LPOB109 : Bilan de grandeurs physiques dans les systèmes ouverts

intro

Dans de nombreuses machines, il y a un fluide qui circule de façon continue. Il passe d'éléments en éléments (ces éléments pouvant par exemple être un détendeur ou un compresseur pour une machine thermique)

Jusque là les théorèmes étudiés et méthodes permettaient de travailler en systèmes fermés mais les situations évoquées précédemment nécessitent l'introduction de méthode pour des systèmes ouverts, une fois fait → 1er principe thermo + applications

I) Définitions et méthodes

1) ~~Système~~ ~~Définition~~ ouvert.

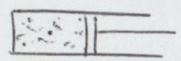
déf : système ouvert = si il échange de la matière avec l'ext.

système fermé = ne peut échanger que de l'énergie.

(!) des systèmes quotidiens (pompes, chaudières ...) admettent fluides par une entrée, subissent échange énergie ou réaction puis rejetés.

2 manières de voir les choses :

- pour un système fermé : on sélectionne un certain nombre de particules : m ne varie pas ⇒ volume qui délimite peut varier mais m non



on peut appliquer les théorèmes.

- pour un système ouvert : on considère une surface de contrôle Σ qui délimite un volume de contrôle V. Attention ≠ instants = pas même particules et pas même masse indépendante de Σ pdt dt.

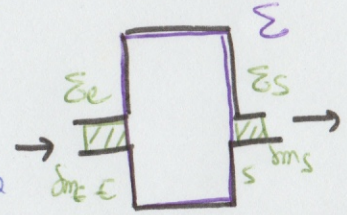
(!) on ne peut pas appliquer les théorèmes de MK ou thermo à ces systèmes car pas système fermé.

→ on va chercher une méthode pour le faire.

2) Choix du système lors d'un écoulement :

- soit Σ volume de contrôle indéformable

cas fréquent : 1 entrée
1 sortie



- traversé constamment par un fluide
- grandeurs intensives massiques : (P, T, h, u, s, ec, ep, ℓ ...)

⇒ système ouvert.

Pour appliquer les théorèmes il faut se ramener à un système Σ* fermé → prend en compte ce qui entre & sort

On définit :

- à t : $(\Sigma^*)_t = (\Sigma)_t \cup (\Sigma_e)$ (système ouvert + masse entrant entre t et t+dt).

système à t

- à t+dt : $(\Sigma^*)_{t+dt} = (\Sigma)_{t+dt} \cup (\Sigma_S)$ (+ masse sortant entre t et t+dt)

Pour la masse :

Étape 1 : définir la surface de contrôle / Étape 2 : définir Σ*

- à t : $m^*(t) = m_\Sigma(t) + \delta m_e$
- à t+dt : $m^*(t+dt) = m_\Sigma(t+dt) + \delta m_s$.

$$\Rightarrow \frac{dm^*}{dt} = \frac{dm_\Sigma}{dt} + \frac{\delta m_s - \delta m_e}{dt} = \frac{dm_\Sigma}{dt} + \overline{D_{m_S} - D_{m_E}}$$

débit massique

Le systèmes* étant fermé $\frac{dm^*}{dt} = 0$

$\Rightarrow \boxed{\frac{dm_\Sigma}{dt} = \mathcal{D}_{me} - \mathcal{D}_{ms}}$

Etape 3 : Appliquer les THM au relat° de MK ou thermo au systm fermé.

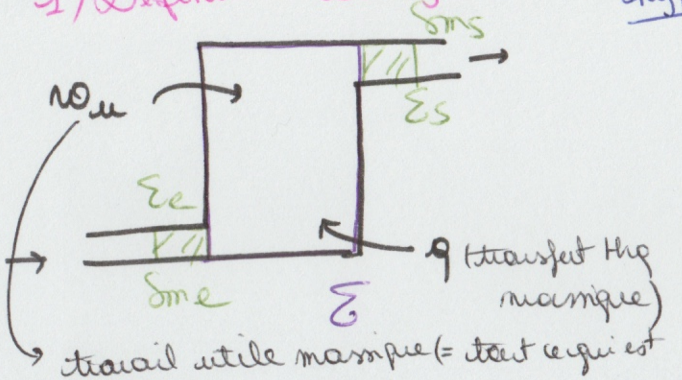
→ se généralise pour : - 1er - 2nd ppe

- TEC, TMC, PFD (TRD)

→ Faire ce genre de bilans pour des grandeurs ... tq NRJ interne ou entropie ⇒ permet d'établir des équivalents des THM connus pour les systm en écoulement ⇒ en thermo ?

II) Bilans thermodynamiques.

1) Définition du système :



"hyp" : - écoulement à travers une machine
- 1 entrée, 1 sortie.
- en régime permanent.

Σ surface de contrôle indéformable

Etape 2

soit S* le systm fermé constitué : à t : de Σ(à t) + δme ; à t+dt : de Σ(à t+dt) + δms

→ on essaye d'établir le 1er ppe pour un fluide en écoulement permanent = premier ppe industriel.

2) Premier principe en écoulement :

• conservation de la masse :

cf précédemment : S* fermé ⇒ $m_\Sigma(t) + \delta m_e = m_\Sigma(t+dt) + \delta m_s$

en régime permanent : $m_\Sigma(t) = cste \Rightarrow \boxed{\mathcal{D}_{me} = \mathcal{D}_{ms} = \mathcal{D}_m}$ (et $\delta m_s = \delta m_e = \delta m$)

• établissement du 1er ppe industriel :

On applique le 1er ppe à S* entre t et t+dt : Etape 3

$dE_c^* + dE_p^* + dU^* = \delta W_{nc,ext} + \delta Q$.

Pour E_c^*, E_p^* et U^* ⇒ $dX^* = X_{S^*}(t+dt) - X_{S^*}(t) =$

$= X_\Sigma(t+dt) + \underbrace{\delta m_s}_{``\delta m"} \cdot x_{\Sigma_s} - X_\Sigma(t) - \underbrace{\delta m_e}_{``\delta m"} \cdot x_{\Sigma e}$

grandeur massique.

Il va être vrai !! NRJ

De plus en régime stationnaire $\frac{dX}{dt} = 0$

$\Rightarrow dX = \delta m (x_{\Sigma_s} - x_{\Sigma e})$

D'où : $\boxed{d(E_c + E_p + U) = \delta m\,(e_{c,s} + e_{p,s} + u_s) - \delta m\,(e_{c,e} + e_{p,e} + u_e)}$

$= \delta m\,[e_c + e_p + u]_e^s$

Pour calculer le second membre :

- transfert thq entrant pdt dt : $\delta Q = \delta m \cdot q$

- le travail : → utile : $\delta W_u = \delta m \cdot w_u$.

→ des forces de pression : $\delta W_p = \delta W_e + \delta W_s + \delta W_\Sigma$

Or $\begin{cases} \delta W_{p\Sigma} = -p\,dV = 0 \text{ car } \Sigma \text{ indéf} \\ \delta W_e = P_e \delta V_e = P_e\, \delta m\, v_e \\ \delta W_s = P_s \delta V_s = P_s\, \delta m\, v_s \end{cases}$

sens de la force de pres° opp.

Enfin on obtient (en notant $\delta w_p = \delta m(u + Pv)$) :

$$\boxed{[e_c + e_p + h]_e^s = w_u + q}$$ 1er ppe industriel.

→ plus NRJ int mais enthalpie ⇒ bilan enthalpique.

OPO ?

3) Second principe en écoulement.

On reprend les mêmes notations, ou cylj $\delta m = cst$.

On applique le second ppe à (S^*) :

$$dS^* = \delta S_{ech} + \delta S_{créé}.$$

Toujours en régime stationnaire donc :

$$dS^* = \delta m (s_s - s_e)$$

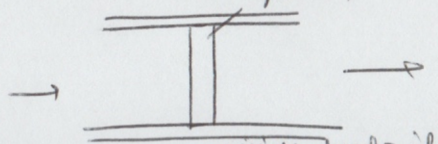
On note : $\delta S_{ech} = \delta m\, s_{ech}$ et $\delta S_{cr} = \delta m\, s_{créé}$.

$$\Rightarrow \boxed{s_s - s_e = \Delta s = s_{ech} + s_{cr}}$$ 2nd ppe en écoulement.

exemple simple d'application :

4) Application à la détente de Joule-Kelvin.

détente de Joule-Kelvin modélise bien la transformation d'un fluide dans un détendeur (but = faire ↘ pression)



3

1er ppe

- δm et section cste ⇒ e_p et e_c inchangées.
- $w_u = 0$ (pas de parties mobiles) et $q = 0$ (parois adiabatiques) ⇒ 1er ppe indus : $\boxed{\Delta h = h_s - h_e = 0}$

transfo isenthalpique

(pour un GP → 2e loi de Joule : $h(T)$ ⇒ pas de variation de T) pour GR T↘.

2nd PPE

adiabatique ⇒ $\delta S_{ech} = 0$ ⇒ $\Delta s = s_{cr}$

On peut définir : $\dfrac{\delta S_{cr}}{dt} = \rho_m s_{cr}$.

ici ⇒ $\dfrac{\delta S_{cr}}{dt} = \rho_m \Delta s$

Pour un GP : $dS = nC_{p,m}\underbrace{\dfrac{dT}{T}}_{=0} - nR\dfrac{dP}{P}$?? pendant détente.

$$\Rightarrow dS = -nR\frac{dP}{P}$$

$$\Rightarrow S_s - S_e = -nR \ln\frac{P_s}{P_e} \Rightarrow \Delta s = \frac{\Delta S}{\delta m} = \frac{R}{M}\ln\frac{P_e}{P_s}.$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{\delta S_{cr}}{dt} = \rho_m \frac{R}{M}\ln\frac{P_e}{P_s} > 0}$$

donc transfo irréversible

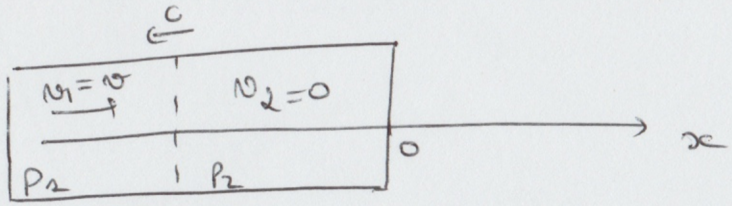
A mettre à dispo !!

→ vu un CP des bilans en systM ouverts. On va voir une application qui regroupe la réalité de plusieurs bilans.

III) Application : onde de choc dans une canalisation :

quand on ferme brutalement une canalisation où écoulement était établi : entend un bruit (coup de marteau)

1) Système étudié :



onde de choc.

- sect° S constante
- écoulement incompressible, unifome, stationnaire de vitesse $\vec{v}_1 = v\,\vec{u_x}$ établi
- on ferme brutalement : $v_2 = 0$ pas atteint instant$^{\text{t}}$.
- 2 écoul$^{\text{t}}$. unifomes et statNR. ⇒ discont $\mu_2 \neq \mu_1$. $P_2 \neq P_1$ + v S discont.

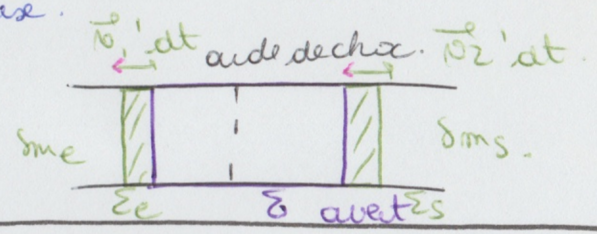
$\boxed{\begin{array}{c} P_2 = ? \\ \cancel{c} = ? \end{array}}$

On se place dans (R') lié à l'onde de choc :

$\vec{v}_1{}' = \vec{v}_1 - (-c\,\vec{u_x})$ $\quad \vec{v}_2{}' = \vec{v}_2 - (-c\,\vec{u_x}) = c\,\vec{u_x}$

$= (v+c)\,\vec{u_x}$.

• déf° du systM.



on déf (S^*) fermé : $\begin{cases} \text{à } t\ (S^*)_t = \Sigma_t + \Sigma_e \\ \text{à } t+dt\ (S^*)_{t+dt} = \Sigma_{t+dt} + \Sigma_s. \end{cases}$

2) Bilan de masse :

$m^*(t) = m_\Sigma^{(t)} + \delta m_e$

$m^*(t+dt) = m_\Sigma(t+dt) + \delta m_s$

$\Rightarrow (S^*)$ fermé $\quad m_\Sigma(t) + \delta m_e = m_\Sigma(t+dt) + \delta m_s$

+ stationR ⇒ $\quad m_\Sigma = cste \Rightarrow \delta m_e = \delta m_s \Rightarrow \delta m_e = \delta m_s$

$\Rightarrow \boxed{\mu_1 (c+v) = \mu_2 c}$

3) Bilan de quantité de mouvement :

$\vec{P}^*(t) = \vec{P}(t) + \delta m_1 \vec{v}_1{}'$

$\vec{P}^*(t+dt) = \vec{P}(t+dt) + \delta m_2 \vec{v}_2{}'$

en projetant selon $\vec{u_x}$:

$P^*(t) = P(t) + \mu_1 S v_1{}' dt \times v_1{}' = P(t) + \mu_1 S (c+v)^2\,dt$.

$P^*(t+dt) = P(t+dt) + \mu_2 S c^2\,dt$.

$\dfrac{dP^*}{dt} = \dfrac{dP}{dt} + \mu_2 S c^2 - \mu_1 S (c+v)^2$

en RP : $\dfrac{dP}{dt} = 0$

(S^*) fermé ⇒ $\dfrac{dP^*}{dt} = \Sigma \vec{F}$ (PFD)

Seules forces exercées : forces de pressions en E et S :
selon axe

$\frac{dP^*}{dt} = p_1 S - p_2 S.$

$\Rightarrow \boxed{\mu_2 c^2 - \mu_1 (c+v)^2 = p_1 - p_2}$

données :
$p_1 = 10^5$ Pa.
$\mu_1 = 10^3$ kg.m^{-3}.
$v = 1$ m.s^{-1}.

inconnues = $\underbrace{p_2, \cancel{v}\ \mu_2 \text{ etc}}_{\times 3}$

mais 2 équa $\Rightarrow$ thermo.

4) Bilan d'entropie : modèle de l'écoulement parfait
$\underbrace{\text{négligé } \phi \text{ diffusifs (viscosité, diff}^{\circ} \text{ thq).}}$

l'équa en entropie est intéressante quand on peut enlever l'entropie créée en S_c.

dans réversible $\Rightarrow S_c = 0$
paroi ~~adiabatique~~ $\Rightarrow S_{ech} = 0$.
$\Rightarrow \Delta s = 0$ isentropique

prend pas compte viscosité
$\left\{ \begin{array}{l} + \text{cond}^{\circ} \text{ thq} \\ \Rightarrow \text{pl-dif}^{\circ}\ dS = 0. \end{array} \right.$
$\Rightarrow \Delta s = 0.$

$\Rightarrow \chi_S = \frac{1}{\mu} \left.\frac{\partial \mu}{\partial p}\right)_S.$

on linéarise car eau peu compressible (autour de μ_1)

$\boxed{\mu_1 \chi_S = \frac{\mu_2 - \mu_1}{p_2 - p_1}}$

3 équa, 3 inconnues. $\Rightarrow \boxed{\begin{array}{l} c(c+v) = \frac{1}{\mu_1 \chi_S} \\ c = \sqrt{\frac{1}{\mu_1 \chi_S}} \end{array}}$

v : 1 m.s^{-1} ; χ_S : 5.10^{-10} Pa^{-1}

$\Rightarrow c = 1,4.10^3$ m.s^{-1} célérité son dans eau.

$\Rightarrow p_2 = p_1 + \mu_1 v (c+v) = 15$ bars

5

ccl : Aurait pu voir que pb car on n'a pas ppt
car variat° brutale de vitesses dans viscosité ∃ donc
faire un bilan d'NRJ int NR.
ne peut pas appliquer thm dans cas ouverts
$\Rightarrow$ méthode pour faire ça $\rightarrow$ surface de contrôle
mais par bilan de quantité de mouv^t (fusée)
ou tuyau arrosage.

Le lcp de systèmes ouverts ∃.

LPOB 21 : Milieux magnétiques : diamagnétisme, paramagnétisme, ferromagnétisme

Prérequis :
- moment magnétique
- μ magnétique des e⁻
- équa de Maxwell ds les milieux
- loi de Lenz
- loi de Faraday
- force de Laplace
- loi de Boltzmann

intro : Les pierres magnétiques (Fe₃O₄ magnétite) sont connues depuis l'antiquité. Elles étaient utilisées comme boussoles pour les marins.

On a d'abord fait des observations des φ magnétiques avant de pouvoir les expliquer.

Ce n'est qu'au fin XIXe début XXe qu'on décrit avec succès les matériaux magnétiques (Curie, Langevin)

Les équations de Maxwell ne peuvent être résolues que si ∃ des relations phénoménologiques (car $\vec{D}$ et $\vec{H}$ inc ⊕)

Cas des milieux linéaires ⊕ fréquent.

→ $\vec{M} = [\underline{\chi_m}(\omega)]\,\underline{\vec{H}}$ → (isotrope) $\underline{\vec{M}} = \underline{\chi_m}(\omega)\,\underline{\vec{H}}$ → (hom/BF) $\boxed{\underline{\vec{M}} = \chi_m \underline{\vec{H}}}$ susceptibilité magnétique

linéaire.

⇒ $\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$

$\vec{B} = \mu_0 \underbrace{(1+\chi_m)}_{\mu_r} \vec{H}$ ⇒ $\boxed{\vec{B} = \mu_0 \underbrace{\mu_r}_{\mu} \vec{H}}$

perméabilité magnétique relative

Tr de la réponse du milieu avec χ_m

1

I) Présentation des milieux magnétiques :

1) Rappels.

- Un matériau est dit magnétique si ∃ $\vec{B}_{ext}$ ⇒ apparition d'un μ magnétique macroscopique.
- On définit le vecteur aimantation : $\boxed{\vec{M} = \frac{d\vec{m}}{d\tau}}$ moment magnétique apparaissant ds l'élément de volume $d\tau$ ds l'action de $\vec{B}_{ext}$.

on peut regarder à l'échelle de l'ordre du molécule

$[M] = A/m = [\vec{H}]$.

apparition de μ mag ⇒ boucles de courant ⇒ ∃ courant d'aimantation : $\boxed{\vec{j}_{liées} = \vec{rot}\,\vec{M}}$

- équation de Maxwell dans les milieux (diapo) dû = spire représentant le moment mag repos

avec notamment $\boxed{\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}}$

excitation magnétique — perméabilité magnétique du vide.

2) Classification des milieux magnétiques :

~~Diversité des milieux ... classification – comportement est ≠~~

- ~~On dire certaines molécules ont un μ au niveau atomique ou non ou pas de repos~~

- Le diamagnétisme : - caractérise les substances qui ne comportent que des atomes non magnétiques (moment magnétique indiv = $\vec{0}$).

- aimantation induite par le champ est très faible et opposée au champ : $\boxed{\chi_m \simeq -10^{-5}}$

- quand $\vec{B} = 0$ ⇒ $\vec{M} = \vec{0}$

exemples de valeurs (diapo) les la plupart des molécules.

- χ_m quasi indép de T.