

Chapitre 17 - Thermodynamique

Description thermodynamique d'un système

Vincent Combette

PTSI 2023 - 2024

Deux citations pour commencer

La thermodynamique est une discipline étrange. La première fois que vous la découvrez, vous ne comprenez rien. La deuxième fois, vous pensez que vous comprenez, sauf un ou deux points. La troisième fois, vous savez que vous ne comprenez plus rien, mais à ce niveau vous êtes tellement habitué que ça ne vous dérange plus.

Arnold Sommerfeld, 1940

Une théorie est d'autant plus admirable que ses fondements sont simples, qu'elle se rapporte à des domaines variés et que son domaine d'application est étendu. En ce sens, la thermodynamique classique m'impressionne beaucoup. C'est la seule théorie physique de portée universelle dont je suis convaincu que, tant qu'on s'en tient à son champ d'application, elle ne sera jamais remise en cause.

Albert Einstein, 1949

Ce qu'est la thermodynamique

- Domaine de la physique qui étudie les systèmes **macroscopiques** (c'est-à-dire constitués d'un grand nombre de particules) dans le cadre d'une approche **énergétique**.

Principes de la thermodynamique

R. Clausius, *Théorie mécanique de la chaleur* (1865) :

- 1 L'énergie de l'univers est constante.
- 2 L'entropie de l'univers tend vers un maximum.

Plan

Quels sont les outils nécessaires à la description thermodynamique d'un système ?

- 1 Comment décrire un système de manière microscopique ?
 - Différentes échelles de description
 - Description microscopique d'un gaz parfait monoatomique

Plan

- 1 Comment décrire un système de manière microscopique ?
 - Différentes échelles de description
 - Description microscopique d'un gaz parfait monoatomique

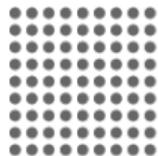
Plan

- 1 Comment décrire un système de manière microscopique ?
Différentes échelles de description
Description microscopique d'un gaz parfait monoatomique

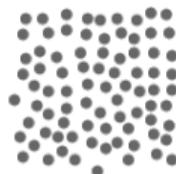
Point de vue microscopique et macroscopique

- Au niveau microscopique :

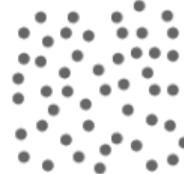
Solide



Liquide



Gaz



↪ Point de vue **discret** : la matière est décrite par les propriétés de ses constituants élémentaires.

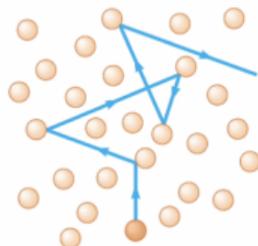
- Au niveau macroscopique :

↪ Point de vue **continu** : la matière est décrite grâce à certaines grandeurs et propriétés.

Quelle description adopter ?

Pour déterminer le point de vue adapté à la modélisation : distance a entre les particules.

- Pour un solide, $a \approx 0,1$ nm
- Pour un fluide, le mouvement des particules est incessant : comment connaître a ?



Libre parcours moyen

Point-clé - Libre parcours moyen

Le libre parcours moyen λ est défini comme la distance moyenne parcourue par une particule entre deux collisions successives.

- Dans un liquide, $\lambda \approx 1$ nm.
- Dans un gaz, (T et P ambiants), $\lambda \approx 0,1 \mu\text{m}$.

Différentes échelles de description

Point-clé - Echelles de description



- Échelle **microscopique** : on se place à l'échelle de a ou λ (point de vue discret).
- Échelle **macroscopique** : on se place à une l'échelle $L \gg a$ ou λ (point de vue continu).
- Échelle **mésoscopique** : on se place à une échelle intermédiaire l telle que $\lambda \ll l \ll L$.

- Échelle mésoscopique : échelle beaucoup plus petite que l'échelle macroscopique, mais suffisamment grande par rapport à l'échelle microscopique pour que la matière y apparaisse continue.

Application

Échelles de description

- 1 Considérons notre salle de cours. Définir, pour cette salle, un volume macroscopique, un volume microscopique et un volume mésoscopique.

- 2 Calculer le nombre de particules dans chacun de ces volumes.

Plan

- 1 Comment décrire un système de manière microscopique ?
Différentes échelles de description
Description microscopique d'un gaz parfait monoatomique

Hypothèses d'étude

Théorie cinétique des gaz : expliquer les propriétés macroscopiques à l'aide de l'étude du comportement microscopique.

Hypothèses du gaz parfait :

- Particules ponctuelles
- Aucune interaction entre elles : la seule contribution à l'énergie est cinétique.

Distribution des vitesses du gaz

Dans un gaz, les molécules n'ont pas toutes la même vitesse. Les vitesses $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots$ des N molécules du gaz suivent une certaine distribution, supposée **homogène** et **isotrope**.

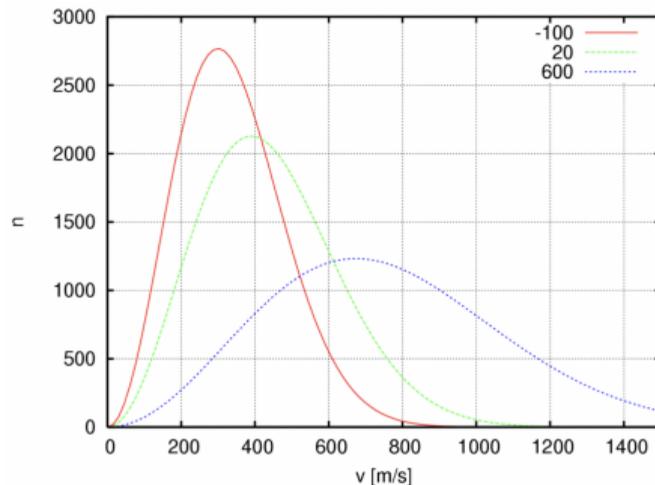


Figure: Distribution des vitesses pour O_2 à $-100^\circ C$, $20^\circ C$ et $600^\circ C$.

Distribution des vitesses d'un gaz

Idée : calculer la valeur moyenne de la vitesse :

$$\langle \vec{v} \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \vec{v}_i$$

Or, la distribution est isotrope : $\langle \vec{v} \rangle = 0 !$

Par contre, la norme de la vitesse est non nulle : $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} > 0$.

Vitesse quadratique moyenne

Point-clé - Vitesse quadratique moyenne



On appelle vitesse quadratique moyenne la grandeur u telle que

$$u = \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2}$$

Lien vitesse et température

↔ Comment faire le lien entre u et T ?

Température cinétique

Point-clé - Température cinétique

La température cinétique d'un gaz parfait est définie à partir de l'énergie cinétique moyenne des particules :

$$\langle E_c \rangle = \frac{1}{2} m u^2 = \frac{3}{2} k_B T \quad \Leftrightarrow \quad u = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

où k_B désigne la constante de Boltzmann : $k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$, telle que $R = k_B \mathcal{N}_A$.

↪ Qualitativement, la température cinétique traduit l'agitation des particules au sein du gaz.

Application

Estimer une vitesse quadratique moyenne

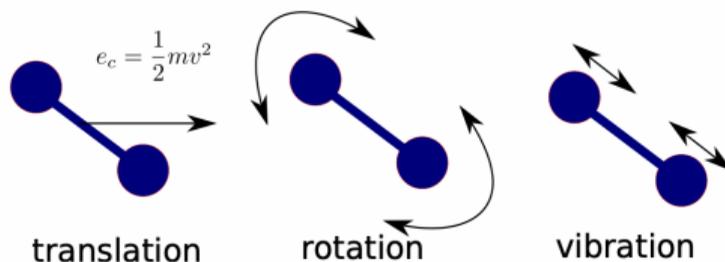
- 1 Estimer la vitesse quadratique moyenne des molécules de l'air à température ambiante ($M_{\text{air}} = 29 \text{ g/mol}$).

- 2 Estimer la vitesse quadratique moyenne de l'hélium à température ambiante ($M_{\text{He}} = 4,0 \text{ g/mol}$).

Énergie interne d'un gaz

L'énergie interne U d'un gaz désigne son énergie totale, dans un référentiel \mathcal{R} où il est au repos.

$$U = E_{\text{cin, translation}} + E_{\text{vibration}} + E_{\text{rotation}} + E_{\text{p,int}}$$



Énergie interne d'un gaz parfait monoatomique

Point-clé - Énergie interne



L'énergie interne U d'un gaz parfait monoatomique est la somme des énergies cinétiques de translation des particules qui le composent :

$$U = N\langle E_c \rangle = \frac{3}{2}Nk_B T = \frac{3}{2}nRT$$