

6.4 Fluctuations d'énergie dans l'ensemble canonique

On a vu que la densité de probabilité de trouver le système à l'énergie E dans l'ensemble canonique est donnée par

$$P_E(E) = \frac{1}{Z} e^{-\frac{E}{T}} \rho(E)$$

où $\rho(E)$ est la densité d'état. L'énergie moyenne est donc donnée par :

$$\langle E \rangle = \int_0^\infty E \cdot P_E(E) \cdot dE = N\varepsilon$$

(ε est l'énergie moyenne par particule), et les fluctuations (l'écart-type) par

$$\sigma = \sqrt{\langle E^2 \rangle - \langle E \rangle^2}$$

L'énergie moyenne peut être exprimée à partir de la fonction de partition Z :

$$\langle E \rangle = -\frac{1}{Z} \frac{\partial}{\partial \beta} Z = -\frac{\partial}{\partial \beta} (\ln Z)$$

De même, on a

$$\begin{aligned} \langle E^2 \rangle &= \frac{1}{Z} \frac{\partial}{\partial \beta} \frac{\partial}{\partial \beta} Z = \frac{1}{Z} \frac{\partial}{\partial \beta} (-Z \cdot \langle E \rangle) \\ &= \langle E \rangle \cdot \left(-\frac{1}{Z} \frac{\partial}{\partial \beta} Z \right) - \frac{\partial}{\partial \beta} \langle E \rangle \\ &= \langle E \rangle^2 - \frac{\partial}{\partial \beta} \langle E \rangle \end{aligned}$$

On en tire que

$$\sigma^2 = -\frac{\partial \langle E \rangle}{\partial \beta} = T^2 \cdot \frac{\partial \langle E \rangle}{\partial T} = T^2 \cdot C_v$$

où $C_v = \frac{\partial \langle E \rangle}{\partial T}$ est la chaleur spécifique, une grandeur extensive proportionnelle à N . En effet, $C_v = N \cdot c_v$ où $c_v = \frac{\partial \varepsilon}{\partial T}$, donc $\sigma^2 \propto N$ et les fluctuations rapportées à l'énergie moyenne :

$$\frac{\sigma}{E} \propto \frac{1}{\sqrt{N}}$$

Quand $N \rightarrow \infty$, la distribution devient donc de plus en plus piquée. Suivant la procédure standard, on peut montrer qu'elle tend vers la loi normale :

$$P_E(E) = e^{\ln P_E(E)}$$

où

$$\ln P_E(E) = \ln [\rho(E) e^{-\beta E}] + cte = \ln [\rho(E)] - \frac{E}{T} + cte = S(E) - \frac{E}{T} + cte$$

On développe S autour de $\langle E \rangle$;

$$S(E) = S_0 + \Delta E \cdot \left. \frac{\partial S}{\partial E} \right|_{\langle E \rangle} + \frac{1}{2} (\Delta E)^2 \cdot \left. \frac{\partial^2 S}{\partial E^2} \right|_{\langle E \rangle} + O(\Delta E^3)$$

où $\Delta E = E - \langle E \rangle$. Les coefficients du développement sont

$$\left. \frac{\partial S}{\partial E} \right|_{\langle E \rangle} = \frac{1}{T}$$

$$\left. \frac{\partial^2 S}{\partial E^2} \right|_{\langle E \rangle} = \left. \frac{\partial}{\partial E} \left(\frac{1}{T} \right) \right|_{\langle E \rangle} = -\frac{1}{T^2} \left(\frac{\partial \langle E \rangle}{\partial T} \right)^{-1} = -\frac{1}{T^2 \cdot C_v}$$

Dans le développement de $\ln P_E(E)$, les termes linéaires s'annulent (par la condition du point selle: $\partial S / \partial E = 1/T$), et on obtient au deuxième ordre :

$$P_E(E) = cte \cdot \exp \left(-\frac{(E - \langle E \rangle)^2}{2 \cdot T^2 \cdot C_v} \right)$$

On retrouve la loi normale centrée en $\langle E \rangle$, et de variance $\sigma^2 = T^2 \cdot C_v$.

6.5 Exemple 1 : gaz parfait monoatomique dans l'ensemble canonique

Le hamiltonien :

$$H = \sum_{i=1}^N \frac{\vec{p}_i^2}{2m}$$

La fonction de partition :

$$\begin{aligned} Z &= \int \frac{d^3 p_1 \cdots d^3 p_N \cdot d^3 q_1 \cdots d^3 q_N}{h^{3N}} e^{-\frac{H}{T}} \\ &= \frac{1}{h^{3N}} \cdot \left(\int d^3 q \right)^N \cdot \left(\int \prod_{i=1}^N d^3 p_i \cdot \exp \left(-\frac{\vec{p}_i^2}{2mT} \right) \right) \\ &= \frac{1}{h^{3N}} \cdot V^N \cdot \left(\int dp \cdot e^{-\frac{p^2}{2mT}} \right)^{3N} = \left(\frac{V (2\pi mT)^{\frac{3}{2}}}{h^3} \right)^N \end{aligned}$$

L'énergie libre, l'entropie, l'énergie totale :

$$\begin{aligned} F &= -T \ln Z = -N \left(T \ln V + \frac{3}{2} T \ln T + T \cdot cte \right) \\ S &= -\frac{\partial F}{\partial T} = N \left(\ln V + \frac{3}{2} \ln T + cte \right) \\ \langle E \rangle &= -\frac{\partial}{\partial \beta} \ln Z = T^2 \frac{\partial}{\partial T} \ln Z = \frac{3}{2} NT \end{aligned}$$

Pour la pression, on obtient :

$$p = -\frac{\partial F}{\partial V} = \frac{NT}{V}$$

et donc on retrouve la loi du gaz parfait $PV = NT$.

Notons juste que S ainsi que F ne sont pas extensives à cause du facteur $N \ln V$ (particules discernables!). Il faut encore introduire le facteur correctif de Gibbs :

$$\begin{aligned} Z &\rightarrow \frac{1}{N!} Z \\ F &\rightarrow F + T \ln(N!) \simeq F + TN (\ln N - 1) \\ S &\rightarrow S + N (1 - \ln N) \\ \langle E \rangle &\rightarrow \langle E \rangle \\ p &\rightarrow p \end{aligned}$$

Ce facteur n'a aucune conséquence sur la loi des gaz parfaits. Plus généralement, il n'a pas de conséquences sur toutes les grandeurs calculées à N constant.

6.6 Exemple 2 : Paramagnétisme d'un dipôle magnétique

En général, on distingue deux comportements de la matière lorsqu'elle est soumise à un champ magnétique extérieur :

1. Paramagnétisme : les atomes de nombreuses substances possèdent un moment magnétique permanent $\vec{\mu}$. Si une telle substance est soumise à un champ magnétique extérieur \vec{H} , les dipôles ont tendance à s'aligner dans la direction de \vec{H} de telle sorte que l'énergie potentielle de chaque dipôle $-\vec{\mu} \cdot \vec{H}$ soit minimale.
2. Diamagnétisme : c'est un effet quantique faible (sauf pour les supraconducteurs); le moment magnétique induit s'oppose à \vec{H} .

Modèle : N dipôles indépendants de même intensité sur lesquels on applique un champ \vec{H} suivant l'axe z .

Le Hamiltonien (d'un dipôle) :

$$H = -\vec{\mu} \cdot \vec{H}$$

Le moment magnétique moyen (l'aimantation) :

$$\langle \vec{\mu} \rangle = \vec{M}(\vec{H}, T)$$

Pour écrire la fonction de partition on intègre sur les configurations possibles du système :

$$Z = \int d\Omega \cdot e^{-\beta E}$$

où l'intégrale est prise sur toutes les directions du moment $\vec{\mu}$. Soit $\theta = \angle(\vec{H}, \vec{\mu}) \Rightarrow d\Omega = \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\phi$, donc

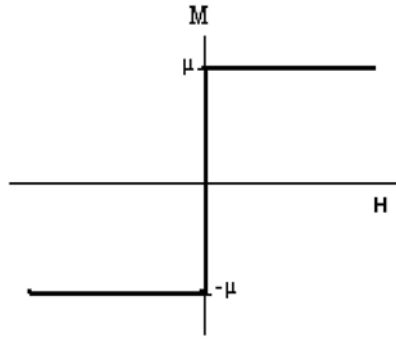
$$Z = 2\pi \int_0^\pi d\theta \cdot \sin \theta \cdot e^{-\beta H \mu \cos \theta} = \frac{4\pi}{\alpha} \cdot \sinh \alpha$$

où $\alpha = \frac{H\mu}{T}$.

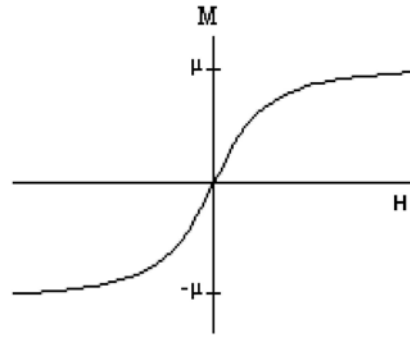
$$\begin{aligned}
 F &= -T \ln Z = T \ln \left(\frac{\alpha}{4\pi} \right) - T \ln (\sinh \alpha) \\
 \langle E \rangle &= -\frac{\partial \ln Z}{\partial \beta} = -H\mu \frac{\partial}{\partial \alpha} (-\ln \alpha + \ln (\sinh \alpha)) \\
 &= H\mu \left(\frac{1}{\alpha} - \coth \alpha \right)
 \end{aligned}$$

Or $\langle E \rangle = -\vec{H} \cdot \langle \vec{\mu} \rangle$, donc

$$M = \mu \cdot \underbrace{\left[\coth(\alpha) - \frac{1}{\alpha} \right]}_{\langle \cos \angle(\vec{M}, \vec{H}) \rangle}$$



T nulle



T non nulle

On remarque que $M \sim \mu$ (l'aimantation sature dans la direction de \vec{H}) à partir de $\alpha \sim 1$, i.e. pour $\mu H \gtrsim T$.

7 Théorèmes du viriel et de l'équipartition

7.1 Théorème du viriel

7.1.1 Théorème :

De façon très générale, on peut énoncer le théorème suivant (théorème du viriel) :

$$\left\langle x_i \frac{\partial H}{\partial x_j} \right\rangle_{canonique} = T \delta_{ij} \quad (1)$$

où H est le hamiltonien et les x_i sont des coordonnées dans l'espace des phases (des positions ou des impulsions).

7.1.2 Preuve :

$$\begin{aligned} Z \cdot \left\langle x_i \frac{\partial H}{\partial x_j} \right\rangle &= \int x_i \frac{\partial H}{\partial x_j} e^{-\frac{H}{T}} d\Omega = -T \int x_i \frac{\partial}{\partial x_j} \left(e^{-\frac{H}{T}} \right) d\Omega \\ &= (\text{par parties}) = T \int \frac{\partial x_i}{\partial x_j} e^{-\frac{H}{T}} d\Omega = T \cdot \delta_{ij} \int e^{-\frac{H}{T}} d\Omega \end{aligned}$$

On a fait l'hypothèse que $\lim_{x_j \rightarrow \text{bord}} H \rightarrow \infty$.

7.1.3 Application : gaz avec interaction

$$H = \underbrace{\sum_i \frac{\vec{p}_i^2}{2m}}_{E_{cin}} + \underbrace{\sum_{i < j} U(|\vec{q}_i - \vec{q}_j|)}_{\text{interaction}} + \underbrace{\sum_i \Psi(\vec{q}_i)}_{\text{confinement}}$$

$$\left\langle p_{i,\alpha} \frac{\partial H}{\partial p_{i,\alpha}} \right\rangle = \frac{1}{m} \langle p_{i,\alpha}^2 \rangle = T$$

où $\alpha = x, y, z$.

On en tire que l'énergie cinétique par particule est

$$\langle \varepsilon_{cin} \rangle = \sum_{\alpha} \frac{1}{2m} \langle p_{i,\alpha}^2 \rangle = \frac{3}{2} T \quad (2)$$

Remarquons qu'on trouve le même résultat que pour le gaz parfait!

La force $\vec{F} = -\vec{\nabla}_q (\text{potentiel})$, mais l'énergie cinétique ne dépend pas des positions q , donc

$$F_{i,\alpha} = -\frac{\partial H}{\partial q_{i,\alpha}}$$

et par le théorème (1)

$$-\frac{1}{2} \left\langle \vec{q}_i \cdot \vec{F}_i \right\rangle = \frac{3}{2} T \quad (3)$$

Les deux expressions (2) et (3) constituent le théorème du viriel pour un gaz en interaction.

Remarque: on peut comparer cette formulation avec le théorème du viriel de la mécanique classique:

$$\langle \varepsilon_{cin} \rangle_t = -\frac{1}{2} \langle \vec{q} \cdot \vec{F} \rangle_t \quad (4)$$

où $\langle \dots \rangle_t$ est la moyenne temporelle.

Dans le cas particulier du gaz sans interactions, ces relations nous donnent la loi du gaz parfait :

le potentiel d'interaction $U = 0$, et le potentiel de confinement garde les particules dans un volume V . Les forces sur les particules ne sont donc causées que par les parois du volume V .

$$\begin{aligned}
\sum_i \vec{q}_i \cdot \vec{F}_i &= - \int_{\partial V} \vec{q} \cdot p \cdot d\vec{S} \\
&= -p \int_V \text{div}(\vec{q}) \cdot dV = -3pV
\end{aligned}$$

où p est la pression (identique sur toute la surface de la paroi) et $d\vec{S}$ est l'élément de surface orienté vers l'extérieur (d'où le signe moins puisque \vec{F} est orienté vers l'intérieur : confinement).

Par le théorème du viriel, on a

$$\sum_i \vec{q}_i \cdot \vec{F}_i = -3NT$$

Donc on retrouve

$$pV = NT$$

7.2 Théorème d'équipartition

En moyenne, chaque "degré de liberté" d'un système à température T possède l'énergie $T/2$.

Attention : Ici par "degré de liberté" on désigne **les termes quadratiques du hamiltonien**, et ce théorème n'est valable que pour des hamiltoniens quadratiques.

Exemple : N particules sans interaction dans un potentiel quadratique.

$$\begin{aligned}
H &= \sum_{\nu=1}^{3N} (A_\nu p_\nu^2 + B_\nu q_\nu^2) \\
\langle H \rangle &= \sum_{\nu=1}^{3N} [\langle A_\nu p_\nu^2 \rangle + \langle B_\nu q_\nu^2 \rangle] = \frac{1}{2} \sum_{\nu=1}^{3N} \left[\left\langle p_\nu \frac{\partial H}{\partial p_\nu} \right\rangle + \left\langle q_\nu \frac{\partial H}{\partial q_\nu} \right\rangle \right] \\
&= \frac{1}{2} \cdot f \cdot T
\end{aligned}$$

où $f = 6N$ est le nombre de termes quadratiques du hamiltonien.