

Irreversibilité

Niveau .

Pré requis: Thermo: état, sys, gaz parfait, 1^{er} et 2nd principe
Méca: Méca au pr, th de l'énergie mécaniq
Diffusion: conductivité électriq & diffusion thermique.

Biblio: anim portrait de pierre nantes sciences.univ-nantes
Physique PCST Grecus 1^{er} & 2^{ème}
Physique tt en un PCST / PC. Dunod

Intro (pda)

Intro

I? Augmentation d'entropie

Rappel: Système fermé, thermiquement isolé
$$\Delta S \underset{\text{net}}{\geq} 0 \Leftrightarrow S_{\text{max}} \text{ à l'eq.}$$

(2)

L'entropie étant une fct d'état, on peut choisir S et V comme param d'état indép pr décrire un sys monophasé divariant

$$\Rightarrow h_{(S,V)} \Rightarrow dh = \left(\frac{\partial h}{\partial S} \right)_V dS + \left(\frac{\partial h}{\partial V} \right)_S dV$$

T_{th}
température thermodyn

P_{th}
pression thermodynamique

$$\Rightarrow dh = T_{th} dS - P_{th} dV$$

~~Transf~~ élémentaire rev

avec $dS = \frac{\delta Q_{rev}}{T}$ (reversible)

Cas d'une évo monotherme quelconque: bilan entropique

scs chaleur = thermostat de $T_e = cte$ (ex atmosphère)

$$dS_{scs} = \frac{\delta Q_{scs}}{T_e} \quad \text{ici } dU_{scs} = \delta Q_{scs}$$

De pour le sys global: $dS + dS_{scs} \geq 0$

$$\boxed{dS \geq - \frac{\delta Q_{scs}}{T_e}} \quad \text{inégalité de Clausius}$$

pr évo rev: $T = T_e \quad dS = \frac{\delta Q_{rev}}{T}$

évo irrev: $dS > \frac{\delta Q_{irrev}}{T_e}$

$\Rightarrow$ on peut écrire inégalité sous forme de bilan entropique

$$dS = \underbrace{\delta Q_e}_{\text{entropie d'échange}} + \underbrace{\delta S_c}_{\text{entropie de création interne}}$$

$$\text{dc} \quad dS \geq \frac{\delta Q}{T_e} \Rightarrow \delta S_c \begin{cases} \text{irrev} \\ \geq 0 \\ \text{rev.} \end{cases}$$

Pour une transfo finie: $\Delta S = S_e + S_c$

critère de rev: $\delta S_c = 0$

on déduit de ΔS et $S_e = -\frac{Q_{\text{ce}}}{T_e}$; S_c .

• polytherme: $\Delta S \geq \sum_{k=1}^N \frac{Q_k}{T_k}$

$$\Delta S \geq \int_I^F \frac{\delta Q}{T_e}$$

$$\Delta S = S_e = \int_I^F \frac{\delta Q_{\text{rev}}}{T}$$

$$\text{et } S_c = 0$$

$$\Delta S = S_e + S_c \quad \left\{ \begin{array}{l} S_e = \int_I^F \frac{\delta Q_{\text{irrev}}}{T_e} \\ S_c > 0 \end{array} \right.$$

• cycle: $\Delta S_{\text{cycle}} = 0$

$$S_e + S_c = 0$$

$$\frac{Q}{T_e} + S_c = 0 \Rightarrow Q \leq 0$$

D'où l'énoncé historique du 2nd principe (Kelvin ou Thomson)

Un syst fonctionnant de manière cyclique monotherme ($\Delta U = 0 = W + Q$) ne peut recevoir du travail ($W \geq 0$) et fournir de l'énergie thermique ($Q \leq 0$)

2) Échauffement d'un solide par voie irrev.

solide de masse $m = 100 \text{ g}$ de capacité thermique $c =$
température initiale $T_0 =$
finale $T_f =$

(4)

on plonge le solide brutalement le solide ds le thermostat T_g

$$\Delta S = mc \int_{T_0}^{T_g} \frac{dT}{T} = mc \ln \frac{T_g}{T_0}$$

$$S_e = \frac{Q}{T_g} = \frac{mc (T_g - T_0)}{T_g}$$

$$S_c = \Delta S - S_e = mc \left[\ln \frac{T_g}{T_0} - 1 + \frac{T_0}{T_g} \right] > 0$$

$$S_c =$$

- Si on utilise N thermostats successifs de $T^0, T_1, T_2, \dots, T_N = T_g$
le solide passe de l'un à l'autre une fois l'éq atteint.

$$\Delta S_{R+1} = mc \ln \frac{T_{k+1}}{T_k}$$

$$S_{e(k+1)} = \frac{Q_{k+1}}{T_{k+1}} = \frac{mc (T_{k+1} - T_k)}{T_{k+1}}$$

$$S_{c(k+1)} = mc \left[\ln \frac{T_{k+1}}{T_k} - 1 + \frac{T_k}{T_{k+1}} \right]$$

Variation d'entropie ne dép pas du chemin suivi :

$$\Delta S = mc \ln \frac{T_g}{T_0}$$

S_c dep du chemin suivi:

$$S_c = mc \sum_{k=1}^N \left[\ln \frac{T_{k+1}}{T_k} - 1 + \frac{T_k}{T_{k+1}} \right]$$

$$T_{k+1} - T_k = \frac{1}{N} (T_g - T_0) = \epsilon$$

$$S_c = mc \sum_{k=1}^N \left[\ln \frac{T_k + \epsilon}{T_k} - 1 + \frac{T_k}{T_k + \epsilon} \right]$$

$$= mc \sum_{k=1}^N \left[\ln \left(1 + \frac{\varepsilon}{T_k} \right) - 1 + \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon}{T_k}} \right]$$

$$N \text{ infgd } \frac{\varepsilon}{T_k} \rightarrow 0$$

$$\frac{\varepsilon}{T_k} = x_k$$

$$S_c = mc \sum_{k=1}^N \left[x_k - \frac{1}{2} x_k^2 - 1 + 1 - x_k + x_k^2 \right]$$

$$= mc \sum_{k=1}^N \frac{1}{2} x_k^2 > 0$$

S_c est donc d'ordre 2 ; ∞ petit

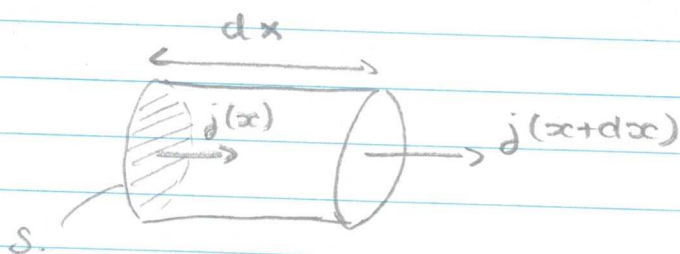
$$\text{rem si } N \rightarrow \infty \Rightarrow S_c \rightarrow 0$$

$\Rightarrow$ on retrouve la transfo rev.

II) Phénomènes diffusifs.

$\rightarrow$ encore ds l'eau.

1) Bilan de particules.



$$\text{nb de particules entrant } \delta N_e = j(x) S dt$$

$$\text{" " sortant } \delta N_s = j(x+dx) S dt$$

$$d^2 N = \delta N_e - \delta N_s = [j(x) - j(x+dx)] S dt$$

$$= -\frac{\partial j}{\partial x} S dx dt$$

d'après la loi de Fick: $j = -D \frac{\partial n}{\partial x}$

$$d^2 N = DS \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} dx dt$$

or si regarde l'accumulat° des particules pendant dt

$$\begin{aligned} d^2 N &= (n_{(t+dt)} - n_{(t)}) S dx \\ &= \frac{\partial n}{\partial t} S dx dt \end{aligned}$$

D'où l'équation locale de diffusion:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}$$

2) Coeff de diffusion du sucre dans l'eau.

À $t=0$ c° en sucre. dep de x selon:

$$c(x, t=0) = c_0 + c_1 \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right)$$

ac c_0 , c_1 et λ des cte.

$$t > 0 \quad c(x, t) = c_0 + f(t) \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right)$$

$$\text{Equation de diffusion: } \frac{\partial c}{\partial t} = D_s \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

$$\Rightarrow f'(t) = -D_s \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 f(t)$$

$$f(0) = c_1, \quad f(t) = c_1 \exp\left(\frac{-t}{\tau_1}\right)$$

$$\text{avec } \tau_1 = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 D_s}$$

$$D_s \text{ en } m^2 s^{-1}$$

τ , homogène à un tps.

Caractéristique d'établissement d'un régime permanent $t \rightarrow \infty$ $c \rightarrow K$

→ figure p116 PC-PC²

Grâce à une méthode de réflect^o on trouve

$$D_s = 2 \times 10^{-10} m^2 s^{-1}$$

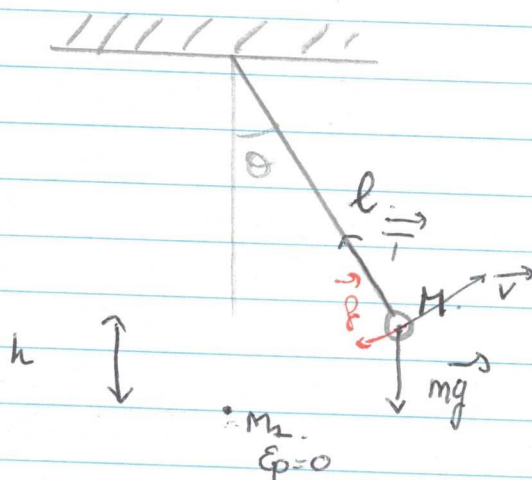
donc si on a une tasse de $10 cm^2$ de ^{surface} d'eau (en hauteur)

$$t = \frac{10^{-2}}{2 \times 10^{-10}} = 0,5 \times 10^8 s$$

dc, pr que le sucre soit totalement diffusé il faut
 $5 \times 10^7 s = 13,889 R$
 $= 578,7 j > 1 an.$

III) Système amorti.

1) exp. au pendule simple amorti.



$$\vec{v} = \frac{d\vec{OM}}{dt} = \frac{d(l\vec{u}_r)}{dt} = l\dot{\theta}\vec{u}_\theta$$

$\vec{T}$ ne travaille pas

$$E_p = mgh \quad \text{et } E_p = 0 \text{ pr } \theta = 0$$

8

$$\vec{f}_d = -\alpha \vec{v} \quad \text{force de frottement dissipative} \\ (= \text{non conservative})$$

Th de l'énergie mécanique:

$$dE_m = \delta W_d = -\alpha \vec{v} \cdot d\vec{r} \\ = -\alpha v^2 dt < 0 \quad (E_m \downarrow)$$

~~avec~~ $E_m = \frac{1}{2} m l^2 \dot{\theta}^2 + mgl(1 - \cos\theta)$ (sans frottement)

dc $dE_m = -\alpha l^2 \dot{\theta}^2 dt$ (car $v = l\dot{\theta}$)

$$\ddot{\theta} + \frac{\alpha}{m} \dot{\theta} + \omega_0^2 \sin\theta = 0 \quad \text{avec } \omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$$

$$\sin\theta \approx \theta$$

pulsation propre

$$\ddot{\theta} + \frac{\alpha}{m} \dot{\theta} + \omega_0^2 \theta = 0$$

2) Modélisation.

$\Rightarrow$ $\neq$ régime ac simulat° sur sciences.nantes

⊕ déphasage.

Conclusion.