

# Thermodynamique

## Chapitre 6

### Machines thermiques

# Machines thermiques

Nous arrivons à ce qui a véritablement motivé la fondation de la thermodynamique : l'étude des machines thermiques indépendamment de leur technologie. Dans ce chapitre nous allons donc utiliser tout ce que nous avons appris jusque là avec le premier principe, le second principe et lors de la description du corps pur sous plusieurs phases. Il y aura assez peu de véritables nouvelles lois dans ce chapitre qui comportera essentiellement de nouvelles définitions et quelques nouveaux outils.

C'est ainsi que dans la première partie nous allons poser les bases de ce que sont les machines thermiques afin de voir les différents types de machines qui sont intéressants en pratique. Dans la deuxième troisième partie, nous verrons un des exemples les plus classiques de machine thermique : le moteur à essence.

## I – Tout ce que nous pouvons dire sans rien savoir (ou presque)

### I.1 – Une « machine thermique »

#### I.1.i – premières définitions

Une *machine thermique* est un dispositif fonctionnant en cycle et échangeant de l'énergie par transfert thermique et par travail avec l'extérieur.

- ◇ Une telle définition peut surprendre car elle semble ne rien dire *a priori* puisque n'importe quel système échange de l'énergie par transfert thermique ou par travail avec l'extérieur.
- ◇ En fait, le point important est qu'une machine doit fonctionner en cycles, *ie.* elle doit pouvoir fonctionner indéfiniment.

Une *machine motrice* est une machine thermique dont le but est de fournir véritablement de l'énergie par travail à l'extérieur.

- ◇ Inutile de se compliquer la vie, il s'agit bien de tout ce qui est moteur ! Sauf les moteurs électriques.

Une *machine réceptrice* est une machine qui reçoit véritablement de l'énergie par travail de la part de l'extérieur.

- ◇ Cette énergie est le plus souvent apportée par mouvement d'un moteur électrique.

#### I.1.ii – premier choix

- ◇ Dans toute la suite, nous appellerons « système », le corps subissant les transformations et **pas ce qui le contient**.
- ◇ Ainsi tout ce qui est piston, cylindre, arbres, ... sont **exclus** du système.

### I.1.iii – premier résultat

Une *machine monotherme* est une machine n'échangeant de l'énergie par transfert thermique qu'avec un seul thermostat.

◇ Cette définition n'est pas surprenant étant donné celle de « transformation monotherme ».

Il n'existe pas de machine monotherme motrice.

#### ★ démonstration

◇ Considérons un cycle complet de la machine thermique. Alors, sur ce cycle, les bilans énergétiques et entropiques permettent d'écrire, avec les notations usuelles :

$$\Delta U = 0 = W + Q \quad \text{et} \quad \Delta S = 0 = S_e + S_c$$

◇ Le second principe impose  $S_c \geq 0$  donc  $S_e \leq 0$ .

◇ Or, puisque les échanges thermiques se font avec un seul thermostat, nous pouvons écrire :

$$S_e = \int \frac{\delta Q}{t_{\text{front}}} = \int \frac{\delta Q}{T_{\text{thst}}} = \frac{1}{T_{\text{thst}}} \int \delta Q = \frac{Q}{T_{\text{thst}}}$$

◇ Nous obtenons donc  $Q \leq 0$  puis  $W = -Q \geq 0$ .

◇ Cette dernière expression implique que le système reçoit effectivement de l'énergie.

◇ Conclusion : pour avoir un moteur, il faut au minimum une machine fonctionnant entre deux thermostats.

## I.2 – Une autre version du second principe

### I.2.i – inégalité de CLAUSIUS

#### INÉGALITÉ DE CLAUSIUS

Pour une machine thermique échangeant les transferts thermiques  $Q_k$  avec les thermostats de température  $T_k$ , nous avons :

$$\sum \frac{Q_k}{T_k} \leq 0$$

#### ★ démonstration

◇ Écrivons la variation d'entropie sur l'ensemble du cycle :

$$\Delta S^{\text{fct état}} = \sum (\Delta S_k) = \sum \left( \frac{Q_k}{T_k} + S_{c,k} \right) = \left( \sum \frac{Q_k}{T_k} \right) + \underbrace{S_c}_{\geq 0}^{\text{cycle}} = 0$$

## I.2.i – version historique

Il n'existe pas de système pour lequel l'énergie aille spontanément des zones de température basse aux zones de température élevée.

### ★ démonstration

- ◇ Considérons un système qui ne fasse qu'échanger de l'énergie par transfert thermique entre deux thermostat, l'un dit froid de température  $T_f$  et l'autre dit chaud de température  $T_c > T_f$ .
- ◇ Envisageons une évolution spontanée, *ie.* une évolution qui peut durer indéfiniment.
- ◇ Il est alors possible de définir un cycle de transformation car il existe au moins deux instants pour lesquels les états du système et de l'extérieur sont identiques.
- ◇ Sur ce cycle, le bilan énergétique se réduit à  $\Delta U = 0 = Q_c + Q_f$  puisque le système ne fait **que** échanger des transferts thermiques.
- ◇ Nous obtenons alors  $Q_c = -Q_f$ .
- ◇ L'inégalité de CLAUSIUS donne ainsi :

$$\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0 \quad \rightsquigarrow \quad Q_c \underbrace{\left( \frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_f} \right)}_{> 0} \leq 0 \quad \rightsquigarrow \quad Q_c \geq 0$$

- ◇ Finalement, du point de vue du système, l'énergie est **reçue** de la part de la source chaude et effectivement **fournie** à la source froide.

## I.3 – « Des » machines thermiques

### I.3.i – intérêt d'une machine

#### ★ rôle d'une machine

- ◇ Il existe tout d'abord les moteurs dont le rôle et l'intérêt pratique est un peu à développer.
- ◇ En effet quand nous entendons « moteur » ou même « machine motrice », nous pensons spontanément aux moteurs de véhicules qui les font avancer : le travail effectivement fourni par le moteur a pour but d'être converti en énergie cinétique.
- ◇ Mais il existe aussi d'autres machines motrices dont le but n'est pas de fabriquer de l'énergie cinétique, mais de l'énergie électrique. Les centrales électriques et autres groupes électrogènes sont donc aussi à ranger dans la catégorie des machines motrices.
- ◇ L'autre grand type de machine thermique est une machine dont le but est de réaliser des transferts thermiques contraires au sens naturel : ces machines « réchauffent le chaud et refroidissent le froid en même temps ».
- ◇ Ces machines sont extrêmement utiles et courantes puisqu'il s'agit des réfrigérateurs, climatiseurs et autres pompes à chaleur.

#### ★ restriction

- ◇ Nous avons déjà vu que les machines monothermes ne pouvaient avoir qu'un seul rôle : recevoir de l'énergie par mouvement et la redonner par transfert thermique. Il s'agit par exemple :
  - des radiateurs électriques (conversion de l'énergie électrique en « chaleur »)
  - des frottements mécaniques (conversion de l'énergie mécanique en « chaleur »)

- ◇ Afin de pouvoir rencontrer des cas de machines intéressantes, nous sommes obligés d'ajouter au moins un thermostat avec qui échanger de l'énergie par transfert thermique.

Une machine thermique est dite *ditherme* lorsqu'elle échange de l'énergie par transfert thermiques avec deux thermostats.

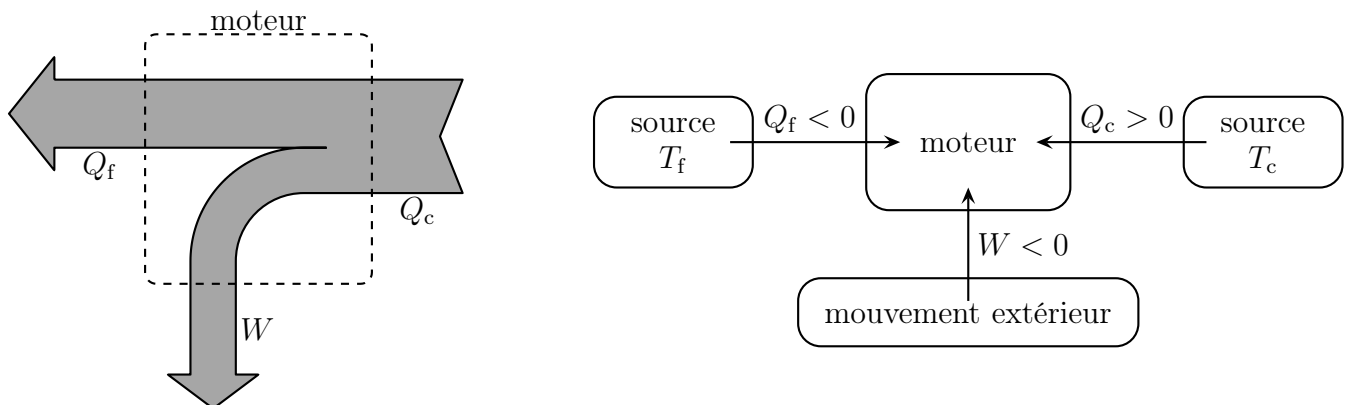
- ◇ Dans toute la suite et de manière assez intuitive :
- nous appellerons « chaud » le thermostat de température  $T_c$  la plus élevée
  - nous appellerons « froid » le thermostat de température  $T_f$  la plus basse
- ◇ Nous avons donc  $T_c > T_f$ .
- ◇ N'oublions pas que la notion de chaud et froid est **relative** et que dans certains cas,  $T = -15 \text{ °C}$  est qualifié de chaud.

### I-3·ii – moteurs dithermes

#### ★ présentation

Le rôle d'un moteur ditherme est de fournir un travail.

- ◇ Autrement dit, avec les notations usuelles, la seule chose que nous imposons à un moteur, c'est que, sur un cycle nous ayons finalement  $W < 0$ .
- ◇ Représentons le bilan énergétique d'un moteur ainsi que sa schématisation conventionnelle.



#### ★ rendement

Un *rendement* caractérise la qualité d'une transformation énergétique et vaut :

$$\eta = \frac{\text{énergie ou puissance intéressante}}{\text{énergie ou puissance coûteuse}} > 0$$

Un rendement est inférieur à 1.

- ◇ En effet, comme il s'agit d'une **conversion énergétique**, il n'est pas possible d'avoir, à la fin, plus d'énergie qu'il n'y avait à en convertir.

Pour un moteur ditherme, le rendement s'écrit :

$$\eta = \left| \frac{W}{Q_c} \right| = -\frac{W}{Q_c}$$

Pour un moteur ditherme, le rendement est majoré :

$$\eta \leq \eta_{\max} = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

- ◇ Cela signifie que quels que soient la technologie, les matériaux, le carburant utilisé, à partir du moment où nous connaissons, pour un moteur ditherme, la température extrême obtenue lors de la combustion et la température ambiante, alors son rendement est limité.

Un moteur thermique ne sera jamais un parfait convertisseur énergétique.

### ★ rendement maximal

- ◇ Sur un cycle le bilan énergétique pour le moteur s'écrit :

$$\Delta U = 0 = W + Q_c + Q_f \quad \rightsquigarrow \quad W = -Q_c - Q_f \quad \rightsquigarrow \quad \eta = -\frac{W}{Q_c} = 1 + \frac{Q_f}{Q_c}$$

- ◇ Or d'après l'inégalité de CLAUSIUS et sans oublier que  $Q_c > 0$  :

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

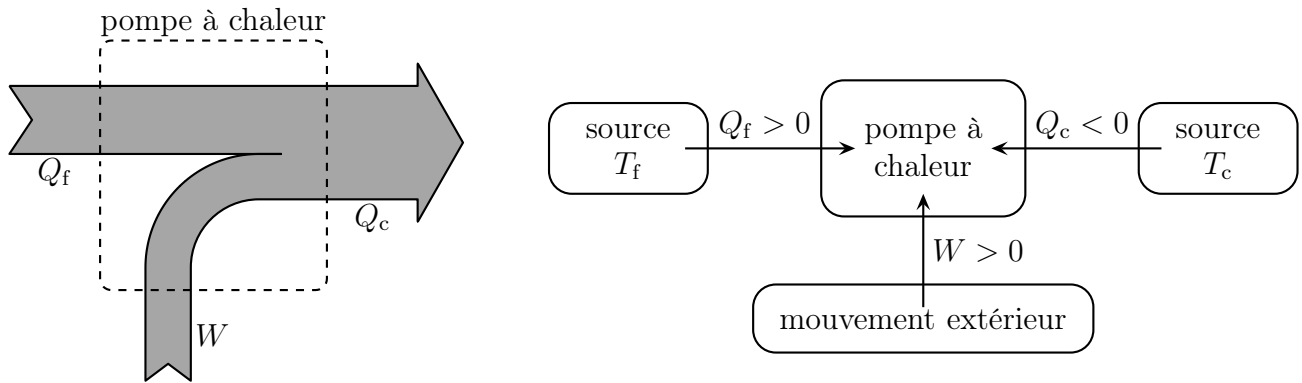
- ◇ Et nous trouvons bien  $\eta \leq 1 - \frac{T_f}{T_c}$ .

## I-3.iii – pompes à chaleur

### ★ présentation

Le rôle d'une pompe à chaleur est de fournir de l'énergie par transfert thermique à la source chaude.

- ◇ Autrement dit, il faut « réchauffer le chaud », ce qui donne, avec les notations usuelles,  $Q_c < 0$ .  
 ◇ Représentons le bilan énergétique d'une pompe à chaleur ainsi que sa schématisation conventionnelle.



### ★ efficacité

- ◇ Ici la pompe à chaleur ne réalise pas à proprement parler de transformation énergétique puisqu'il s'agit essentiellement de **transporter** de l'énergie de la source froide vers la source chaude. Il est donc difficile de parler de rendement.

Une *efficacité* caractérise la qualité d'un transport énergétique et vaut :

$$e = \frac{\text{énergie ou puissance intéressante}}{\text{énergie ou puissance coûteuse}} > 0$$

Une efficacité pour une pompe à chaleur ditherme est supérieure à 1.

- ◇ En effet, nous pouvons voir sur la représentation énergétique que la source chaude reçoit non seulement l'énergie  $W$  mais aussi l'énergie venant de la source froide.

Pour une pompe à chaleur ditherme, l'efficacité vaut :

$$e = \left| \frac{Q_c}{W} \right| = -\frac{Q_c}{W}$$

Pour une pompe à chaleur ditherme, l'efficacité est majorée :

$$\eta \leq \eta_{\max} = \frac{T_c}{T_c - T_f}$$

### ★ efficacité maximale

- ◇ Sur un cycle le bilan énergétique pour le moteur s'écrit :

$$\Delta U = 0 = W + Q_c + Q_f \rightsquigarrow Q_f = -Q_c - W$$

- ◇ En remplaçant dans l'inégalité de CLAUSIUS  $\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0$  :

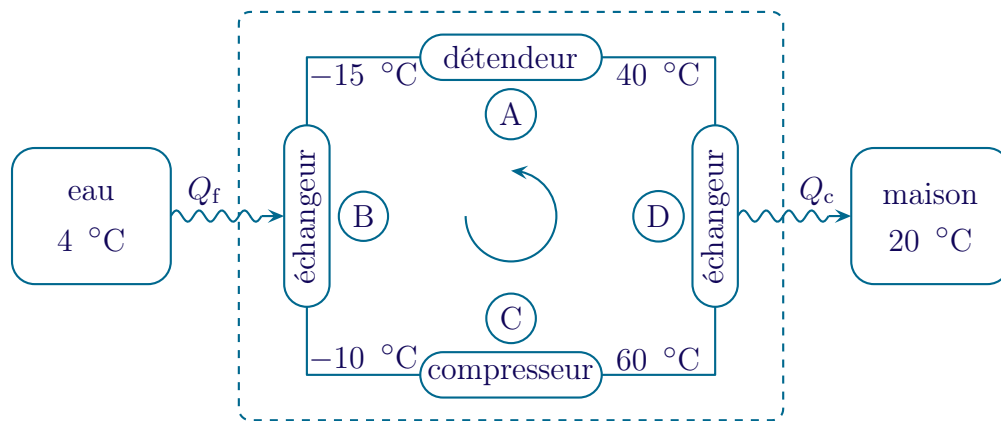
$$\frac{Q_c}{T_c} - \frac{Q_c}{T_f} - \frac{W}{T_f} \leq 0 \rightsquigarrow T_f Q_c - T_c Q_c - T_c W \leq 0 \rightsquigarrow -Q_c (T_c - T_f) \leq W T_c$$

- ◇ Et en divisant de part et d'autre par  $W (T_c - T_f) > 0$ , nous arrivons bien à :

$$e \leq \frac{T_c}{T_c - T_f}$$

### ★ fonctionnement qualitatif

- ◇ Il peut paraître étrange qu'une pompe à chaleur puisse réchauffer le chaud **tout en refroidissant le froid**. Et pourtant, c'est bien ce qui se passe.
- ◇ Illustrons cela sur un exemple qui pourrait exister (les températures qui suivent sont donnée à titre illustratif et ne correspondent pas forcément à une machine réelle).
- ◇ Prenons pour exemple une pompe à chaleur fonctionnant entre de l'eau liquide à  $-4$  celsius située dans un puit et l'air de la maison à  $20$  °C.
- ◇ Une telle installation a pour rôle de réchauffer la maison à  $20$  °C avec l'énergie contenue dans l'eau à  $4$  °C. Comme nous sentons bien que cette opération n'est pas naturelle, nous comprenons mieux le nom de « pompe à chaleur » associée à un tel dispositif.
- ◇ Toute « l'astuce » consiste à élever ou baisser la température **sans échange thermique**, uniquement avec du travail (compression ou détente).



- ◇ Le schéma synoptique représenté ci-dessus montre que la pompe à chaleur est constitué d'un fluide en écoulement (par ex. du fréon) subissant tout un cycle de transformations :
  - (A) un détendeur abaissant la température de  $40$  °C à  $-15$  °C
  - (B) un échangeur thermique permettant de prendre de l'énergie à l'eau à  $4$  °C
  - (C) un compresseur augmentant la température de  $-10$  °C à  $60$  °C
  - (D) un échangeur thermique permettant de donner de l'énergie à l'air de la maison à  $20$  °C
- ◇ Et finalement, quand nous faisons le bilan de l'ensemble, nous voyons que de l'énergie est enlevée à la source froide, de l'énergie fournie à la source chaude et que tout ça ne fonctionne « que » en injectant de l'énergie électrique.

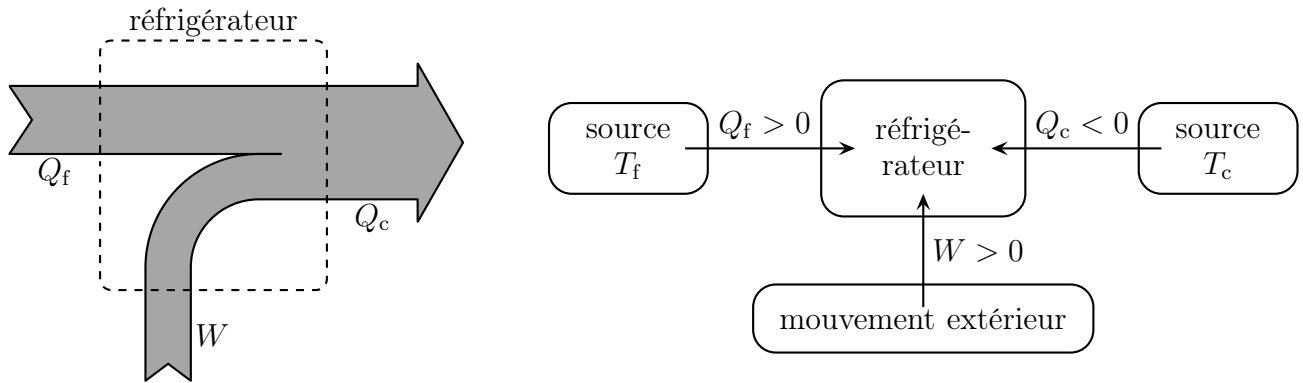
### I.3.iv – réfrigérateur

#### ★ présentation

Le rôle d'un réfrigérateur est de capter de l'énergie par transfert thermique à la source froide.

- ◇ Autrement dit, il faut « refroidir le froid », ce qui donne, avec les notations usuelles,  $Q_f > 0$ .
- ◇ Représentons le bilan énergétique d'un réfrigérateur ainsi que sa schématisation conventionnelle.





- ◇ Il s'agit des mêmes représentations que pour la pompe à chaleur !
- ◇ La différence entre pompe à chaleur et réfrigérateur n'est pas physique mais technique : l'un est optimisé pour réaliser au mieux  $Q_c$ , l'autre pour réaliser au mieux  $Q_f$ .

### ★ efficacité

Pour un réfrigérateur ditherme, l'efficacité vaut :

$$e = \left| \frac{Q_f}{W} \right| = + \frac{Q_f}{W}$$

Pour un réfrigérateur, l'efficacité est majorée :

$$\eta \leq \eta_{\max} = \frac{T_f}{T_c - T_f}$$

📱 pour retenir les expressions des efficacités maximales de la pompe à chaleur et du réfrigérateur, c'est simple : il suffit de savoir que c'est la température de la source utile divisée par la différence des température. Ainsi, pour une pompe à chaleur, c'est  $Q_c$  qui est important, donc c'est  $T_c$  au numérateur.

### ★ efficacité maximale

- ◇ Sur un cycle le bilan énergétique pour le moteur s'écrit :

$$\Delta U = 0 = W + Q_c + Q_f \rightsquigarrow Q_c = -Q_f - W$$

- ◇ En remplaçant dans l'inégalité de CLAUSIUS  $\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0$  :

$$-\frac{Q_f}{T_c} - \frac{W}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0 \rightsquigarrow -T_f Q_f - T_f W + T_c Q_c \leq 0 \rightsquigarrow Q_f (T_c - T_f) \leq W T_f$$

- ◇ Et en divisant de part et d'autre par  $W (T_c - T_f) > 0$ , nous arrivons bien à :

$$e \leq \frac{T_f}{T_c - T_f}$$

### I-3.v – diagramme de RAVEAU

#### ★ présentation

Le diagramme de RAVEAU représente dans le plan  $(Q_c, Q_f)$  les différentes machines dithermes.

- ◇ L'utilité de ce diagramme réside essentiellement dans la représentation simultanée de toutes les machines thermiques possibles.
- ◇ Ce diagramme ne sera pas, en revanche, utilisé comme aide lors de l'application de lois.

#### ★ distinguer l'impossible du possible

- ◇ Écrivons l'inégalité de CLAUSIUS sur un cycle :

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

- ◇ Cela signifie que seules les machines situées dans la zone **en-dessous** de la droite  $Q_c = -\frac{T_c}{T_f} Q_f$  sont physiquement possible.
- ◇ Nous pouvons donc éliminer un demi-plan du diagramme de RAVEAU.

#### ★ distinguer les moteurs des récepteurs

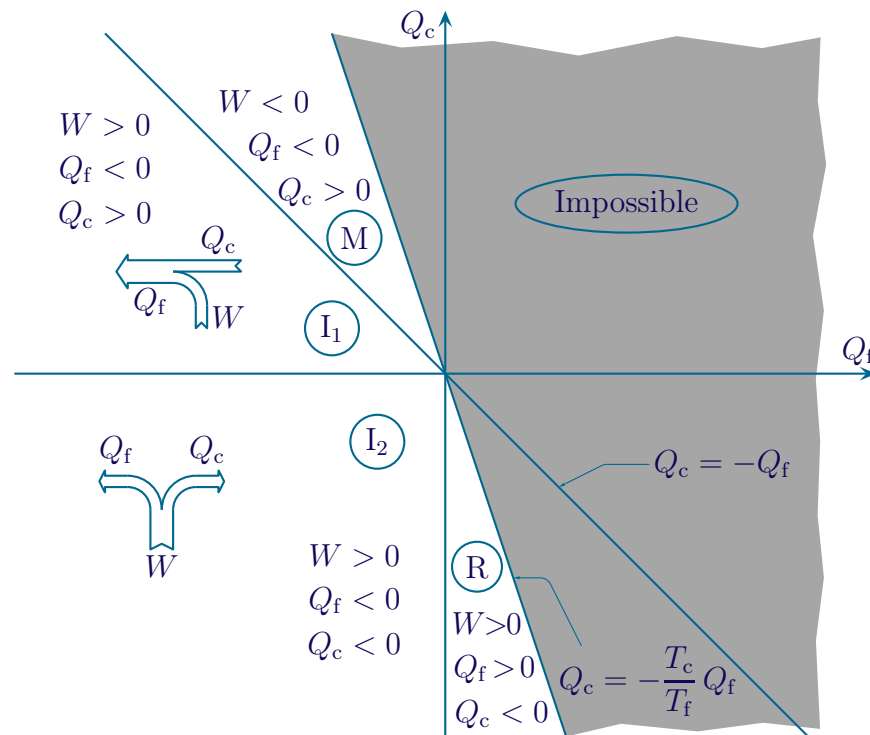
- ◇ Supposons qu'une machine thermique soit motrice, *ie.* que  $W < 0$ .
- ◇ Écrivons le bilan énergétique de cette machine :

$$0 = W + Q_c + Q_f \quad \rightsquigarrow \quad -Q_c - Q_f = W < 0 \quad \rightsquigarrow \quad Q_c > -Q_f$$

- ◇ Finalement les machines situées dans la zone **au-dessus** de la droite  $Q_c = -Q_f$  sont des machines motrices. Les autres étant des machines réceptrices.

#### ★ représentation et analyse

- ◇ Commençons par tracer ce que nous savons :
  - la zone grisée est la zone interdite par le second principe *via* l'inégalité de CLAUSIUS
  - la zone **(M)** est la zone dans laquelle sont situées les moteurs thermiques car  $W < 0$ ,  $Q_c > 0$  et  $Q_f < 0$ .
  - la zone **(R)** est la zone dans laquelle sont situées les pompes à chaleur et les réfrigérateurs car  $W > 0$ ,  $Q_c < 0$  et  $Q_f > 0$



- ✧ Nous constatons qu'il reste deux grandes zones dans les récepteurs :  $I_1$  et  $I_2$ . Dans ces zones nous avons représenté le bilan énergétique afin de mieux voir ce qu'il se passe.
- ✧ Pour la zone  $I_1$ , nous pouvons voir que la machine reçoit de l'énergie par travail et que dans le même temps l'énergie passe des zones de température élevée aux zones de température basse. C'est une machine **inutile** car c'est une machine qui utilise de l'énergie ( $W$ ) pour réaliser un transfert énergétique naturel et spontané.
- ✧ Pour la zone  $I_2$ , nous pouvons voir que la machine reçoit de l'énergie par travail restituée aux deux sources  $T_c$  et  $T_f$ . Cela implique que ces deux sources ont le même rôle physique, ce qui rend inutile la machine. Quitte à ce que les deux sources soient physiquement aussi utiles, autant prendre deux machines, l'une donnant son énergie uniquement à  $T_c$ , l'autre à  $T_f$ .

## I.4 – La machine idéale

### I.4.i – tout doit être réversible

- ✧ Pour atteindre le rendement maximal, il faut que les inégalités deviennent des égalités.
- ✧ Or la majoration du rendement et des efficacités viennent de l'inégalité de CLAUSIUS qui, elle-même, vient du second principe et de la loi  $S_{crée} \geq 0$ .
- ✧ Pour obtenir une égalité, il faut donc que toutes les entropies créées soient nulles, *ie.* que l'ensemble du cycle soit réversible.
- ✧ Pour les transformations qui ont lieu au contact du thermostat, la réversibilité implique que la température soit uniforme et, donc que la température de frontière soit celle du système. Mais comme la température de frontière est déjà celle du thermostat, nous trouvons que, finalement, la transformation doit être une isotherme de température  $T_c$  ou  $T_f$ .
- ✧ Entre ces transformations durant lesquelles il y a des échanges thermiques, il y a des transformations durant lesquelles il n'y a **pas** d'échange thermique : ce sont des adiabatiques. Et comme ces étapes doivent aussi être réversibles, cela donne des adiabatiques réversibles, *ie.* des isentropiques.

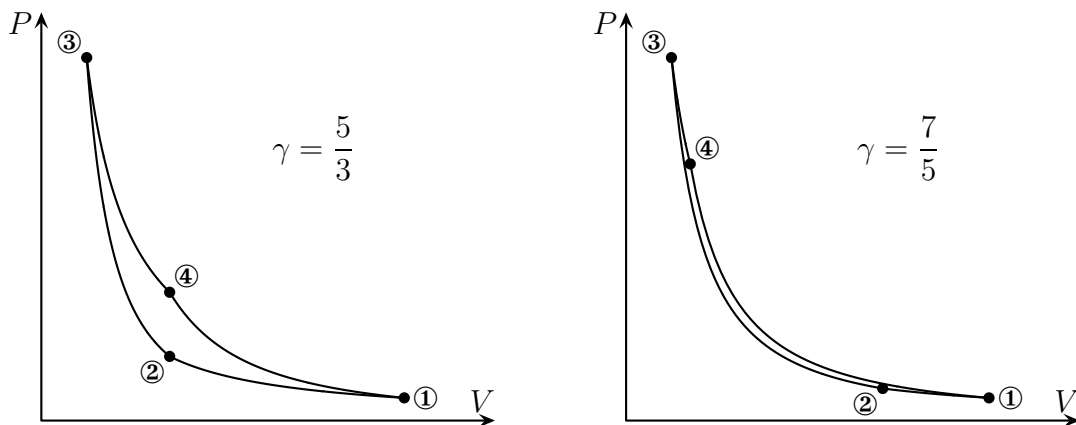
Le cycle de CARNOT est le cycle d'une machine ditherme fonctionnant de manière idéale, il est composé de :

- deux adiabatiques réversibles
- deux isothermes

### I.4.ii – représentation du cycle de CARNOT

#### ★ dans le diagramme de WATT

◇ Considérons un gaz parfait subissant un cycle de CARNOT.



◇ Il s'agit bien d'un cycle moteur car lors des transformations  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$  l'énergie représentée par l'aire en dessous des courbes correspond à de l'énergie vraiment reçue par le gaz. Pour les transformations  $3 \rightarrow 4 \rightarrow 1$ , l'aire correspond à de l'énergie vraiment fournie par le gaz et elle est bien supérieure à la première.

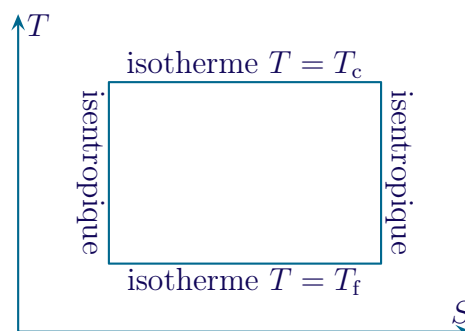
◇ Les cycles étant très écrasés, nous pouvons en conclure qu'ils fournissent très peu d'énergie à chaque parcours.

◇ L'inconvénient de cette représentation est qu'elle dépend du fluide qui subit la transformation.

#### ★ dans le diagramme entropique

Le diagramme entropique est la représentation dans le plan  $(T, S)$  d'une ou de plusieurs transformations.

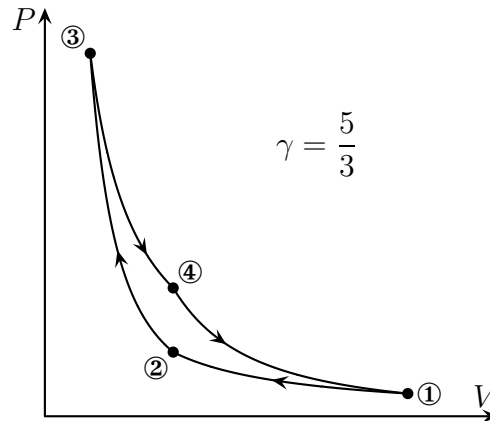
◇ Ici comme le cycle est composé de deux isothermes et de deux adiabatiques réversibles qui sont des isentropiques, cela donne la représentation ci-dessous.



### I.4.iii – vérification du rendement pour un gaz parfait

#### ★ préparation

- ◇ Considérons le cycle de CARNOT pour une machine motrice dont le fluide subissant les transformations est un gaz parfait.



- ◇ Les deux isothermes sont les transformations ① → ② et ③ → ④.  
 ◇ Nous noterons  $T_f = T_1 = T_2$  et  $T_c = T_3 = T_4$ .  
 ◇ De plus l'énergie  $Q_c$  est apportée lors de la transformation ③ → ④.  
 ◇ Comme sur chaque étape il y a du travail échangé, le rendement s'écrit :

$$r = -\frac{W}{Q_c} = -\frac{W_{12} + W_{23} + W_{34} + W_{41}}{Q_{34}}$$

#### ★ transformation ① → ②

- ◇ Il s'agit d'une isotherme d'un gaz parfait donc le premier principe donne :

$$\Delta U \stackrel{\text{GP}}{=} C_V \Delta T \stackrel{\text{isoT}}{=} 0 = W + Q \quad \rightsquigarrow \quad W = -Q$$

- ◇ Or la pression est définie à chaque instant donc le travail élémentaire s'écrit

$$\delta W = -P_{\text{ext}} dV = -P dV$$

- ◇ Cela donne donc :

$$W_{12} = \int \delta W = - \int_1^2 P dV \stackrel{\text{GP}}{=} - \int_1^2 \frac{n R T_f}{V} dV \stackrel{\text{isoT}}{=} -n R T_f \int_1^2 \frac{dV}{V} = -n R T_f \ln \frac{V_2}{V_1} = -Q_{12}$$

#### ★ transformation ② → ③

- ◇ Il s'agit d'une transformation adiabatique, réversible (donc isentropique) d'un gaz parfait.  
 ◇ Le premier principe donne tout de suite :

$$\Delta U_{23} = W_{23} + \cancel{Q_{23}} = W_{23} \stackrel{\text{GP}}{=} C_V \Delta T = C_V (T_3 - T_2)$$

🔗 **autre méthode**

- ◇ Nous aurions pu obtenir ce même résultat en intégrant le travail élémentaire.
- ◇ En effet, comme la pression est toujours définie, nous avons  $\delta W = -P_{\text{ext}} dV = -P dV$  ;
- ◇ De plus une adiabatique réversible d'un gaz parfait est caractérisée par :

$$P V^\gamma = C^{\text{te}} = P_2 V_2^\gamma \quad \rightsquigarrow \quad P = \frac{P_2 V_2^\gamma}{V^\gamma}$$

- ◇ Nous pouvons intégrer :

$$\begin{aligned} W_{23} &= - \int_2^3 P dV = - \int_2^3 \frac{P_2 V_2^\gamma}{V^\gamma} dV = -P_2 V_2^\gamma \int_2^3 \frac{dV}{V^\gamma} = -P_2 V_2^\gamma \left[ \frac{V^{1-\gamma}}{1-\gamma} \right]_2^3 \\ &= \frac{P_2 V_2^\gamma}{\gamma-1} (V_3^{1-\gamma} - V_2^{1-\gamma}) = \frac{1}{\gamma-1} \left( \underbrace{P_2 V_2^\gamma}_{=P_3 V_3^\gamma} V_3^{1-\gamma} - P_2 V_2^\gamma V_2^{1-\gamma} \right) \\ &= \frac{P_3 V_3 - P_2 V_2}{\gamma-1} \stackrel{\text{GP}}{=} \frac{n R T_3 - n R T_2}{\gamma-1} = \frac{n R}{\gamma-1} (T_3 - T_2) = C_V (T_3 - T_2) = C_V (T_c - T_f) \end{aligned}$$

- ◇ Et nous retrouvons bien  $W_{23} = \Delta U_{23}$ .
- ◇ C'est « un peu » plus long, mais ça marche !

★ **transformation ③ → ④**

- ◇ C'est une isotherme comme ① → ②, nous pouvons donc reprendre les résultats par analogie.
- ◇ Cela donne :

$$W_{34} = -Q_{34} = -n R T_c \ln \frac{V_4}{V_3}$$

★ **transformation ④ → ①**

- ◇ C'est une isentropique comme ② → ③, nous pouvons donc reprendre les résultats par analogie :

$$W_{41} = C_V (T_1 - T_4) = C_V (T_f - T_c)$$

★ **rassemblement**

- ◇ En reprenant l'expression du rendement, nous obtenons :

$$\begin{aligned} r &= - \frac{W_{\text{tot}}}{Q_c} = - \frac{W_{12} + W_{23} + W_{34} + W_{41}}{Q_{34}} \\ &= - \frac{-n R T_f \ln \frac{V_2}{V_1} + \cancel{C_V (T_c - T_f)} - n R T_c \ln \frac{V_4}{V_3} + \cancel{C_V (T_f - T_c)}}{n R T_c \ln \frac{V_4}{V_3}} = \frac{T_f \ln \frac{V_2}{V_1}}{T_c \ln \frac{V_4}{V_3}} + 1 \end{aligned}$$

- ◇ De plus sur l'isentropique ② → ③, nous avons :

$$P_2 V_2^\gamma = P_3 V_3^\gamma \rightsquigarrow T_2 V_2^{\gamma-1} = T_3 V_3^{\gamma-1} \rightsquigarrow V_2 = V_3 \left( \frac{T_3}{T_2} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} = V_3 \left( \frac{T_c}{T_f} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}}$$

◇ De même sur l'isentropique ④ → ① :

$$T_4 V_4^{\gamma-1} = T_1 V_1^{\gamma-1} \rightsquigarrow V_1 = V_4 \left( \frac{T_4}{T_1} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} = V_4 \left( \frac{T_c}{T_f} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}}$$

◇ En regroupant les deux résultats, cela donne :

$$\frac{V_2}{V_3} = \frac{V_1}{V_4} \rightsquigarrow \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4} \rightsquigarrow \ln \frac{V_2}{V_1} = -\ln \frac{V_4}{V_3} \rightsquigarrow r = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

### ★ morale

- ◇ Sachant que tout est réversible, le calcul basé sur l'inégalité de CLAUSIUS est plus rapide et, évidemment, à privilégier.
- ◇ Dans le cas d'un cycle non réversible, écrire le rendement sous la forme  $r = 1 + \frac{Q_f}{Q_c}$  facilite de toute façon les calculs.
- ◇ Une erreur fréquente consiste à calculer  $r = \frac{\sum W}{\sum Q}$ .
- ◇ Le résultat sera alors de 1 à tous les coups car toute l'énergie reçue sous forme de travail doit avoir été fournie sous forme de transfert thermique.
- ◇ Dans le rendement (ou l'efficacité), il faut bien prendre en compte uniquement le **ou les** transferts thermiques intéressants.
- ◇ N'oublions pas, en effet que dans le cas d'un cycle complexe (par ex. le cycle DIESEL à double combustion), il peut y avoir plusieurs étapes durant lesquelles se font des transferts thermiques intéressants.

## I.4.iv – Des diagrammes pour les machines réelles

### ★ diagramme entropique de l'eau

- ◇ Le diagramme entropique représente dans le plan  $(T,s)$  quelques courbes iso :
  - les isobares
  - les isenthalpiques
  - les iso-volume massique
  - les isotitre dans la zone de coexistence des phases liquide et vapeur
- ◇ Notons que dans ce diagramme les isothermes sont des portions horizontales et les isentropiques sont des portions verticales.
- ◇ Placer un point dans ce diagramme permet de trouver toutes les grandeurs intensives attachées à ce point.
- ◇ Exemple :
  - si  $P = 10$  bar et  $T = 200$  °C alors  
 $s = 6,44 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ,  $\mathcal{V} = 0,21 \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$  et  $h = 2820 \text{ kJ.kg}^{-1}$  (les valeurs se trouvent par interpolation)
  - si le système précédent évolue par une isentropique jusqu'à  $T = 100$  °C, alors  
 $P = 18$  bar,  $\mathcal{V} = 1,3 \text{ m}^3/\text{kg}^{-1}$  et  $h = 2410 \text{ kJ.kg}^{-1}$ .
- ◇ La partie « gaz parfait » se voit sur le diagramme car elle correspond à des isenthalpiques horizontales.

**★ diagramme de MOLLIER**

- ◇ Le diagramme de MOLLIER représente dans le plan  $(h,s)$  quelques courbes iso :
  - les isothermes
  - les isobares
  - les iso-volume massique
  - les isotitre dans la zone de coexistence des phases liquide et vapeur
- ◇ L'utilisation est du même type que le diagramme entropique.
- ◇ La partie « gaz parfait » se voit sur le diagramme car elle correspond à des isothermes horizontales.

**★ utilité**

- ◇ Ces diagrammes permettent de déterminer tous les états d'un corps (état thermodynamique) ainsi que toutes les variations de fonction d'état de manière rigoureuse pour un corps non idéal.
- ◇ En d'autres termes, il permet de calculer des « valeurs expérimentalement exactes » sans faire de calcul d'intégration ou autre mais uniquement en lisant des abscisses et des ordonnées sur un diagramme.

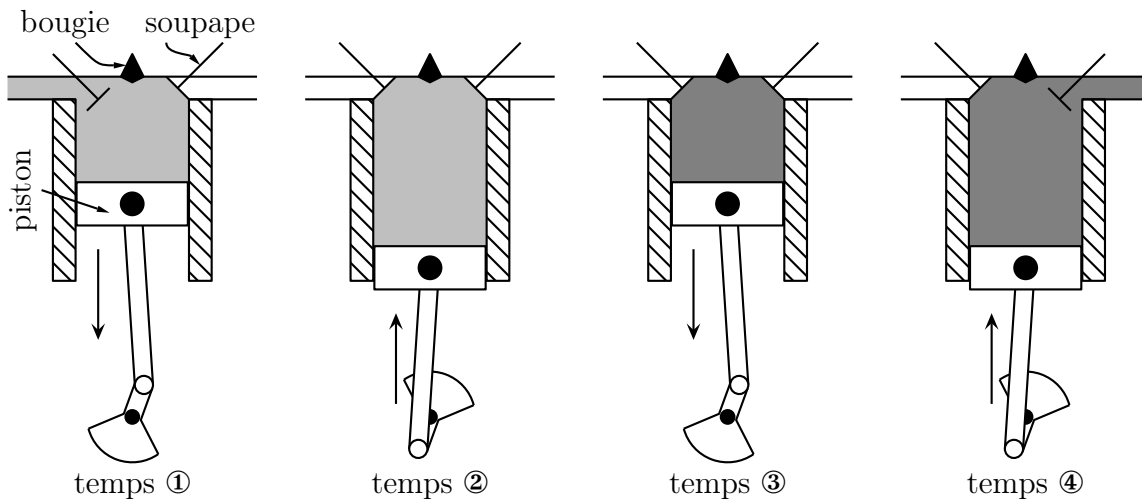


## II – Un moteur bien réel : le moteur à essence

### II.1 – Cycle BEAU DE ROCHAS

#### II.1.i – les quatre temps

◇ Dans un moteur à essence « usuel », le fonctionnement est représenté par les schémas suivants.

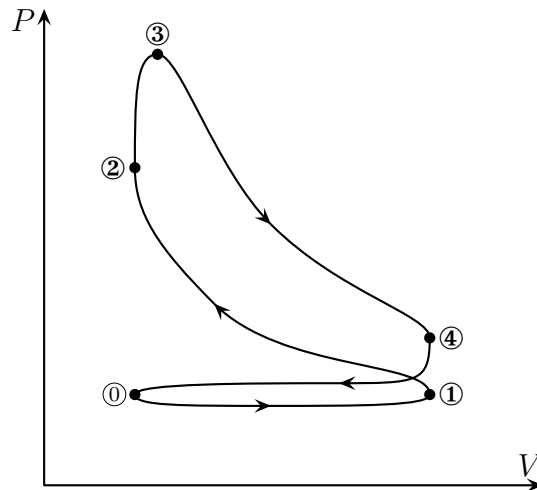


- ◇ 1<sup>er</sup> temps : admission. La (les) soupape(s) d'admission s'ouvre(nt) et le mélange air-carburant entre dans le cylindre. À la fin de ce temps, la (les) soupape(s) se referme(nt)
- ◇ 2<sup>e</sup> temps : compression. Le piston remonte diminuant ainsi le volume de la chambre.
- ◇ L'explosion. Ce n'est pas un temps en soi : c'est entre le 2<sup>e</sup> et le 3<sup>e</sup> temps. Une bougie crée une étincelle qui initie la réaction de combustion entre l'air et le carburant. Cette combustion est extrêmement rapide : c'est une explosion. Elle est si rapide que le piston a à peine le temps de bouger.
- ◇ 3<sup>e</sup> temps : détente. C'est le temps moteur : le gaz échauffé par l'explosion repousse violemment le piston vers le bas. C'est à ce moment là que le travail est véritablement fourni au piston.
- ◇ 4<sup>e</sup> temps : échappement. La (les) soupape(s) d'échappement s'ouvre(nt) et le mélange de gaz brûlés est évacué de la chambre par la remontée du piston.
- ◇ Remarquons qu'il faut deux aller-retour du piston dans le cylindre pour faire un cycle complet.

Montrer les vidéos sur la constitution d'un moteur ainsi que sur son fonctionnement.

#### II.1.ii – représentation du cycle réel

- ◇ La représentation ci-dessous est qualitative car il est extrêmement difficile (impossible ?) de trouver de véritables cycles tracés dans le diagramme de WATT.
- ◇ la pression est celle régnant dans la chambre alors que le volume est celui de la chambre.



- ◇ Au point ①, le piston est à son point mort haut, *ie.* il est à sa position la plus haute possible, le volume à l'intérieur de la chambre est alors très faible mais pas nul.
- ◇ Lors de l'admission ① → ④ le volume augmente et il y a à l'intérieur de la chambre une très légère dépression due au passage du gaz par l'étroit passage laissé par l'ouverture des soupapes.
- ◇ Lorsque le piston est à son point mort bas, le volume de la chambre est maximal et les soupapes se ferment (point ①).
- ◇ La compression ① → ② correspond au 2<sup>e</sup> temps. Le volume diminue, la pression augmente.
- ◇ Lorsque le piston a de nouveau atteint son point mort haut (volume minimal) en ②, une bougie crée une étincelle qui provoque la combustion très rapide des gaz (explosion) entre les points ② et ③. Lors de cette combustion, le piston n'est que très peu descendu.
- ◇ Lors de la détente ③ → ④, le piston descend jusqu'à son point mort bas, *ie.* jusqu'à ce que le volume de la chambre soit minimal.
- ◇ Lorsque les soupapes s'ouvrent (en ④) le contact direct entre les gaz déjà échappés et les gaz brûlés dans la chambre provoque un refroidissement brutal.
- ◇ Le mouvement du piston vers le haut (diminution du volume) permet d'évacuer les gaz brûlés de ④ à ① et un nouveau cycle peut recommencer.
- ◇ Finalement, nous pouvons voir que ce diagramme s'il représente une évolution cyclique, ne représente pas l'évolution cyclique d'un système fermé.

## II.2 – Un modèle simplificateur

### II.2.i – sur le gaz

- ◇ Le mélange { air – carburant } sera considéré comme un gaz parfait de coefficient  $\gamma = 1,4$ .
- ◇ Cela peut paraître presque naturel pour l'air mais le carburant est (en première approximation) une vapeur d'un alcane multicarboné (la référence étant l'octane).
- ◇ Nous allons supposer que le système ne subit **aucune transformation chimique**, autrement dit que ses caractéristiques de description ( $C_P$ ,  $C_V$ ,  $\gamma$  et surtout  $n$ ) restent identiques.
- ◇ Nous considérerons que l'énergie libérée lors de la réaction chimique de combustion provient d'une source thermique externe et, évidemment, virtuelle.

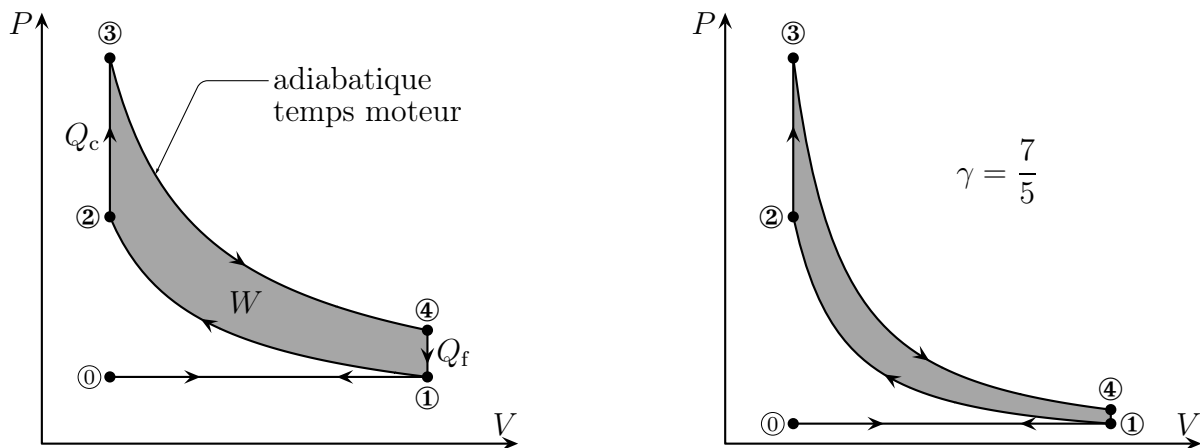
### II.2.ii – et sur les transformations

- ◇ La transformation ① → ④ sera considérée comme étant **isobare**. En négligeant la chute de pression lors de l'admission nous négligeons l'effet « détente de JOULE – THOMSON » lors de ce transit du mélange { air – carburant } des tuyaux d'arrivée à la chambre.

- ◇ La transformation ① → ② sera considérée comme **adiabatique**. En effet rien, lors de cette compression, ne vient apporter de l'énergie au gaz. De plus comme lors de cette admission il n'y a pas d'explosion, pas de choc et que les mouvements du piston ne se fait pas à la vitesse du son, nous pouvons supposer que le gaz est toujours en équilibre thermodynamique interne, *ie.* que la transformation est **réversible**.
- ◇ L'explosion ② → ③ est modélisée par une **isochore**.
- ◇ Lors de la détente ③ → ④, nous pouvons considérer, comme pour la compression que la transformation est **adiabatique et réversible** (insistons sur le fait que l'explosion est terminée lors de la détente).
- ◇ L'ouverture des soupapes d'échappement va créer un brusque refroidissement **isochore** ④ → ①.
- ◇ L'échappement ① → ① est modélisé aussi par une **isobare**.

### II.2.iii – vision dans le diagramme de WATT

- ◇ Nous avons représenté le cycle idéalisé sur les diagrammes de WATT ci-dessous.
- ◇ Si le deuxième diagramme de WATT correspond à un gaz parfait de coefficient  $\gamma = \frac{7}{5}$ , le premier diagramme en revanche a été déformé afin de mieux visualiser le cycle.



- ◇ Finalement nous pouvons constater que les transformations ① → ② puis ② → ③ se compensent parfaitement à tout point de vue et ne permettent pas de fournir sur un cycle un travail.
- ◇ Nous allons donc supprimer ces deux étapes pour ne conserver que le cycle ① → ② → ③ → ④ que nous considérerons être parcouru par le même mélange { air – carburant }.
- ◇ N'oublions pas que le mélange { air – carburant } ne subit pas de transformation chimique.

Le cycle BEAU DE ROCHAS est constitué de :

- deux transformations adiabatiques
- deux transformations isochores

## II.3 – Un piètre rendement

### II.3.i – en fonction des températures

- ◇ Il s'agit ici d'un moteur donc le rendement s'écrit  $r = -\frac{W}{Q_c}$  où  $W$  est le travail reçu sur un cycle et  $Q_c$  l'énergie reçue par transfert thermique.
- ◇ En faisant un bilan énergétique sur un cycle, nous trouvons :

$$\Delta U^{\text{cycle}} = 0 = W + Q_c + Q_f \rightsquigarrow -W = Q_c + Q_f \rightsquigarrow r = \frac{Q_c + Q_f}{Q_c} = 1 + \frac{Q_f}{Q_c}$$

◇  $Q_f$  est l'énergie reçue par transfert thermique lors d'un cycle de la part de la source chaude, *ie.* ici l'énergie reçue par transfert thermique lors de la combustion ② → ③.

◇ Sur la transformation ② → ③, nous avons :

$$Q_{23} \stackrel{\text{1er pcp}}{=} \Delta U_{23} - W_{23} \stackrel{\text{isoV}}{=} \Delta U_{23} \stackrel{\text{GP}}{=} C_V (T_3 - T_2)$$

◇  $Q_f$  est l'énergie reçue par transfert thermique lors d'un cycle de la part de la source froide, *ie.* ici l'énergie reçue par transfert thermique lors du refroidissement ④ → ①.

◇ Sur la transformation ④ → ①, nous avons :

$$Q_{41} \stackrel{\text{1er pcp}}{=} \Delta U_{41} - W_{41} \stackrel{\text{isoV}}{=} \Delta U_{41} \stackrel{\text{GP}}{=} C_V (T_1 - T_4)$$

◇ En rassemblant, cela donne :

$$r = 1 + \frac{\cancel{C_V} (T_1 - T_4)}{\cancel{C_V} (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

### II.3.ii – en fonction du taux de compression

◇ Notons  $a = \frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}}$ , le taux de compression et cherchons à écrire le rendement en fonction de  $a$ , *ie.* en fonction des volumes.

◇ Étant donné le cycle, le taux de compression peut s'écrire  $a = \frac{V_1 \text{ ou } V_4}{V_2 \text{ ou } V_3}$ .

◇ La transformation ① → ② est une transformation adiabatique réversible d'un gaz parfait, nous pouvons donc utiliser la loi de LAPLACE :

$$T V^{\gamma-1} = C^{\text{te}} \rightsquigarrow T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1} \rightsquigarrow T_2 = T_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} = T_1 a^{\gamma-1}$$

◇ De même pour la transformation ③ → ④ :

$$T V^{\gamma-1} = C^{\text{te}} \rightsquigarrow T_3 V_3^{\gamma-1} = T_4 V_4^{\gamma-1} \rightsquigarrow T_3 = T_4 \left( \frac{V_4}{V_3} \right)^{\gamma-1} = T_4 a^{\gamma-1}$$

◇ En remplaçant dans l'expression précédente du rendement :

$$r = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_4 a^{\gamma-1} - T_1 a^{\gamma-1}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{(T_4 - T_1) a^{\gamma-1}} = 1 - \frac{1}{a^{\gamma-1}} = 1 - a^{1-\gamma}$$

◇ Quelques valeurs :

$a$	2	4	6	8
$r$	34 %	43 %	51 %	56 %

## II.3.iii – comparaison avec le moteur de CARNOT

### ★ comment comparer ?

- ◇ Le rendement d'un moteur de CARNOT (moteur idéal) vaut  $r_{id} = 1 - \frac{T_f}{T_c}$  où  $T_c$  et  $T_f$  sont les températures des sources avec lesquelles se font les transferts thermiques.
- ◇ Ici, le cycle n'étant pas un cycle de CARNOT, nous allons choisir le pire des moteurs idéaux qui puisse faire fonctionner entre les mêmes température.
- ◇ Il faut donc que le moteur à cycle de CARNOT ait une température « chaude » la plus petite possible mais permettant d'atteindre la température maximale du cycle de BEAU DE ROCHAS.
- ◇ De même le moteur à cycle de CARNOT doit avoir une température « froide » la plus grande possible permettant d'atteindre la température minimale du cycle de BEAU DE ROCHAS.
- ◇ Finalement, la température chaude du moteur à cycle de CARNOT est la température maximale atteinte lors du cycle et la température froide est la température minimale.

Une machine thermique est comparée à la machine idéale au cycle de CARNOT fonctionnant entre les mêmes valeurs extrêmes de température.

- ◇ Dans la suite nous allons faire une comparaison du cas où le taux de compression vaut  $a = 6$ .

### ★ qui est $T_f$ ?

- ◇ C'est la température minimale, c'est  $T_1$ , la température à laquelle est admis le mélange air-carburant.
- ◇ Nous allons prendre une valeur typique :  $T_1 = 300$  K.

### ★ qui est $T_c$ ?

- ◇  $T_c$  est la température la plus élevée, c'est normal de penser qu'il s'agit de penser qu'il s'agit de  $T_3$ , température atteinte après l'explosion.

### 🕒 compression et $T_2$

- ◇ La compression ① → ② est adiabatique réversible et concerne un gaz parfait. Nous pouvons donc écrire la loi de LAPLACE :

$$T_2 = T_1 a^{\gamma-1} = 614 \text{ K}$$

- ◇ La température a augmenté de près de 300 K rien que grâce à la compression !

### 🕒 explosion et $T_3$

- ◇ Là, évidemment, la température va dépendre de l'explosion et notamment de la réaction chimique.
- ◇ Nous allons supposer que le mélange { air – carburant } libère, lors de la combustion, l'énergie massique  $q = 2,0 \cdot 10^3 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ .
- ◇ Sur la transformation isochore ② → ③ donne donc, en massique :

$$\Delta u = q \stackrel{\text{GP}}{=} c_V (T_3 - T_2) \quad \rightsquigarrow \quad T_3 = T_2 + \frac{q}{c_V} \quad \text{avec} \quad c_V = \frac{C_{V,m}}{M_{\text{air}}} = \frac{R}{M_{\text{air}}(\gamma - 1)}$$

- ◇ Numériquement :  $T_3 = 3,4 \cdot 10^3$  K !
- ◇ Cette température est considérable mais il n'y a aucun risque que cela fasse fondre le moteur car :  
 → dès que le piston descend ne serait-ce que très peu, la température chute

- pour faire fondre quelque chose il faut apporter de l'énergie et l'énergie libérée dans **une** explosion est extrêmement faible par rapport à celle que nécessiterait la fusion du cylindre (exactement comme lors de la cuisson d'un steack : la projection de goutelettes à plus de 150 °C ne provoque aucune brûlure grave tellement l'énergie transportée est faible)

## II.4 – Retour sur le modèle

### II.4.i – il donne, malgré tout, la fonctionnalité

- ◇ Malgré les hypothèses faites, l'évolution du rendement en fonction du taux de compression est juste : plus le taux de compression est grand, meilleur est le rendement.
- ◇ Ceci dit, il ne sert à rien de trop augmenter le taux de compression car sinon la température  $T_2$  après compression pourrait être si élevée qu'elle initierait trop tôt la combustion du mélange air – carburant : c'est le phénomène d'auto allumage mis à profit dans les moteurs DIESEL.

### II.4.ii – irréversibilité et frottement mécanique

- ◇ Les isentropiques n'en sont pas tout à fait.
- ◇ Cependant si les isentropiques n'en sont pas, c'est que l'irréversibilité vient du système lui-même, *ie.* du mélange { air – carburant } et **pas** des frottements mécaniques.
- ◇ En fait il ne faut pas oublier que les gaz ne sont pas tout à fait parfaits mais sont un peu « visqueux ».
- ◇ Les frottements mécaniques vont provoquer une dissipation d'énergie mécanique entre l'énergie reçue par les pistons lors de la détente des gaz et l'énergie effectivement disponible sur l'essieu.

### II.4.iii – un moteur qui chauffe

- ◇ Les transformations sont dites adiabatiques et le refroidissement que nous avons considéré concernait un transfert thermique entre les gaz présents dans la chambre et les gaz déjà échappé lors d'une combustion précédente.
- ◇ Pourquoi les moteurs chauffe-t-il tant alors ?
- ◇ En fait, il est vrai que les adiabatiques ne sont pas vraiment des adiabatiques : un peu d'énergie est perdue par transfert thermique avec le cylindre et les pistons.
- ◇ Sur **un** cycle l'énergie perdue est bien négligeable devant l'énergie récupérée par travail mais pour un moteur réel, avec près de 2000 cycles par minutes, au bout de 10 ou 20 minutes, l'énergie **totale** récupérée n'est plus du tout négligeable : la température du moteur a bien augmenté.

# Machines thermiques

## Au niveau du cours

### ★ Les définitions

- ◇ Sont à savoir :
  - machine thermique / monotherme / ditherme / moteur / récepteur
  - moteur ditherme, pompe à chaleur, réfrigérateur
  - rendement, efficacité
  - diagramme de Raveau

### ★ Les lois

- ◇ Connaître :
  - inégalité de Clausius
  - les rendement et efficacités maximaux accessibles pour les machines dithermes

### ★ la phénoménologie

- ◇ Connaître :
  - savoir expliquer le fonctionnement d'une pompe à chaleur
  - connaître les 4 temps du moteur à 4 temps

### ★ les exemples fondamentaux

- ◇ Savoir refaire la démonstration de la relation de fonctionnement pour une machine à écoulement.

## Au niveau des savoir-faire

### ★ petits gestes

- ◇ Il faut savoir lire et interpréter les diagrammes entropique et de MOLLIER.

### ★ exercices classiques

- ◇ Savoir refaire l'étude sur le moteur à quatre temps.

# Table des matières

<b>I</b>	<b>Tout ce que nous pouvons dire sans rien savoir (ou presque)</b>	<b>1</b>
I-1	Une « machine thermique » . . . . .	1
I-1 <i>·i</i>	premières définitions . . . . .	1
I-1 <i>·ii</i>	premier choix . . . . .	1
I-1 <i>·iii</i>	premier résultat . . . . .	2
	démonstration . . . . .	2
I-2	Une autre version du second principe . . . . .	2
I-2 <i>·i</i>	inégalité de CLAUSIUS . . . . .	2
	démonstration . . . . .	2
I-2 <i>·ii</i>	version historique . . . . .	3
	démonstration . . . . .	3
I-3	« Des » machines thermiques . . . . .	3
I-3 <i>·i</i>	intérêt d'une machine . . . . .	3
	rôle d'une machine . . . . .	3
	restriction . . . . .	3
I-3 <i>·ii</i>	moteurs dithermes . . . . .	4
	présentation . . . . .	4
	rendement . . . . .	4
	rendement maximal . . . . .	5
I-3 <i>·iii</i>	pompes à chaleur . . . . .	5
	présentation . . . . .	5
	efficacité . . . . .	6
	efficacité maximale . . . . .	6
	fonctionnement qualitatif . . . . .	7
I-3 <i>·iv</i>	réfrigérateur . . . . .	7
	présentation . . . . .	7
	efficacité . . . . .	8
	efficacité maximale . . . . .	8
I-3 <i>·v</i>	diagramme de RAVEAU . . . . .	9
	présentation . . . . .	9
	distinguer l'impossible du possible . . . . .	9
	distinguer les moteurs des récepteurs . . . . .	9
	représentation et analyse . . . . .	9
I-4	La machine idéale . . . . .	10
I-4 <i>·i</i>	tout doit être réversible . . . . .	10
I-4 <i>·ii</i>	représentation du cycle de CARNOT . . . . .	11
	dans le diagramme de WATT . . . . .	11
	dans le diagramme entropique . . . . .	11
I-4 <i>·iii</i>	vérification du rendement pour un gaz parfait . . . . .	12
	préparation . . . . .	12
	transformation ① → ② . . . . .	12
	transformation ② → ③ . . . . .	12
	transformation ③ → ④ . . . . .	13
	transformation ④ → ① . . . . .	13
	rassemblement . . . . .	13
	morale . . . . .	14
I-4 <i>·iv</i>	Des diagrammes pour les machines réelles . . . . .	14
	diagramme entropique de l'eau . . . . .	14



	diagramme de MOLLIER . . . . .	15
	utilité . . . . .	15
<b>II</b>	<b>Un moteur bien réel : le moteur à essence</b>	<b>16</b>
II.1	Cycle BEAU DE ROCHAS . . . . .	16
II.1.i	les quatre temps . . . . .	16
II.1.ii	représentation du cycle réel . . . . .	16
II.2	Un modèle simplificateur . . . . .	17
II.2.i	sur le gaz . . . . .	17
II.2.ii	et sur les transformations . . . . .	17
II.2.iii	vision dans le diagramme de WATT . . . . .	18
II.3	Un piètre rendement . . . . .	18
II.3.i	en fonction des températures . . . . .	18
II.3.ii	en fonction du taux de compression . . . . .	19
II.3.iii	comparaison avec le moteur de CARNOT . . . . .	20
	comment comparer ? . . . . .	20
	qui est $T_f$ ? . . . . .	20
	qui est $T_c$ ? . . . . .	20
II.4	Retour sur le modèle . . . . .	21
II.4.i	il donne, malgré tout, la fonctionnalité . . . . .	21
II.4.ii	irréversibilité et frottement mécanique . . . . .	21
II.4.iii	un moteur qui chauffe . . . . .	21

---