7 Machines thermiques

7.1 Définitions et Rappels

- **Machine ditherme :** un système constitué d'un fluide qui effectue un transfert de chaleur entre deux bains thermiques et qui donne lieu à une déformation ou vis versa.
- **Cycle :** correspond à un chemin fermé dans un diagramme. Lors d'un cycle $\Delta Y = 0$ avec Y une fonction d'état quelconque.
- **Rappel :** un processus adiabatique réversible est isentropique, mais un processus adiabatique irréversible n'est pas isentropique
- **Conventions de signe :** Le travail et la chaleur qui entrent dans le système sont positifs. Ceux qui sortent sont négatifs.
- **Processus pour les variations de pression et volume :**
  - **Expansion :** augmentation du volume
  - **Contraction :** diminution du volume
  - **Compression :** augmentation de la pression
  - **Décompression :** diminution de la pression
  - **Détente :** augmentation du volume et diminution de la pression

7.2 Cycle de Carnot

Un **cycle de Carnot** est un un cycle réversible constitué de deux processus isothermes et deux adiabatiques. On appelle une **machine de Carnot** une machine diatherme constitué d'un gaz homogène dans un soufflet fermé mis en contact avec deux sources à température constantes T^- et T^+ fonctionnant selon un cycle réversible de Carnot. Le diagramme d'un cycle de Carnot ressemble donc à ce qui est représenté sur la figure 12.

On rappellera que dans un processus adiabatique, on a $Q_{i\to f} = 0$. Par contre, dans les réactions isothermes, on aura:

$$Q^\pm = Q_{i\to f} = T^\pm(S^\pm - S^\mp) \tag{88}$$

Et comme nous sommes dans un système isolé et fermé, on aura $\Delta U = W + Q = 0$. Dans les cycles de Carnot, on notera que la variations d'entropie $\Delta S = 0$.

On défini maintenant un **cycle moteur** comme un cycle ou la source chaude fournit de la chaleur à un gaz qui en restitue une partie à la source froide et utilise l'autre partie pour réaliser un travail sur l'environnement. De la même façon, un **cycle calorifique** est un cycle où l'environnement effectue un travail sur un gaz qui extrait de la chaleur de la source froide (réfrigérateur) et apporte plus de chaleur à la source chaude (pompe à chaleur).

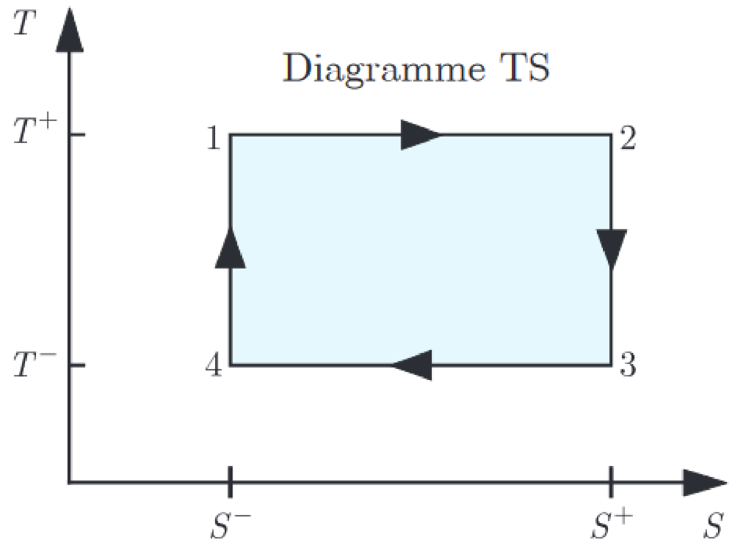

Figure 12: schéma d'un cycle de Carnot type

7.3 Processus réversibles pour le gaz parfait

On rappelle que la variation **d'énergie interne** et la variation **d'entropie** peuvent s'écrire dans un cycle comme:

$$\Delta U_{i\to f} = cNR(T_f - T_i) \qquad \Delta H_{i\to f} == (c+1)NR(T_f - T_i) \tag{89}$$

On peut donc dire que lorsque la température entre l'état final et initial reste constante alors la variation de ces deux variables sera alors égale à 0.

Lors d'un processus **isotherme réversible**, nous pourrons alors noter le **travail** $W_{I\to f}$, la **chaleur** $Q_{I\to f}$ et la **variation d'entropie** $\Delta S_{I\to f}$ comme:

$$W_{I\to f} = -\int_i^f pdV = -NRT\int_{V_i}^{V_f}\frac{dV}{V} = -NRT\ln\frac{V_f}{V_i} = -Q_{I\to f} = -T\Delta S_{I\to f} \tag{90}$$

$$Q_{I\to f} = \Delta U_{I\to f} - W_{I\to f} \tag{91}$$

$$\Delta S_{I\to f} = \int_i^f \frac{pdV}{V} = NR\int_{V_i}^{V_f}\frac{dV}{V} = NR\ln\frac{V_f}{V_i} \tag{92}$$

Ensuite, pour des processus **isobare** ou **isochore**, nous reprendrons les définitions que nous venons d'utiliser ainsi que l'équation 89 afin de déterminer certaines propriétés et résultats remarquables applicable aux processus communs dans les cycles.

7.4 Cycle de Carnot pour le gaz parfait

Nous avons vu dans la figure 12 à quoi ressemblait un diagramme T,S mais il est aussi possible de construire des diagrammes p,V par exemple. Il est donc possible de calculer le rapport entre les pentes de ce diagramme. Pour cela, on rappellera que la dérivée d'une courbe correspond à sa pente au point ou elle est évaluée. On peut alors poser le **rapport des pentes**:

$$\Big(\frac{\partial p(V,S)}{\partial V}\Big)\Big(\frac{\partial p(V,T)}{\partial V}\Big)^{-1} = \frac{\chi_T}{\chi_S} = \frac{C_p}{C_V} = \gamma > 1 \tag{93}$$

et nous utiliserons les équations présentés dans la section 7.3 pour mettre en lien nos différentes variables et ainsi pouvoir connaître la forme de la courbe du diagramme que nous voulons représenter.

Dans un **cycle moteur** du diagramme pV, le cycle est orienté dans le sens des aiguilles d'une montre et au contraire, dans un **cycle calorifique** le cycle est orienté dans le sens trigonométrique. On appelle **machine monotherme** une machine qui n'échangeant de l'énergie par transfert thermique qu'avec un seul thermostat. Une **machine monotherme motrice** est impossible à réaliser. De même, il est impossible de construire une **machine ditherme** qui extrait de la chaleur d'une source froide et restitue de la chaleur à une source chaude sans qu'un travail soit effectué par l'environnement.

7.5 Rendement et efficacités

Afin de caractériser nos machines thermiques, nous allons alors définir le **rendement** d'une machine ditherme fonctionnant selon un cycle moteur comme le rapport du processus sortant et du processus entrant dans la machine, c'est à dire:

$$\eta = -\frac{W}{Q^+} = \frac{Q}{Q^+}(\in [0;1]) = \frac{1}{\epsilon^+} \tag{94}$$

où ϵ^+ est **l'efficacité de chauffage** d'une pompe à chaleur ditherme fonctionnant selon un cycle calorifique est définie comme le rapport du processus sortant et du processus entrant dans la pompe à chaleur. De même on peut définir **l'efficacité de refroidissement** comme:

$$\epsilon^- = \frac{Q^-}{W} = -\frac{Q^-}{Q} = \frac{1-\eta}{\eta} \tag{95}$$

Nous allons encore donner ici quelques résultats utiles pour les **cycles de Carnot**. Leur **rendement**, **efficacité de chauffage** et de **refroidissement** sont alors:

$$\eta_C = 1 - \frac{T^-}{T^+} \qquad \epsilon_C^+ = \frac{T^+}{T^+ - T^-} \qquad \epsilon_C^- = \frac{1-\eta_C}{\eta_C} = \frac{T^-}{T^+ - T^-} \tag{96}$$

7.6 Cycle de Carnot endoréversible et théorème de Carnot

Un **Cycle de Carnot endoréversible** est simplement un cycle de Carnot **irréversible**. On définit le **transfert irréversible de chaleur** : $Q^{\pm}$ entre le gaz à température maximale (resp minimal) $T_0^{\pm}$ et la source chaude (resp froide) à température $T^{\pm}$. Après un temps $\Delta t^{\pm}$ on peut écrire:

$$Q^{\pm} = \int_0^{\Delta t^{\pm}} I_Q^{\pm} dt = I_Q^{\pm} \Delta t^{\pm} = \kappa \frac{A}{l}(T^{\pm} - T_0^{\pm} \Delta t^{\pm}) \tag{97}$$

On notera bien évidemment la **puissance mécanique** $|p_W| = -\frac{W}{\Delta t}$. Afin de maximiser la puissance mécanique de ce cycle de Carnot, nous pouvons trouver les températures optimales $T^{\pm}$ et donc leur rendement maximal:

$$T_0^{\pm} = \frac{T^{\pm}}{2}\left(1 + \sqrt{\frac{T^{\mp}}{T^{\pm}}}\right) \qquad \eta_{EC} = 1 - \frac{T_0^-}{T_0^+} = 1 - \sqrt{\frac{T^-}{T^+}} \tag{98}$$

Enfin la **loi de Carnot** nous dit que Le rendement η d'une machine ditherme quelconque opérant entre une source froide à température T^- et une source chaude à température T^+ est inférieur ou égal au rendement η_C du cycle de Carnot réversible:

$$\eta \leqslant \eta_C = 1 - \frac{T^-}{T^+} \tag{99}$$

Comme d'habitude, je vous encourage à aller voir dans les slides pour les application de ce chapitre mais je ne pense pas que celles-ci ont leur place dans un résumé comme celui-ci. Cela vous permettrai de bien comprendre comment utiliser les différents principes abordés ici.