frac{T_F}{T_C}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}}} \Leftrightarrow \frac{V_D}{V_A} = \left(\frac{T_C}{T_F}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} = \frac{V_C}{V_B} \Leftrightarrow \boxed{\frac{V_B}{V_A} = \alpha = \frac{V_C}{V_D}}$$

$$[6] \text{ 1}^{\text{er}} \text{ ppe.} \quad \Delta \mathcal{U}_{\text{cycle}} = 0 \Leftrightarrow \mathcal{W} = -\mathcal{Q}_C - \mathcal{Q}_F$$

$$\text{Soit} \quad \boxed{\mathcal{W} = nR(T_F - T_C) \ln \alpha} \quad \text{et} \quad \boxed{\mathcal{Q}_C = nRT_C \ln \alpha}$$

$$\text{Rendement} \quad \eta = \frac{-\mathcal{W}}{\mathcal{Q}_C} \Leftrightarrow \eta = \frac{T_C - T_F}{T_C} \Leftrightarrow \boxed{\eta_C = 1 - \frac{T_F}{T_C}}$$

$$[7] \text{ AB :} \quad \Delta \mathcal{S}_{AB} = nR \ln \frac{V_B}{V_A} \quad \text{et} \quad \mathcal{S}_{\text{ech,AB}} = \frac{\mathcal{Q}_C}{T_C} = nR \ln \frac{V_B}{V_A} \Leftrightarrow \boxed{\mathcal{S}_{\text{cr,AB}} = 0}$$

$$\text{BC :} \quad \text{adia} \Rightarrow \mathcal{Q}_{BC} = 0 \Rightarrow \mathcal{S}_{\text{ech,BC}} = 0 \quad \text{et} \quad \text{rév.} \Rightarrow \boxed{\mathcal{S}_{\text{cr,BC}} = 0} \quad (\text{BC isentropique})$$

$$\text{CD :} \quad \Delta \mathcal{S}_{CD} = nR \ln \frac{V_D}{V_C} \quad \text{et} \quad \mathcal{S}_{\text{ech,CD}} = \frac{\mathcal{Q}_F}{T_F} = nR \ln \frac{V_D}{V_C} \Leftrightarrow \boxed{\mathcal{S}_{\text{cr,CD}} = 0}$$

$$\text{DA :} \quad \text{adia} \Rightarrow \mathcal{Q}_{DA} = 0 \Rightarrow \mathcal{S}_{\text{ech,DA}} = 0 \quad \text{et} \quad \text{rév.} \Rightarrow \boxed{\mathcal{S}_{\text{cr,DA}} = 0} \quad (\text{DA isentropique})$$

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

Attention T5.2 : Cycle et rendement de CARNOT

Il n'est **absolument pas nécessaire** de faire toute cette étude pour trouver le rendement de CARNOT. La plupart du temps, on vous demande de faire simplement un bilan d'énergie et d'entropie sur le cycle (cf. preuve T5.1).

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 ROCHAS⁵ 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 », par l'étude d'un cylindre :

5. 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.

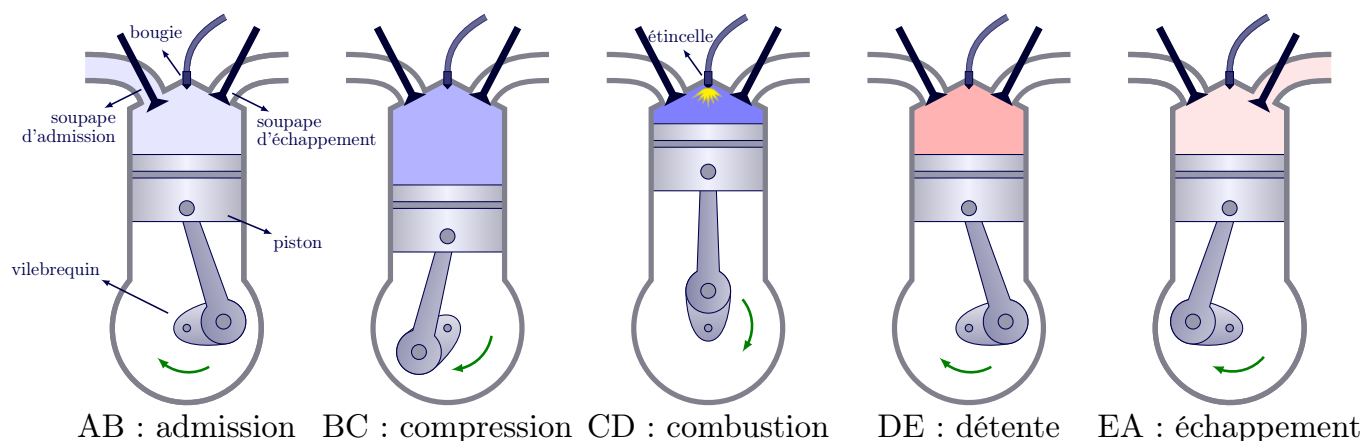


FIGURE T5.13 – Cycle de transformations d'un cylindre d'un moteur à explosion.

◇ **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, 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, système ouvert.

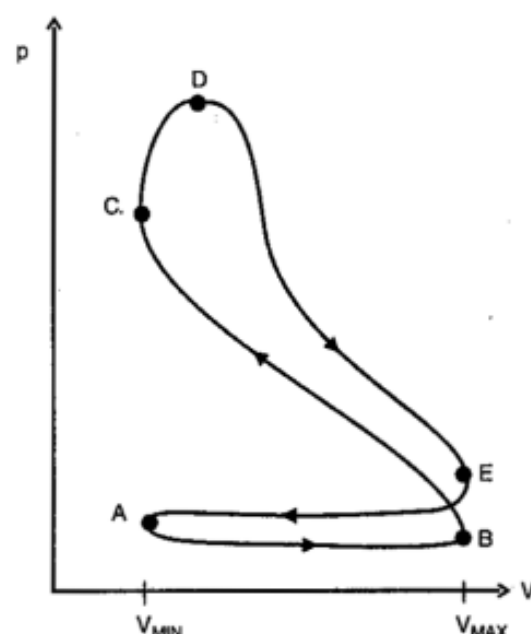


FIGURE T5.14 – Cycle réel.

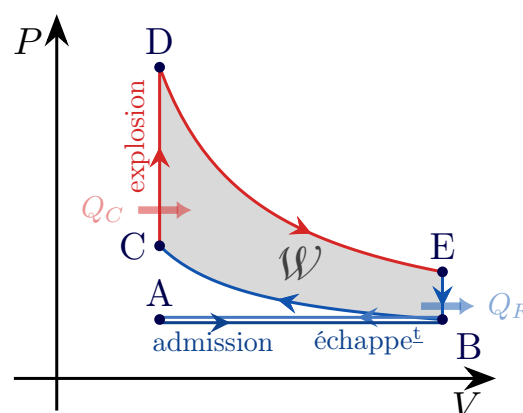


FIGURE T5.15 – Cycle idéal.

III/D Autres machines

- ◇ Moteur diesel (voir TD) : 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.