

Physique – Chapitre 16 : Gaz Parfait et bilan d'énergie d'un système

B) Effectuer des bilans d'énergie sur un système : Suite

V – Deux lois thermodynamiques particulières

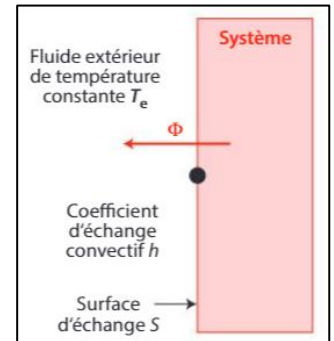
1) La loi phénoménologique de Newton

La loi de Newton modélise l'évolution de la température d'un système au contact d'un thermostat.

Un thermostat est un système capable d'échanger de l'énergie sous forme de transferts thermiques sans que sa température ne soit modifiée. Généralement c'est l'air du milieu extérieur.

Considérons un système incompressible, au repos macroscopique, en contact avec le milieu extérieur de température constante, sans échange de matière, le système ou le milieu extérieur étant fluide. La surface de contact entre le système et le thermostat est notée S . Lorsque le principal mode de transfert thermique est la convection dans le fluide, la loi de Newton modélise le flux thermique Φ à partir d'observation expérimentales. Elle relie le flux thermique Φ à la différence de température entre le milieu extérieur (T_e) et le système considéré (T).

$$\Phi = h \times S \times (T_e - T)$$



Avec Φ en W, S en m^2 , T_e et T en K (ou $^{\circ}C$) et h = coefficient d'échange convectif qui dépend du fluide.

La loi n'est pas à connaître, mais à savoir exploiter.

La loi de Newton permet de faire le bilan d'énergie d'un système incompressible :

On plonge un corps solide, de surface S , de capacité thermique C et de température initiale T_0 dans un fluide formant un thermostat, à la température T_{th} constante.

Pendant la durée Δt , la température du corps varie de $T(t)$ à $T(t + \Delta t)$. La variation de son énergie interne vaut donc $\Delta U(t) = C(T(t + \Delta t) - T(t)) = Q(t)$.

En divisant chaque membre de l'égalité par Δt , on obtient :

$$C \times \frac{T(t + \Delta t) - T(t)}{\Delta t} = \frac{Q(t)}{\Delta t}$$

Or,

$$\frac{Q(t)}{\Delta t} = \phi(t) = h \times S \times (T_{th} - T(t))$$

En faisant tendre Δt vers 0, la variation de température du système en fonction du temps est assimilable à sa dérivée temporelle. On obtient :

$$C \times \frac{dT(t)}{dt} = h \times S \times (T_{th} - T(t))$$

Ou encore, en regroupant les termes fonction du temps et en divisant par C :

$$\frac{dT(t)}{dt} + \frac{h \times S}{C} T(t) = \frac{h \times S}{C} T_{th}$$

On reconnait une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants avec second membre constant.

Rappel :

Soient $a \in \mathbb{R}^*$, G une fonction du temps vérifiant l'équation différentielle $\frac{dG(t)}{dt} = aG(t) + b$

La solution générale de l'équation est la somme $G(t) = C_i e^{at} - \frac{b}{a}$

La donnée à l'origine du temps $G(0) = G_0$ permet de calculer la valeur de la constante d'intégration C_i .

Par identification :

$$a = -\frac{h \times S}{c} \text{ et } b = \frac{h \times S}{c} T_{th}$$

Ainsi

$$T(t) = C_i \times e^{-\frac{hS}{c}t} + T_{th}$$

A $t = 0$, $T(0) = T_0$

$$T_0 = C_i \times e^{-\frac{hS}{c} \times 0} + T_{th} = C_i + T_{th}$$

Donc

$$C_i = T_0 - T_{th}$$

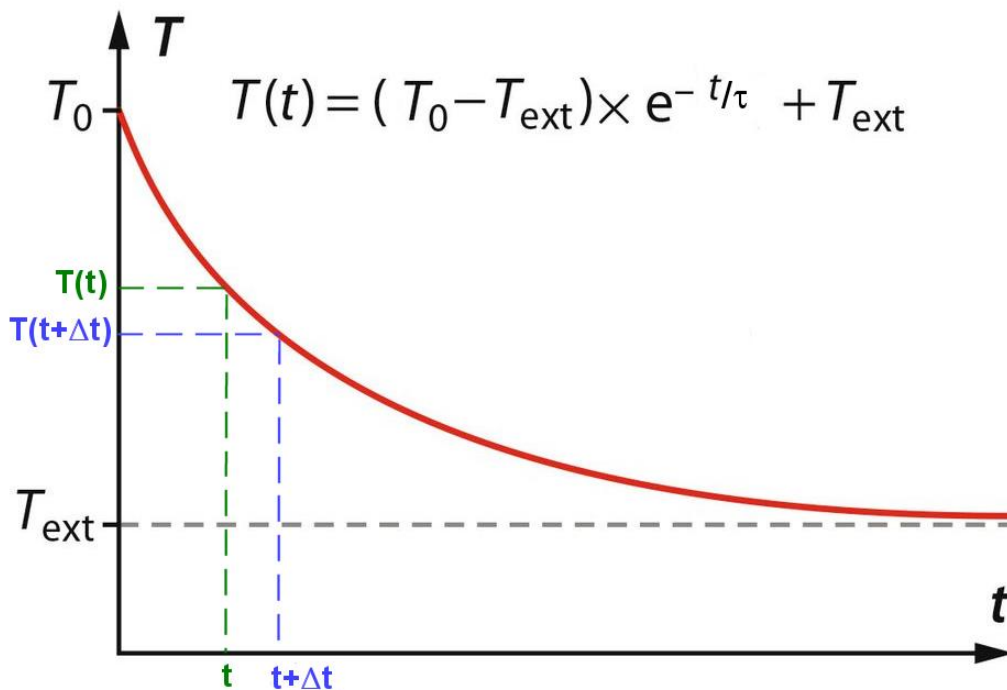
Au final,

$$T(t) = (T_0 - T_{th}) \times e^{-\frac{hS}{c}t} + T_{th}$$

On pose $\tau = \frac{c}{hS}$ = **temps caractéristique de l'évolution de la température du système**, exprimé en seconde.

$$T(t) = (T_0 - T_{th}) \times e^{-\frac{t}{\tau}} + T_{th}$$

La loi indique une convergence de la température du système vers celle du fluide. En effet, quand t tend vers $+\infty$, T tend vers T_{th} .



La courbe d'évolution de la température du système obtenue dans le cas où le système se refroidit (c'est-à-dire $T_{th} < T_0$) est montrée ci-contre.

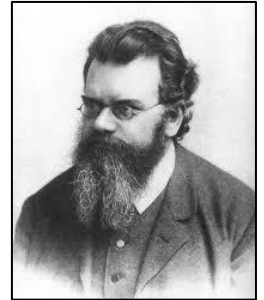
Au bout de $t = 5 \tau$, la température du système est à 99% semblable à celle du thermostat. **Connaitre τ permet donc de calculer des durées de refroidissement ou de chauffage d'un fluide.**

Application : datation d'un décès en médecine légale (voir SL)

2) Loi de Stefan-Boltzmann (Non exigible à l'écrit 2022)



Jozef Stefan (à gauche), physicien, mathématicien et poète austro-hongrois, publie en 1879 la loi sur le rayonnement du corps noir qui lui permet de déterminer la température de surface du Soleil (5430 °C). Son élève, Ludwig Boltzmann (à droite), jeune physicien autrichien, apporte la démonstration théorique de la loi de Stefan qui prend depuis les deux noms.



Tout corps de température non nulle perd de l'énergie par rayonnement. La loi de Stefan-Boltzmann définit la relation qui existe entre le flux thermique (ou la puissance thermique) par unité de surface d'un objet et la température de l'objet considéré comme un "corps noir". Un "corps noir" est un objet idéal qui absorbe toute l'énergie qu'il reçoit, sans en réfléchir ni en transmettre, et qui la réémet intégralement sous forme d'un rayonnement électromagnétique. La puissance par unité de surface (ou puissance surfacique) p émise par un corps noir dont la température de surface est T vaut :

$$p = \sigma \times T^4$$

Avec p en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, T en K et $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$ = constante de Stefan-Boltzmann

Remarque : la loi est parfois exprimée avec la puissance thermique rayonnée $P_{\text{th,ray}}$ (qui est un flux).

$$P_{\text{th,ray}} = p \times S = \sigma \times T^4 \times S$$

Avec $P_{\text{th,ray}}$ en W et S la surface du corps en m^2 .

Une application de cette loi, combinée au premier principe, est d'effectuer le bilan thermique du système {Terre-atmosphère}, permettant d'évaluer la température de surface terrestre T_T avec et sans effet de serre, en considérant un **albédo moyen de 0,3.**

Le chapitre correspondant dans le cours d'enseignement scientifique de première doit être maîtrisé.

La Terre reçoit du Soleil une puissance solaire moyenne p_s d'environ $340 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

On peut estimer que la température terrestre moyenne est globalement stable, et donc dire que la puissance reçue du Soleil p_s est égale à la puissance thermique émise par la Terre p_T :

$$p_s = p_T = \sigma \times T_T^4$$

Ainsi, on calcule $T_T = \left(\frac{p_s}{\sigma}\right)^{1/4} = 278 \text{ K}$ soit $5,2^\circ\text{C}$. On retrouve la température moyenne de la Terre sans Albédo et sans effet de serre.

	$T_T (^\circ\text{C})$
Sans albédo et sans effet de serre	5
Avec albédo et sans effet de serre	-18
Avec albédo et avec effet de serre	15

Or la température moyenne terrestre est de 15°C . Cette valeur diffère de la valeur théorique car la Terre n'est pas un "corps noir", elle réfléchit vers l'espace 30% de l'énergie qu'elle reçoit, phénomène caractérisé par l'**albédo** ($A = 0,3$). De plus, les gaz de l'atmosphère absorbent environ 20% du rayonnement infrarouge émis par le sol conduisant à l'**effet de serre**.

