

- 1) Diffusion thermique en cours et en exercices.
- 2) Thermodynamique des fluides en écoulement. Bilans de masse, d'enthalpie et d'entropie pour des systèmes ouverts en régime stationnaire en question de cours uniquement.

### Thermodynamique des fluides en écoulement. Application aux machines thermiques

#### I. Notions de thermodynamique des fluides

- Cas de l'équilibre thermodynamique : variables d'état, identités thermodynamiques :  $du = Tds - PdV$  et  $dh = Tds + vdp$ . Application : construction des entropies massiques d'une phase condensée idéale et d'un gaz parfait.
- Cas d'un fluide en écoulement : champs de température  $T(M, t)$  et de pression  $P(M, t)$ . Vitesse macroscopique  $\vec{c}(M, t)$ , volume massique local  $v(M, t)$  et masse volumique locale  $\rho(M, t)$ . Énergie interne, énergie cinétique macroscopique et énergie potentielle macroscopique de pesanteur d'un volume  $V$  de fluide. Énergie totale  $E$  et entropie  $S$  d'un volume  $V$  de fluide :
- Énoncés généraux du premier et du second principe de la thermodynamique. Entropies échangée et créée.

#### II. Application à l'étude d'un système ouvert en régime stationnaire

- Système ouvert en régime stationnaire.
- Débits massique à l'entrée et en sortie :  $D_{me}$  et  $D_{ms}$ . Lois de conservation de la masse :  $\delta m_e = \delta m_s = \delta m$  et  $D_{me} = D_{ms} = D_m$ .
- Premier principe industriel ou bilan enthalpique. Démonstration. Bilan par unité de masse de fluide entrante ou sortante de la

machine et bilan de puissance :

$$D_m \left[ \frac{c^2}{2} + h + gz \right]_e^s = P_u + P_{th}$$

et

$$\left[ \frac{c^2}{2} + h + gz \right]_e^s = w_u + q$$

- Deuxième principe industriel ou bilan entropique : par unité de temps et par unité de masse de fluide entrante ou sortante de la machine :

$$D_m (s_s - s_e) = \tau_E + \tau_C \quad \text{et} \quad (s_s - s_e) = s_E + s_C$$

- Exemples de la détente de Joule-Thomson (détendeur), du compresseur et de la turbine.
- Transformation isentropique d'un gaz parfait : lois de Laplace.
- Généralisation des premier et seconde principes industriels à des machines à plusieurs entrées et sorties.

#### III. Changement d'état d'un fluide

- Diagramme  $(T, P)$ . Variables d'état d'un fluide monophasé  $(m, T, P)$ , d'un fluide diphasé  $(m, T$  ou  $P, \text{fraction massique } x_\ell \text{ ou } x_g)$ .
- Théorème des moments :

$$Y = m (x_g y_g(T, P_s(T)) + x_\ell y_\ell(T, P_s(T)))$$

- Diagramme de Clapeyron. Courbe de saturation. Palier de changement d'état isotherme et isobare.

- Diagramme  $(h, \ln P)$  (diagramme des frigoristes). Courbe de saturation, allures des isothermes, isentropiques. Théorème des moments pour l'enthalpie. Chaleur latente massique de vaporisation :

$$\ell_v(T) = h_g(T) - h_\ell(T) = T (s_g(T) - s_\ell(T))$$

#### IV. Application à l'étude d'une pompe à chaleur ou d'un réfrigérateur

- Bilans enthalpique et entropique
- Bilan complet pour toute la machine. Efficacités. Efficacités théoriques maximales.

#### QUESTIONS DE COURS

1. Définir  $\vec{j}_Q$  et son lien avec la chaleur qui traverse une surface  $S$ . Énoncer la loi de Fourier. Donner des ordres de grandeur de  $\lambda$ . Discuter la direction et l'orientation de  $\vec{j}_Q$ . Nécessité du signe  $-$ .
2. Établir des bilans d'énergie (premier principe) sur des tranches mésoscopiques, avec ou sans terme source  $p_v$  dans les trois systèmes de coordonnées : cartésienne, cylindrique et sphérique.
3. Énoncer les conditions au limites (relations de passage) a) à une interface solide - solide. b) à une interface solide - fluide. Dans le premier cas, démontrer la continuité de la composante normale de  $\vec{j}_Q$ .
4. En régime stationnaire, dresser un tableau d'analogies entre la diffusion thermique et l'électromagnétisme, avec les grandeurs analogues. Déterminer la résistance thermique  $R_{th}$  d'une barre isolée latéralement, avec  $T = T(x)$ .
5. Énoncer et démontrer les deux lois d'association des résistances thermiques : en série et en parallèle.

6. Énoncer et établir soigneusement le premier principe industriel (bilan enthalpique) pour une machine en régime stationnaire comprenant une seule entrée et une seule sortie. On se placera dans le cas général où la machine contient des pièces mécaniques mobiles et peut échanger de la chaleur avec le milieu extérieur.

\*\*\*\* Révisions MPSI \*\*\*\*

*Thermodynamique d'une machine ditherme constituée d'un système fluide **fermé** effectuant des cycles en échangeant de la chaleur  $Q_C$  avec une source chaude de température  $T_C$  et de la chaleur  $Q_F$  avec une source froide de température  $T_F$ .*

7. Établir les bilans d'énergie et d'entropie pour un cycle. Inégalité de Clausius. Établir un schéma de fonctionnement de la machine (sens des échanges de chaleur et de travail  $W_{cycle}$ ) dans le cas :
  - a) d'un fonctionnement moteur ;
  - b) d'un fonctionnement comme réfrigérateur ou pompe à chaleur.

Définir le rendement  $r_m$  d'un moteur et les efficacités  $e_R$  d'un réfrigérateur et  $e_P$  d'une pompe à chaleur.
8. Décrire le cycle de Carnot. Énoncer et démontrer le théorème de Carnot pour un moteur cyclique ditherme.
9. Énoncer et établir les théorèmes de Carnot pour un réfrigérateur cyclique ditherme et pour une pompe à chaleur cyclique ditherme.