

Fiche numéro 10

Machines thermiques

2 avril 2009

1 Généralités

- ▶ Une machine thermique est décrite par un **cycle** formé de transformations élémentaires bien recensées dans la section suivante (telles qu'une variable ou fonction d'état reste constante).
- ▶ Chaque transformation se fait dans une « unité » technologique qui apparaît sur le schéma général de la machine (cependant, aucune connaissance relative à la symbolique de ces unités n'est exigible).
- ▶ Chaque transformation est caractérisée par l'état initial (P_k, T_k, V_k ou v_k ou V_{m_k} , éventuellement le titre massique en vapeur x_k), l'état final ($P_{k+1}, T_{k+1}, V_{k+1}$ ou v_{k+1} ou $V_{m_{k+1}}$, éventuellement le titre massique en vapeur x_{k+1}), la chaleur Q_k et le travail W_k reçus par le fluide.
- ▶ Pour chacune, la tradition est de demander une fois sur deux de calculer l'état final connaissant les chaleur et travail reçus, une fois sur deux de calculer chaleur et travail à partir de la connaissance des états initial et final.
- ▶ Bref, chaque transformation forme à elle-seule un petit exercice de thermodynamique.
- ▶ Pour chaque transformation, $\Delta U_k = W_k + Q_k$; sur le cycle :

$$\Delta U = \sum_k \Delta U_k = 0 \quad \text{et} \quad \Delta S = \sum_k \Delta S_k = 0$$

On en déduit souvent les lois théoriques sur les machines (Carnot en particulier).

- ▶ Le **rendement** ou l'**efficacité** est

$$\eta = \frac{\text{Energie utile}}{\text{Energie couteuse}}$$

À un certain niveau, la vraie difficulté est la définition de cette fraction. On peut retenir que :

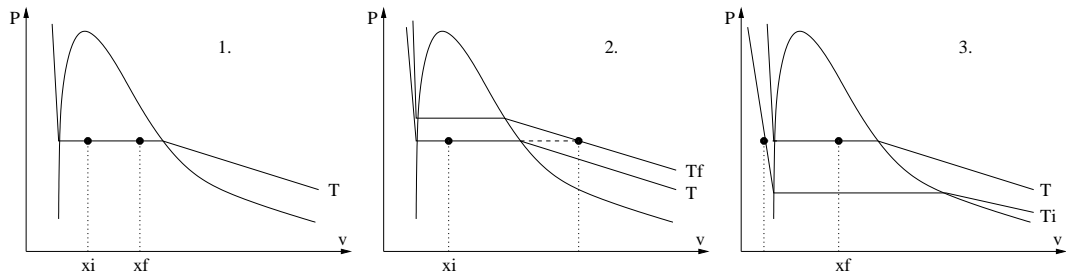
- pour un moteur, la grandeur utile est le travail et on ne peut pas déconnecter l'arbre moteur du piston : le travail est donc le travail total sur le cycle et l'énergie utile (le travail fourni) est l'opposé de ce travail (reçu) ;
 - pour un moteur, l'énergie couteuse est celle correspondant à la combustion ou à l'explosion du carburant ; les chaleurs perdues sont parfois récupérées, et viennent diminuer la chaleur couteuse ;
 - pour une machine produisant du chaud ou du froid avec une prise de courant, l'énergie utile est l'opposé de la chaleur cédée pour les pompes à chaleur ou reçue pour les réfrigérateurs ou climatiseurs au niveau de l'une des unités (un échangeur) ;
 - pour une machine produisant du chaud ou du froid avec une prise de courant, l'énergie couteuse est celle correspondant à la prise électrique, en général au niveau d'un compresseur ; les travaux perdus sont parfois récupérés (turbine au niveau du détenteur), et viennent diminuer le travail couteux.
- ▶ Dans le diagramme (P, V) ou (P, v), les cycles moteurs sont décrits dans le sens des aiguilles d'une montre (moyen mnémotechnique : quasi-anagramme *moteur = montre*), les cycles thermiques dans l'autre sens.

2 Les principales unités

- ▶ Isotherme : T constante compression ou détente avec source interne de chaleur ou lente au contact d'un thermostat
- ▶ Isochore : V constante explosion (réchauffement quasi-instantané)
- ▶ Isobare : P constante détente avec poussée constante sur un piston ou refroidissement ou réchauffement isobare dans un échangeur (tuyau serpentant)
- ▶ Isoénergétique : U constante détente de Joule Gay-Lussac (rare dans les machines)
- ▶ Isenthalpique : H constante détente de Joule-Thomson, tuyau de diamètre réduit ou obstrué par une paroi poreuse
- ▶ Isentropique : S constante adiabatique réversible, compression ou détente avec un piston se déplaçant lentement devant la vitesse du son (vitesse d'homogénéisation de la pression) mais assez vite pour que les transferts thermiques (très lents) n'aient pas le temps de se faire.

3 Les grandes lois pour chaque transformation

- ▶ On distingue les transformations
 - à l'état de vapeur
 - à l'état liquide (condensé)
 - avec changement d'état.
 Ces trois types de transformations peuvent utilement être représentées sur un diagramme de Clapeyron (P, v) ou de Watt (P, V) à condition, s'il y a changement d'état, de tracer au préalable la courbe de saturation et les isothermes d'Andrews.
- ▶ Pour faciliter les calculs, la coutume est d'assimiler les gaz à des gaz parfaits, les liquides à des corps incompressibles.
- ▶ Cas des gaz parfaits l'état est caractérisé par 3 variables (P, V, T) : on obtient 3 équations en écrivant
 1. la valeur de l'une des grandeurs données par l'énoncé (P_f, V_f, T_f, Q, W)
 2. l'équation d'état des gaz parfaits à l'état final
 3. le premier principe (remplacé par la loi de Laplace si adiabatique réversible) avec $dU = nC_{V,m}dT = mc_VdT$ et $dH = nC_{P,m}dT = mc_PdT$.
- ▶ Cas des transformations à l'état liquide $dV \simeq 0$ et dans le premier principe, $dU \simeq dH = nC_m dT = mcdT$.
- ▶ Cas du changement d'état On peut avoir un état initial et final diphasé (figure 1), un état initial diphasé et un état final vapeur sèche (figure 2) ou un état initial liquide non bouillant et un état final diphasé (figure 3).



Dans les états diphasés, le titre massique en vapeur x peut être calculé grâce au théorème des moments. On démontre alors (grandeurs massiques) :

1. $q = \Delta h = (x_f - x_i)\ell_v$ et $\Delta S = \frac{(x_f - x_i)\ell_v}{T}$;
 2. $q = \Delta h = (1 - x_i)\ell_v + c_P(T_f - T)$ et $\Delta S = \frac{(1 - x_i)\ell_v}{T} + c_P \ln \frac{T_f}{T}$;
 3. $q = \Delta h = c(T - T_i) + x_f\ell_v$ et $\Delta S = c \ln \frac{T}{T_i} + \frac{x_f\ell_v}{T}$.
- ▶ Si on rencontre une transformation « exotique », on peut en dernier ressort tenter de la décomposer en plusieurs transformations élémentaires.