

X - Introduction à la physique statistique

Prof. Cécile Hébert

12 mai 2025

Plan du cours

- I - Introduction
- II - Premier principe
- III - Second principe
- IV - Fonctions thermodynamiques et équilibres
- V - Gaz parfait et gaz de van der Waals ; théorie cinétique des gaz
- VI - Changements de phases
- VII - Machines thermiques
- VIII - Thermochimie
- IX - Transport
- X - Physique statistique

1. Introduction
2. Définitions, Hypothèses fondamentales
3. Statistique de Boltzman

1. Introduction, motivation

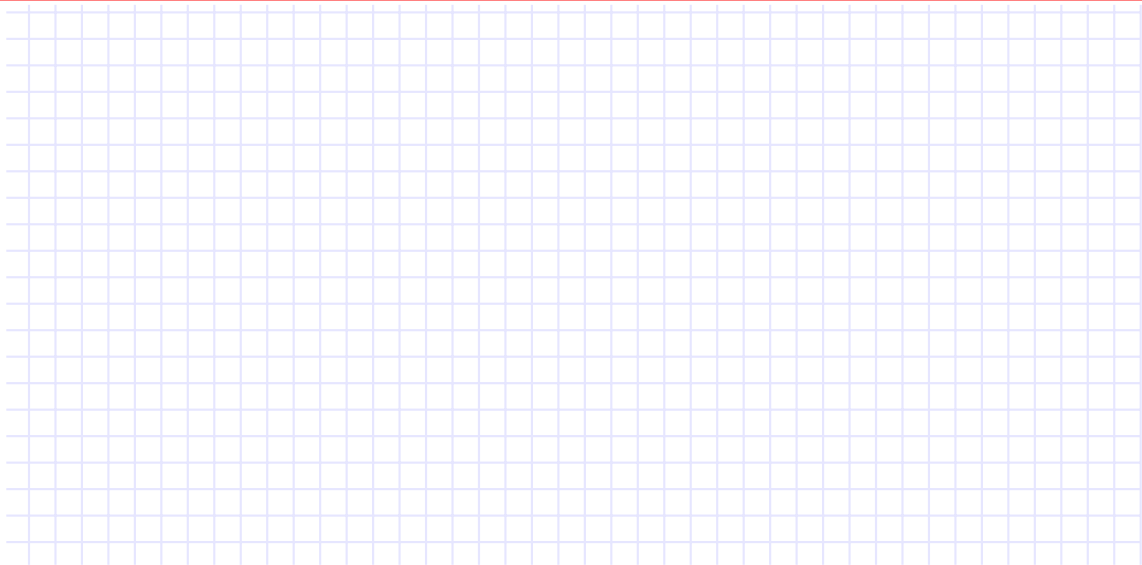
- ▶ On ne peut pas modéliser intégralement un système de 10^{23} particules
- ▶ la thermo classique permet une description macroscopique
- ▶ le but de ce chapitre est de compléter le lien entre microscopique et macroscopique
- ▶ vous aurez un cours entier de physique statistique en 3ème année
- ▶ nous allons voir les implications accessibles de la statistique de Boltzman

2. Définitions, Hypothèses fondamentales

Définition :

On appelle nombre de configurations d'un système dans un état donné, le nombre d'états microscopiques qui ont le même état macroscopique





Hypothèse fondamentale :

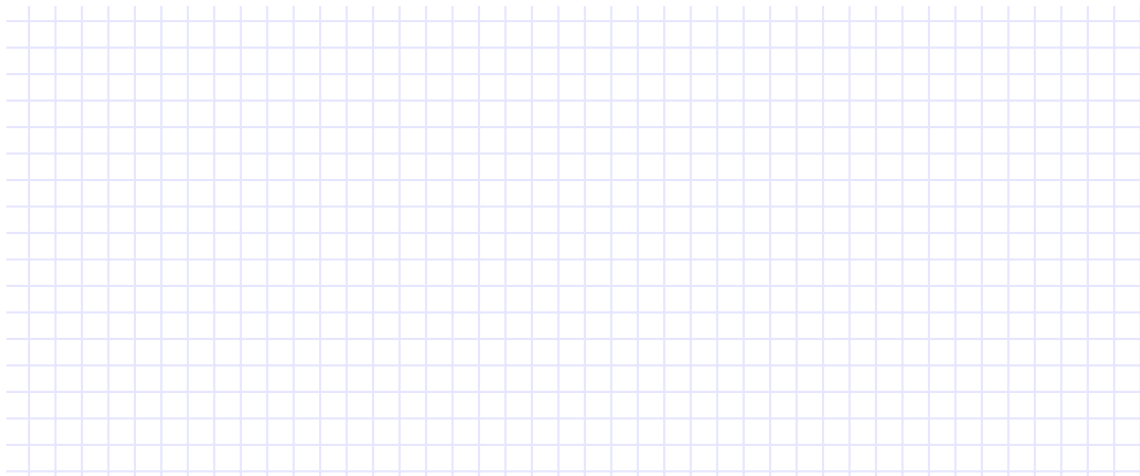
La fluctuation microscopique est très rapide : le système explore les états microscopiques d'un état macroscopique sur une échelle de temps bien plus courts que le temps caractéristique d'évolution des grandeurs macroscopiques

On a une équiprobabilité des états microscopiques



3. Statistique de Boltzman

Entropie de Boltzman : système isolé



Densité de probabilité d'un état d'énergie donnée

$$p(U_1) = \frac{\Omega_1(U_1)\Omega_2(U_0 - U_1)}{\Omega(U_0)}$$

$$S_1(U_1) = k_B \ln \Omega_1 \quad \longrightarrow \quad \Omega_1(U_1) = \exp\left(\frac{S_1(U_1)}{k_B}\right)$$

$$p(U_1)\Omega(U_0) = \Omega_1(U_1)\Omega_2(U_0 - U_1) = \exp\left[\frac{S_1(U_1) + S_2(U_0 - U_1)}{k_B}\right]$$

Développement limité autour de la valeur d'équilibre \bar{U}_1

$$S_1(U_1) = S_1(\bar{U}_1) + (U_1 - \bar{U}_1) \frac{\partial S_1}{\partial U_1} + \frac{1}{2} (U_1 - \bar{U}_1)^2 \frac{\partial^2 S_1}{\partial U_1^2}$$

à l'équilibre entropie max : $\frac{\partial S_1}{\partial U_1} = 0$ en \bar{U}_1 . Pareil pour S_2 .

$$p(U_1) \Omega_0 = \exp \left[\frac{1}{k_B} \left(S_1(\bar{U}_1) + \frac{1}{2} (U_1 - \bar{U}_1)^2 \frac{\partial^2 S_1}{\partial U_1^2} + S_2(U_0 - \bar{U}_1) + \frac{1}{2} (U_1 - \bar{U}_1)^2 \frac{\partial^2 S_2}{\partial U_2^2} \right) \right]$$

$$p(U_1) \Omega_0 = \exp \left[\frac{S_1(\bar{U}_1) + S_2(U_0 - \bar{U}_1)}{k_B} \right] \exp \left[\frac{(U_1 - \bar{U}_1)^2}{2k_B} \left(\frac{\partial^2 S_1}{\partial U_1^2} + \frac{\partial^2 S_2}{\partial U_2^2} \right) \right]$$

Avec

$$\frac{1}{\sigma^2} = -\frac{1}{k_B} \left(\frac{\partial^2 S_1}{\partial U_1^2} + \frac{\partial^2 S_2}{\partial U_2^2} \right)$$

positif car S fonction concave de U ,

$$p(U_1) \propto \exp \left[-\frac{(U_1 - \bar{U}_1)^2}{2\sigma^2} \right]$$

Important ! On a une distribution Gaussienne !



Normalisation (intégrale proba vaut 1) et avec :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-ax^2} dx = \sqrt{\frac{\pi}{a}}$$

$$p(U_1) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(U_1 - \bar{U}_1)^2}{2\sigma^2} \right]$$

U_1 et S_1 extensives donc proportionnelles à N_0 .

Donc $\sigma^2 \propto N_0$ car $1/\sigma^2 \propto S_1/U_1^2 \propto N_0/N_0^2$

Normalisation par le nombre de particules N_0

$$p(U_1) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(U_1/N_0 - \bar{U}_1/N_0)^2}{2\sigma^2/N_0^2} \right]$$

$$\sigma^2/N_0^2 \propto 1/N_0$$

$p(U_1)$ Gaussienne dont la largeur à mi-hauteur est proportionnelle à $1/\sqrt{N_0}$!

Distribution de Boltzman

On cherche la répartition statistique des énergies des particules **dans le gaz**.

Espace des phases : Espace de dimension $6N_p$ représentant les positions et quantité de mouvement de **chacune des N_p particules** . Chaque point de cet espace est un état. chacune de ces configuration microscopique est équiprobable, mais certaines amènent à un même macroscopique donné, et l'état d'équilibre est de loin le plus probable. ρ_x et ρ_p densité des points dans cet espace pour les sous espaces position et quantité de mouvement.

Gaz parfait de particules monoatomiques : l'énergie totale est la somme de toutes les énergies cinétiques de toutes les particules. La position n'a pas d'importance, seule la quantité de mouvement est importante. Pas de rotation.

$$E(x, p) = p^2/2m = (p_x^2 + p_y^2 + p_z^2)/2m$$

Les états de même énergie se trouvent dans une hypersphère de l'espace des quantités de mouvement de rayon $\sqrt{(2mE)}$.

On peut donc calculer $\Omega(U)$ le nombre d'états d'énergie U à δU près : coquille sphériques entre U et $U + \delta U$. Seule la partie sur p change quelque chose sur x on retrouve le volume de l'espace des phases * la densité volumique de points.

$$\Omega(U) = \rho_p \rho_x V^N \frac{3N}{2U} \pi^{3N/2} \frac{(2mU)^{3N/2}}{(3N/2)!} \quad (1)$$

Distribution des vitesses Boltzmann

Densité de probabilité pour une particule d'avoir $p_{1,x}$ obtenue par l'intégration sur un "hyperanneau" de l'expression (1)

$$\rho(p_{1,x}) = \sqrt{\frac{1}{2\pi m k_B T}} \exp\left[-\frac{p_{1,x}^2/2m}{k_B T}\right]$$

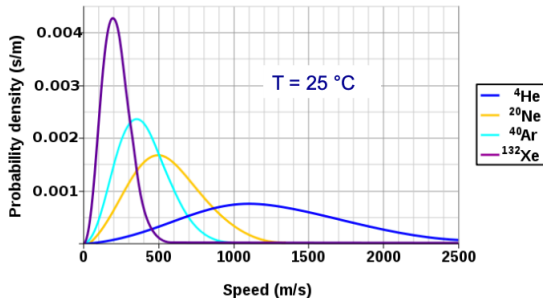
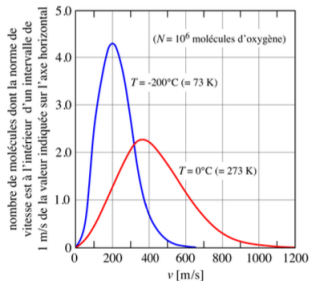
Densité de probabilité pour une particule d'avoir $\vec{v}_1 = v_{1,x}\vec{e}_x + v_{1,y}\vec{e}_y + v_{1,z}\vec{e}_z$

$$\rho(\vec{v}_1) = \left[\frac{m}{2\pi k_B T}\right]^{3/2} \exp\left[-\frac{(1/2)mv_1^2}{k_B T}\right]$$

densité de probabilité pour $|\vec{v}|$ On recommence : on les trouve dans une coquille sphérique de rayon $v...$ mais cette fois 3D

$$p(v) = \left(\frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{3/2} 4\pi v^2 e^{-\frac{(1/2)mv^2}{k_B T}}$$

Maxwell-Boltzmann Molecular Speed Distribution for Noble Gases



Vitesse moyenne

$$v_m = \int_0^{\infty} p(v) v dv = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}}$$

vitesse quadratique moyenne

$$\langle v^2 \rangle = \int_0^{\infty} p(v) v^2 dv = \frac{3k_B T}{m}$$

vitesse la plus probable

$$v_0 = \sqrt{\frac{2k_B T}{m}}$$

Généralisation

Sans échange de matière, pour un système en contact avec un thermostat à T , pour un état s d'énergie E_s , densité de probabilité :

$$p(E_s) \propto e^{-\frac{E_s}{k_B T}}$$

Si plusieurs états ont la même énergie E , $g(E)$ densité d'états d'énergie E

$$p(E) \propto g(E) e^{-\frac{E}{k_B T}}$$

Normalisation : $\int_E p(E) dE = 1$

$$p(E) = \frac{1}{Z} g(E) e^{-\frac{E}{k_B T}}$$