

um Chapitre : Systèmes ouverts en régime stationnaire

I- Energie et entropie d'un système

1) Equilibre thermodynamique et équilibre thermodynamique local

Un **système thermodynamique** Σ est défini par une surface abstraite \mathcal{S} de taille macroscopique appelée **surface de contrôle**. Celui-ci est constitué par les différents échantillons de matière se trouvant à l'intérieur de \mathcal{S} .

On dit que le système est **fermé** si aucune matière ne traverse sa surface de contrôle, autrement il est **ouvert**.

On dit qu'un système est à l'**équilibre thermodynamique** : si toutes ces conditions sont présentes, il n'y a pas de mouvement macroscopique de matière dans le système ; la température, la pression et le potentiel chimique (de chaque espèce) ont une valeur uniforme dans tout le système.

On dit que l'**équilibre thermodynamique local (ETL)** est réalisé si on peut découper le système en volumes mésoscopiques pouvant être considérés comme des systèmes à l'équilibre.

2) Energie d'un système thermodynamique

L'énergie d'un système, notée E , est par définition $E = E_c + E_p + U$; avec E_c l'énergie cinétique, E_p l'énergie potentielle et U l'énergie interne.

L'**énergie interne** est associée aux mouvements à l'échelle microscopique et aux interactions entre les particules microscopiques. Dans un système Σ à l'équilibre thermodynamique local on définira l'**énergie interne massique**, notée u , tel que : $U(t) = \iiint u(M, t) \mu(M, t) d\tau_M$;

Par analogie on définira l'**énergie cinétique massique**, notée e_c , et l'**énergie potentielle extérieure massique**, notée e_p , tel que : $E_c(t) = \iiint e_c(M, t) \mu(M, t) d\tau_M$ et $E_p(t) = \iiint e_p(M, t) \mu(M, t) d\tau_M$

3) Entropie d'un système thermodynamique

On définira l'**entropie massique** d'un système à l'équilibre thermodynamique local, notée s , comme : $S(t) = \iiint s(M, t) \mu(M, t) d\tau_M$.

II- Les deux principes de la thermodynamique pour un système fermé

1) Le premier principe

Le **premier principe thermodynamique** pour un système fermé, au cours d'une transformation infinitésimale entre deux instants t et $t + dt$ infiniment proches s'écrit :

$$dE = dU + dE_c + dE_p = \delta W + \delta Q$$

avec δW le travail élémentaire et δQ le transfert thermique élémentaire.

On définit la **puissance mécanique** \mathcal{P} et la **puissance thermique** Φ telles que : $\delta W = \mathcal{P} dt$ et $\delta Q = \Phi dt$.

On peut alors écrire le **premier principe en terme de puissances** : $\frac{dE}{dt} = \frac{dE_c}{dt} + \frac{dE_p}{dt} + \frac{dU}{dt} = \mathcal{P} + \Phi$.

2) Le second principe

Le second principe de la thermodynamique introduit une différence entre les transformations **réversibles** et les transformations **irréversibles**.

En effet, le **second principe de la thermodynamique** pour un système fermé, au cours d'une transformation infinitésimale entre deux instants t et $t + dt$ infiniment proches s'écrit :

$dS = \delta S_{ech} + \delta S_{créée}$ avec δS_{ech} l'entropie reçue par Σ tel que $\delta S_{ech} = \frac{Q}{T_{ext}}$ et $\delta S_{créée}$ l'entropie créée tel que $\delta S_{créée} > 0$ si la transformation est irréversible et $\delta S_{créée} = 0$ sinon.

III- Principe de la thermodynamique pour un système ouvert en régime stationnaire

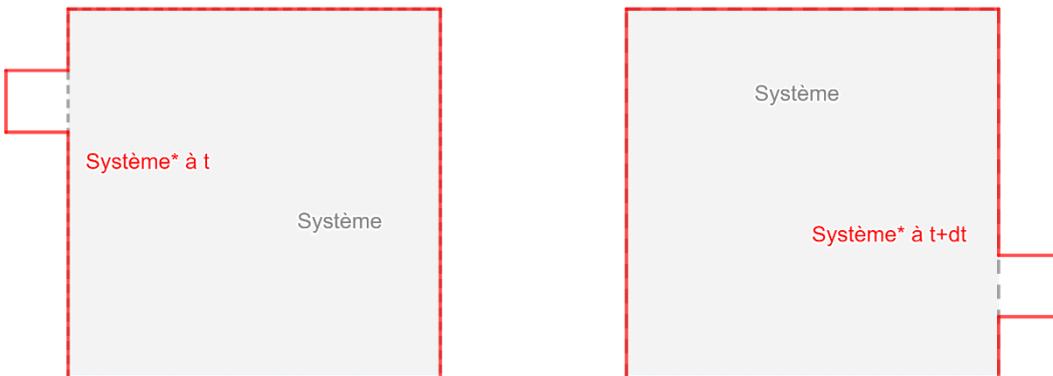
1) Système ouvert

Un système **ouvert** est un système dont la surface de contrôle S est traversée par de la matière.

On définit le **débit massique** d'entrée (resp. de sortie), notée $D_{m,e}$ (resp. $D_{m,s}$), tel que : $dm_e = D_{m,e}dt$ (resp. $dm_s = D_{m,s}dt$).

En **régime stationnaire**, toutes les caractéristiques du fluide contenu à l'intérieur du système sont invariables dans le temps, d'où $D_{m,s} = D_{m,e} = D_m$.

2) Bilan d'une grandeur extensive Y en régime stationnaire



On définit Σ^* comme le système Σ et la réunion de la masse dm .
D'où la grandeur d'état Y_{Σ^*} est liée à Σ^* tel que :
 $dY_{\Sigma^*} = dm(y_s - y_e)$

3) Premier principe pour un système thermodynamique ouvert en régime stationnaire

On définit le **travail massique utile**, notée w_u , celui-ci correspond au travail mécanique massique d'une pièce mobile de Σ , tel que : $\delta W_u = w_u dm$; et le **transfert thermique massique**, notée q , tel que $\delta Q = q dm$.

On en déduit que $w_u = \frac{P}{D_m}$ et $q = \frac{\Phi}{D_m}$.

On écrit le **premier principe industriel**, pour un système ouvert, en régime stationnaire :

$$\Delta h + \Delta e_c + \Delta e_{p,ext} = w_u + q$$

Application à des cas particuliers :

Compresseur, pompe : Un compresseur (resp. une pompe) est un dispositif destiné à accroître la pression d'un gaz (resp. d'un liquide). Le fluide y reçoit de la part de pièces mécaniques mobiles d'un travail, un travail massique $w_u > 0$. Le transfert thermique est le plus souvent négligé, de même pour les variations d'énergies cinétique et potentielle. On écrit le premier principe industriel : $\Delta h \approx w_u > 0$.

Turbine : Le fluide traversant une turbine fournit du travail une pièce mécanique mobile : $w_u < 0$. Sa pression et sa température diminuent. Le transfert thermique est généralement négligeable, de même que la variation d'énergie potentielle. On écrit le premier principe industriel : $\Delta h + \Delta e_c \approx w_u < 0$.

Détendeur : Un détendeur est un dispositif utilisé pour abaisser la pression d'un fluide. Il s'agit d'une soupape ajustable, d'un bouchon poreux ou bien d'un tube capillaire. Le fluide qui le traverse ne reçoit aucun travail car il n'y a pas de pièce mobile et quasiment aucun transfert thermique. Les variations d'énergie cinétique et d'énergie potentielle de pesanteur sont négligeables. On a : $\Delta h \approx 0$.

Tuyère : Une tuyère est un conduit de section variable dont le rôle est d'accroître la vitesse d'écoulement du gaz. Le gaz qui la traverse ne reçoit pas de travail et peu de transfert thermique. La variation de d'énergie massique de pesanteur est négligeable. On a alors : $v_s \approx \sqrt{v_e^2 + 2(h_s - h_e)}$.

Evaporateur, condensateur : Dans un évaporateur ou un condensateur, le fluide ne reçoit pas de travail. Les variations d'énergie cinétique et potentielle de pesanteur sont négligeables. Dans un évaporateur le fluide reçoit un transfert thermique tandis que dans le condensateur il en cède. On a alors : $\Delta h \approx q$.

4) Second principe pour un système thermodynamique ouvert en régime stationnaire

On définit l'**entropie créée par unité de masse**, notée $s_{créée}$, telle que : $\delta S_{créée} = s_{créée} dm$ et l'**entropie échangée par unité de masse**, notée $s_{éch}$, telle que : $\delta S_{éch} = s_{éch} dm$.

On écrit alors le **second principe** pour un système ouvert en régime stationnaire : $\Delta S = s_{éch} + s_{créée}$.

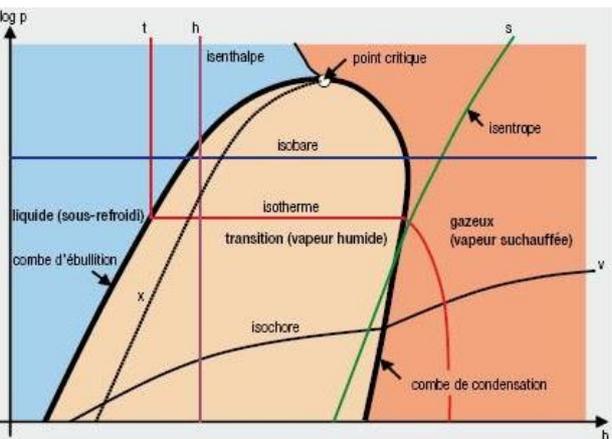
IV- Diagramme $(\ln P, h)$ d'un fluide

1) Principe d'un diagramme thermodynamique

L'état d'un fluide qu'il soit monophasé (liquide ou gazeux) ou diphasé est toujours déterminé par la valeur de deux paramètres ou fonctions d'état intensifs. On peut donc le représenter sur diagramme $(\ln(P), h)$, aussi appelé diagramme des frigoristes.

Ce diagramme comporte différents réseaux de courbes : réseau de courbes isothermes, de courbes isobares, de courbes isochores, de courbes isentropes ou de courbes isenthalpes.

2) Zone d'équilibre entre le liquide et le gaz ; courbe isotitre



Sur le diagramme $(\ln P, h)$, une courbe délimite la zone L+G du diagramme dans laquelle le fluide est diphasé. Cette courbe est en deux parties la **courbe d'ébullition** qui sépare cette zone de la zone où le fluide est liquide ; la **courbe de rosée** qui sépare cette zone de la zone où le fluide est sous forme gazeuse. Ces deux courbes se rejoignent au **point critique**.

Chaque point M sous la courbe correspond à un mélange de **titre massique en gaz** x différent.

En effet on peut écrire $h = (1 - x)h_L + xh_G$

$$D'où \quad x = \frac{h - h_L}{h_G - h_L}$$

3) Le diagramme $(\ln P, h)$ ou diagramme des frigoristes

On observe différents réseaux de courbes :

Les **isobares** sont des droites horizontales

Les **isenthalpes** sont des droites verticales

Les **isothermes** sont des courbes quasi-verticales dans la zone L, des courbes décroissantes dans la zone G et des segments de droites horizontales dans la zone L+G.

Les **isochores** sont des courbes croissantes avec une rupture de pente lorsqu'elles coupent la courbe de rosée.

Les **isentropes** sont des courbes croissantes sans rupture de pente à la limite de la zone L+G.

Les **isotitres** sont quant à elle uniquement présente sous la cloche (zone L+G).