

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

Les fluides interviennent dans les machines thermiques : turbines, compresseurs, moteurs, réfrigérateurs et pompes à chaleur. Si on souhaite comprendre le fonctionnement de ces machines, il est nécessaire d'aborder la thermodynamique des fluides en écoulement.

I. Notions de thermodynamique des fluides

1) Description thermodynamique d'un fluide

a) Cas de l'équilibre thermodynamique

On étudie un fluide (liquide ou gaz) *sans réaction chimique*. Lorsqu'il est en équilibre thermodynamique c'est à dire :

- en *équilibre thermique* : la température est **uniforme** T ;
- en *équilibre mécanique* : le fluide est **immobile** dans le référentiel d'étude.

Les grandeurs d'état thermodynamiques qui caractérisent un volume V de fluide sont alors :

- la température T ;
- la pression P ;
- le volume V ;
- la masse m (plutôt que nombre de moles n) contenue dans V .

Cependant, ces 4 grandeurs ne sont pas indépendantes car il existe une équation d'état, par exemple :

$$PV = \frac{m}{M} RT$$

pour un gaz parfait. Il n'y a donc que 3 grandeurs d'état indépendantes, appelées *variables d'état*. Dans ce chapitre on choisira systématiquement :

$$T, P \text{ et } m$$

comme variables d'état. Le volume V peut donc s'exprimer en fonction de ces variables et devient une **fonction d'état** :

$$V = V(m, T, P) = m v(T, P)$$

La masse volumique du fluide est :

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v(T, P)} = \rho(T, P)$$

De même, l'énergie interne U , l'enthalpie $H = U + PV$ et l'entropie S seront des fonctions d'état extensives :

$$U = U(m, T, P) = m u(T, P)$$

$$H = H(m, T, P) = m h(T, P)$$

$$S = S(m, T, P) = m s(T, P)$$

On remarque que :

b) Identités thermodynamiques

Entre deux états d'équilibre très voisins, les variations des grandeurs massiques vérifient :

$$du = T ds - P dv \text{ et } dh = T ds + v dP$$

Ces relations sont surtout utilisées pour calculer l'entropie massique du fluide.

2) Cas d'un fluide en écoulement

Lorsque le fluide est en écoulement, la température et la pression varient en fonction de l'espace et du temps et on aura : $T(M, t)$ et $P(M, t)$ (on parle de champ des températures et de champ des pressions). De plus, le fluide n'est plus au repos dans le référentiel d'étude.

Démarche :

On divise le fluide en petits éléments de volume mésoscopiques $d\tau_M$ centrés sur des points M et de masses δm_M . On suppose que la température et la pression sont quasi-uniformes à l'échelle de l'élément de volume $d\tau_M$. On définit ensuite :

- La *vitesse macroscopique* du fluide au point M et à l'instant t :

- La masse volumique locale du fluide en M et à t :

- L'énergie interne δU_M de l'élément de volume fluide $d\tau_M$:

- L'entropie δS_M de l'élément de volume $d\tau_M$:

3) Les différents types d'énergie

L'énergie totale E d'un volume V de fluide (en écoulement ou immobile dans le référentiel d'étude) se décompose toujours en une somme de trois énergies.

a) **Énergie interne**b) **Énergie cinétique macroscopique**

L'énergie cinétique macroscopique d'un élément de volume de fluide $d\tau_M$ est définie par :

$$\frac{1}{2} \delta m_M c^2(M, t) = \frac{1}{2} \rho(M, t) c^2(M, t) d\tau_M$$

L'énergie cinétique macroscopique totale d'un volume V de fluide est la somme des énergies cinétiques macroscopiques des éléments de volumes qui le compose. À un instant t elle s'écrit :

$$E_C^{\text{macro}}(t) = \iiint_V \frac{1}{2} \rho(M, t) c^2(M, t) d\tau_M$$

Remarque :

$\frac{c^2(M, t)}{2}$ est l'énergie cinétique macroscopique **massique** au point M et à l'instant t .

c) **Énergie potentielle macroscopique**

En pratique, la seule énergie potentielle à laquelle on aura affaire est celle de la pesanteur. On suppose que l'accélération de la pesanteur $\vec{g} = -g \vec{e}_z$ est uniforme.

d) **Énergie totale d'un volume de fluide**

L'énergie totale δE_M d'un élément de volume de fluide dans un référentiel (\mathcal{R}) est la somme :

4) Premier principe de la thermodynamique

Énoncé :

Entre deux instants t_1 et t_2 , la variation de l'énergie totale E d'un volume de fluide **fermé** (c'est à dire composé des mêmes molécules pour ces deux instants) vaut :

$$E(t_2) - E(t_1) = W_{1 \rightarrow 2} + Q_{1 \rightarrow 2}$$

Entre deux instants t et $t + dt$ très voisins :

$$dE \stackrel{\text{déf}}{=} E(t + dt) - E(t) = \delta W + \delta Q$$

5) Second principe de la thermodynamique

Énoncé :

Entre deux instants t_1 et t_2 , la variation de l'entropie d'un volume de fluide **fermé** vérifie :

$$S(t_2) - S(t_1) = S_E(1 \rightarrow 2) + S_C(1 \rightarrow 2)$$

Entre deux instants t et $t + dt$ très voisins :

$$dS \stackrel{\text{déf}}{=} S(t + dt) - S(t) = \delta S_E + \delta S_C$$