

Premier principe de la thermodynamique et bilan d'énergie

Décrire un système thermodynamique

Définition d'un système

Un système thermodynamique est constitué d'un grand nombre de particules, de l'ordre d'une mole, c'est-à-dire $3,02 \times 10^{23}$ particules. Pour décrire l'état du système thermodynamique, on utilise les grandeurs :

- Pression
- Température
- Volume occupé
- Quantité de matière

Ces grandeurs sont appelées paramètres d'état

Monde microscopique et macroscopique

La pression résulte de la résultante \vec{F} des forces exercées par les chocs des molécules sur la surface S de la paroi.

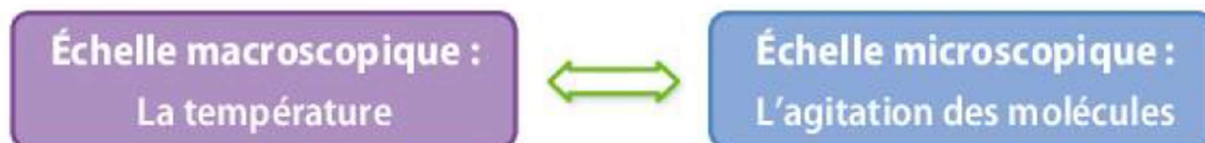


La pression P correspond à une force par unité de surface :

$$P: \text{pression (Pa)} \rightarrow P = \frac{F}{S}$$

F : force pressante (N)
 S : surface (m^2)

- La pression P est une donnée macroscopique liée à la masse des molécules et à leur vitesse.
- La température d'un gaz est liée à l'énergie cinétique des molécules. A une température correspondant au zéro absolu, c'est-à-dire zéro Kelvin, la molécule serait totalement au repos. Elle n'aurait plus d'énergie cinétique.



La température fournit une mesure macroscopique de l'énergie cinétique microscopique des particules.

Modèle du gaz parfait

Hypothèses et modèle

- Les molécules constituant le gaz sont assimilées à des points matériels (on néglige ainsi le volume des molécules).
- Les interactions à distance entre molécules sont négligées (aucune force ne s'exerce ainsi sur les particules en dehors des chocs avec les parois de l'enceinte contenant le gaz)

Il existe une équation d'état simple qui décrit le **modèle du gaz parfait** :

$$p \times V = n \times R \times T$$

p : pression du gaz (Pascal) V : volume (m^3) R : constante des gaz parfaits de valeur $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K} \cdot \text{mol}^{-1}$ T : température (Kelvin)
 n : quantité de matière (mole)

À savoir

Le produit $p \times V$ est équivalent au travail d'une force (J) car :

$$p \times V = \frac{F}{S} \times V = F \times \ell \quad (1 \text{ N} \cdot \text{m} = 1 \text{ J})$$

Limites du modèle

- Si la pression et la masse volumique du gaz à faible pression sont trop importantes, alors le modèle du gaz parfait n'est plus adapté.
- Les interactions électriques du type de van der Waals ou liaison hydrogène ne sont pas prises en compte. Les molécules ne sont pas ponctuelles. On les modélise souvent par des sphères.

Effectuer des bilans d'énergie

L'énergie interne

Approche macroscopique de l'énergie interne

En exerçant une force sur le piston d'une seringue dont l'embout est fermé, on déplace le piston, et le travail de cette force est positif. Le travail de la force exercée s'exprime en Joule. Il représente une énergie. Mais, d'après le principe de conservation de l'énergie, on peut se demander où est passée cette énergie. Si le travail de la force représente une énergie mécanique, on peut se demander où est passée l'énergie mécanique ? A-t-elle été transférée ?

*Le travail de la force représente un **transfert mécanique** d'énergie lié au déplacement du piston.*

*Le gaz enfermé dans le piston est le système qui a reçu cette énergie. Sa pression et peut être sa température ont augmenté. Le gaz contient donc de l'**énergie interne** dont la valeur a nécessairement augmenté.*

On peut élever la température d'un corps en le plaçant au contact d'un autre corps plus chaud.

*Il y a eu transfert d'énergie sans la moindre action mécanique cette fois-ci. On parle alors de **transfert thermique** d'énergie. Le corps dont la température a augmenté a donc vu son **énergie interne** augmenter.*

Approche microscopique de l'énergie interne

Les entités (atomes, molécules, ions) d'un système (corps solide, liquide ou gaz) ne sont jamais immobiles. Dans les gaz et les liquides, ces entités se déplacent librement, et dans le cas des solides les entités se déplacent autour de leur point d'équilibre.

On peut donc attribuer une vitesse à toutes ces entités quel que soit le système étudié. Et comme toutes ces entités ont une masse, on peut leur attribuer aussi une énergie cinétique : $E_{c,micro}$ désigne l'énergie cinétique des entités qui constituent le système.

Entre ces entités, il existe des forces électriques d'attraction (comme par exemple les forces de Van der Waals entre les molécules) et aussi de répulsion puisque des particules chargées de même signe se repoussent.

Ces forces traduisent l'existence de **potentiel d'énergie d'interaction entre les entités**, $E_{p,micro}$

Les entités elles-mêmes sont constituées d'entités plus petites « soudées » les unes aux autres. On parle alors d'énergie de cohésion de la matière, U_0 .

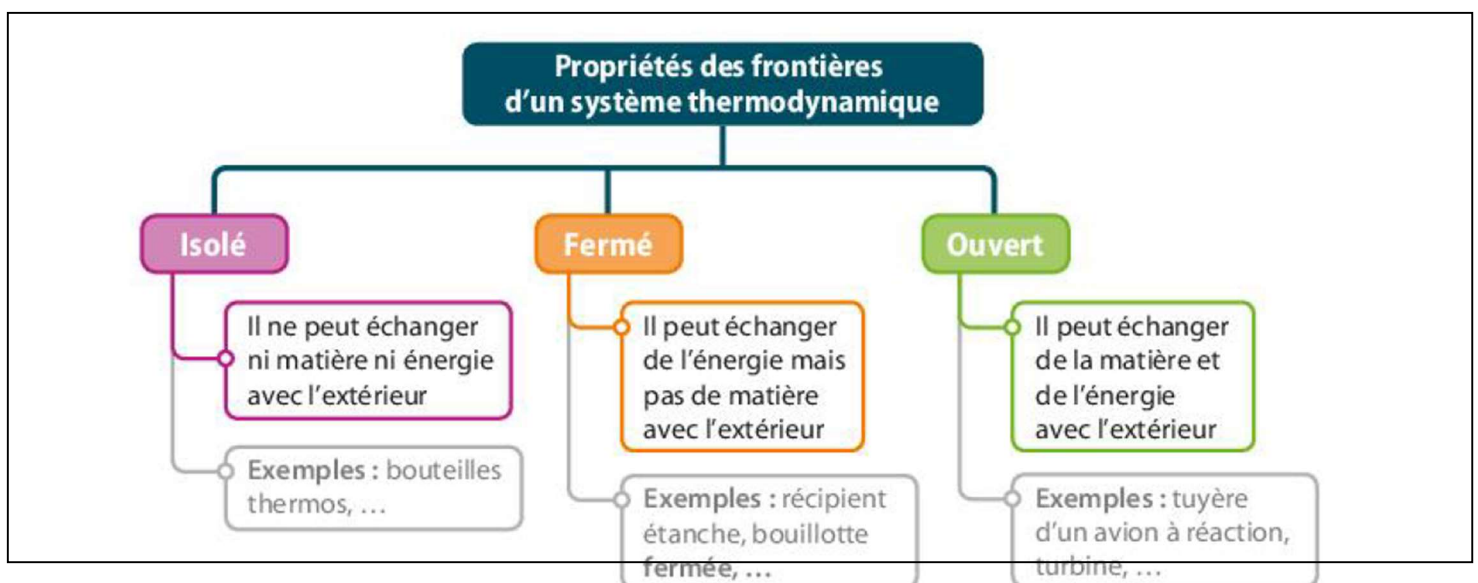
Ainsi, pour un corps solide, un liquide dans un récipient ou bien un gaz enfermé dans une enceinte, tous parfaitement immobile possède une **énergie interne U** constituée d'énergies microscopiques.

$$U = U_0 + E_{c,micro} + E_{p,micro}$$

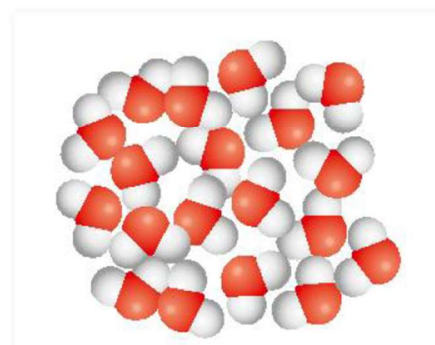
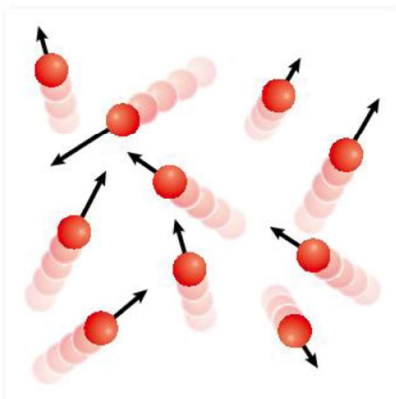
Remarque : Dans le cas d'un gaz parfait, les molécules sont assimilées à de particules ponctuelles, donc $U_0 = 0J$ et il n'y a pas d'interaction entre les particules, donc $E_{p,micro} = 0J$.

Par conséquent, l'énergie interne s'écrit :

$$U = E_{c,micro}$$



On se limitera à des systèmes fermés qui vont donc échanger de l'énergie à travers la frontière mais pas de matière.



Modèle de transfert de l'énergie

Le travail W et le transfert thermique Q sont les deux modes de transfert de l'énergie entre le système et le milieu extérieur.

- Le travail W est un transfert d'énergie qui s'effectue macroscopiquement de manière ordonnée ; il est lié au déplacement du point d'application d'une force s'exerçant sur le système. (Force exercée sur le piston)
- Le transfert thermique Q est un transfert d'énergie qui s'effectue microscopiquement de manière désordonnée entre le système et l'extérieur.
Lorsqu'il existe une différence de température entre l'extérieur et le système, ce transfert d'énergie s'effectue spontanément du corps le plus chaud vers le corps le plus froid.
Un transfert thermique a pour conséquence macroscopique une modification de la température ou un changement d'état physique du système.
- Le travail et le transfert thermique sont des grandeurs algébriques :
 - Comptés positivement s'ils sont reçus par le système
 - Comptés négativement s'ils sont cédés par le système

Exemple d'un conducteur ohmique du bain-marie :



> Le bain-marie permet d'amener l'eau à la température souhaitée grâce à un chauffage homogène. Certains bains-marie peuvent porter l'eau à ébullition.



Le premier principe de la thermodynamique pour un système fermé

Le premier principe de la thermodynamique indique que si un système fermé au repos a son énergie interne qui varie c'est qu'il échange avec l'extérieur de l'énergie soit sous forme de travail W soit sous forme de transfert thermique Q .

$$\Delta U = W + Q$$

ΔU correspond à une variation d'énergie

W et Q correspondent à des transferts d'énergie.

Méthode

Pour établir un bilan d'énergie, il faut :

- **définir le système** au repos macroscopique, l'extérieur est alors le reste de l'Univers, et écrire le premier principe ;
- **relever tous les transferts d'énergie** ayant lieu entre le système et l'extérieur en repérant leur sens ; leur attribuer un signe positif si l'énergie entre dans le système et un signe négatif si elle en sort ;
- **effectuer la somme de tous ces transferts** : si la somme est positive, l'énergie interne du système a augmenté ; si elle est négative, l'énergie interne du système a diminué.

Energie interne d'un système incompressible

Un système est incompressible si sa masse volumique reste constante.

a. Capacité thermique

La capacité thermique C correspond à l'énergie à fournir au système pour élever sa température de 1 Kelvin.

b. Capacité thermique massique

La capacité thermique massique c correspond à l'énergie à fournir à 1 kg du système pour élever sa température de 1 Kelvin ou bien de 1 degré Celsius (cela revient au même).

$$c = \frac{C}{m}$$

Où m représente la masse du système de capacité C

c. Variation d'énergie interne d'un système incompressible

Lorsqu'un système incompressible de masse m et de capacité thermique massique c passe d'une température initiale T_i à une température finale T_f , sa **variation d'énergie interne** $\Delta U_{i \rightarrow f}$ a pour expression :

The diagram shows the formula $\Delta U_{i \rightarrow f} = m \times c \times (T_f - T_i) = m \times c \times (\theta_f - \theta_i)$ with arrows pointing to each term and its units: $\Delta U_{i \rightarrow f}$ in J, m in kg, c in $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ or $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$, T in K, and θ in $^\circ C$.

$$\Delta U_{i \rightarrow f} \text{ en J} \rightarrow \Delta U_{i \rightarrow f} = m \times c \times (T_f - T_i) = m \times c \times (\theta_f - \theta_i)$$

m en kg T en K
 c en $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ou $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ θ en $^\circ C$

La variation d'énergie interne est positive si le système s'échauffe, et négative si le système se refroidit.

Exercices

Exercice 1 : QCM

Exercice 2 : Limite du gaz parfait – Répondre par Vrai ou Faux

Un gaz est parfait :

- a. Si la distance qui sépare deux molécules du gaz est en moyenne très petite
- b. S'il est fortement comprimé
- c. Si le volume qu'il occupe est très grand par rapport au nombre de particules présentes
- d. Si le nombre de chocs entre particules du gaz est élevé

Exercice 3 : Déterminer un volume molaire

1. Exprimer le volume molaire V_m d'un gaz parfait en fonction des données littérales de l'équation d'état.

2. Calculer le volume molaire V_m d'un gaz parfait :

a. dans les conditions normales de température et de pression : $T_a = 273 \text{ K}$ et $P_a = 1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$;

b. dans les conditions standard de température et de pression : $T_b = 298 \text{ K}$ et $P_b = 1,00 \times 10^5 \text{ Pa}$.

Constante des gaz parfaits : $R = 8,314 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Exercice 4 : Exprimer une masse volumique

1. a. Rappeler l'expression de la masse volumique ρ d'un corps, puis l'exprimer en faisant apparaître la quantité de matière n et la masse molaire M de ce corps.

b. Donner l'expression de la quantité de matière n d'un gaz parfait en fonction des données littérales de l'équation d'état.

2. Exprimer la masse volumique ρ d'un gaz parfait en fonction de sa masse molaire M et des grandeurs de la question 1. b.

3. L'expression de la question 1. b est-elle toujours valide si la pression devient très grande ?

Exercice 5 : Définir l'énergie interne

On étudie l'échauffement d'une plaquette de frein lors d'un freinage.

1. Proposer un système d'étude et identifier alors le milieu extérieur.

2. Définir l'énergie interne du système.

Exercice 6 : Connaître l'énergie d'un point de vue microscopique

De l'eau est maintenue à ébullition dans une casserole.

- Relier le début et la fin des phrases.

L'énergie potentielle
microscopique de l'eau



est modifiée.

L'énergie cinétique
microscopique de l'eau



reste constante.

Exercice 7 : Distinguer des variations d'énergie

Une météorite se dirige vers la Terre à grande vitesse et pénètre dans l'atmosphère en s'échauffant et en fondant partiellement. À cause des interactions avec les molécules de la haute atmosphère, elle atteint une vitesse limite.



1. Expliquer pourquoi l'énergie mécanique \mathcal{E}_m de la météorite diminue.
2. Justifier le fait que toutes les formes d'énergie de la météorite sont modifiées.

Donnée

Énergie potentielle de la météorite en interaction avec la Terre :

$\mathcal{E}_p = -G \times \frac{m_{\text{météorite}} \times M_{\text{Terre}}}{r}$ avec $\mathcal{E}_p = 0$ si la distance r entre les deux corps est infinie.

Exercice 8 : Reconnaître le mode de transfert

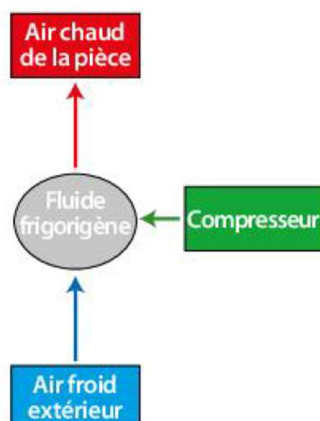
Lors d'une descente, les skis sont soumis à des forces de frottement exercées par la piste.

1. Le transfert d'énergie de la piste sur le système {skis} s'effectue-t-il par travail ou par transfert thermique ?
2. Préciser le signe de ce transfert.



Exercice 9 : Utiliser le premier principe

Le fluide frigorigène d'une pompe à chaleur prend de l'énergie à l'air froid extérieur et en transfère à l'air de la pièce à chauffer. Pour cela, un compresseur transfère de l'énergie par travail mécanique au fluide frigorigène.



1. Compléter le schéma ci-dessus pour les trois transferts d'énergie ayant lieu entre le système (fluide frigorigène) et le milieu extérieur.
2. Ecrire le premier principe pour ce système.

Exercice 10 : Prévoir l'évolution d'une énergie interne

On souhaite refroidir de $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ une masse m de jus de fruit considéré comme incompressible.

1. Donner l'expression de la variation d'énergie interne $\Delta U_{i \rightarrow f}$ du système {jus de fruit} en fonction notamment de la masse du système et de sa variation de température entre l'état initial et l'état final.
2. Prévoir le signe de la variation d'énergie interne de ce système.

Exercice 11 : Appareil Respiratoire Individuel ARI

Les appareils respiratoires contenant une bouteille d'air comprimé permettent aux sapeurs-pompiers de travailler dans des atmosphères toxiques lors d'un incendie. L'air contenu dans une bouteille d'air comprimé de volume $V_1 = 6,0\text{ L}$ est à la pression $P_1 = 300\text{ bar}$ et à la température $T_1 = 290\text{ K}$. Pour simplifier l'étude, on considère que, dans ces conditions de température et de pression, cet air peut être assimilé à un gaz parfait.

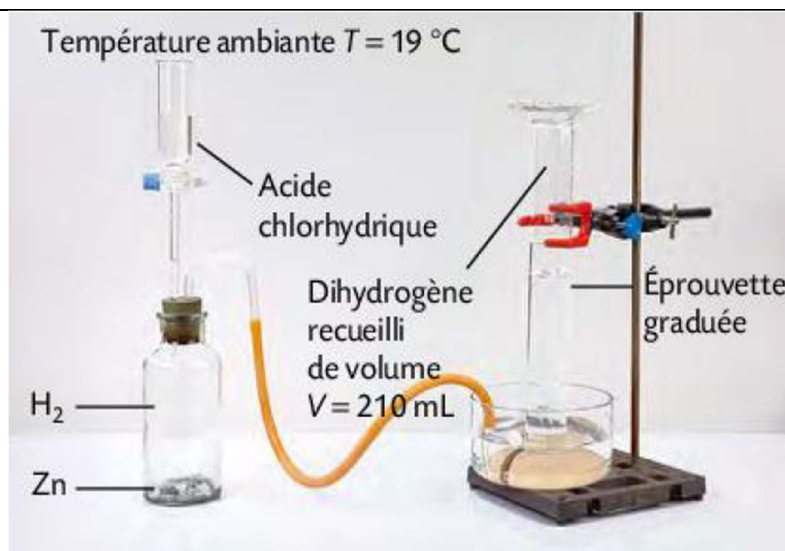


1. Exprimer la quantité de matière n d'air contenu dans la bouteille.
2. On souhaite calculer le volume V_2 d'air que cette bouteille peut libérer à la température $T_2 = 320\text{ K}$ et à la pression atmosphérique $P_{\text{atm}} = 1,013 \times 10^5\text{ Pa}$.
 - a. Exprimer la quantité de matière n d'air en fonction des données de la question 2.
 - b. Calculer le volume V_2 .
3. En opération, le volume d'air inspiré par un pompier peut atteindre 90 L par minute. Quelle peut être la durée de l'intervention ?

Donnée

$$1\text{ bar} = 1 \times 10^5\text{ Pa.}$$

Exercice 12 : Production de dihydrogène



La production de dihydrogène au laboratoire de chimie se fait par l'action de l'acide chlorhydrique sur le métal zinc, comme indiqué sur la photographie ci-contre. Le dihydrogène produit est recueilli dans une éprouvette graduée retournée sur une cuve à eau.

1. Rappeler les conditions nécessaires pour qu'un gaz soit modélisable par un gaz parfait.

2. Dans les conditions de l'expérience, le dihydrogène est modélisé par un gaz parfait à la pression de $9,90 \times 10^4$ Pa. Calculer la masse volumique du dihydrogène.

Données

- Constante des gaz parfaits : $R = 8,314 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.
- $M(\text{H}_2) = 2,016 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.
- Masse volumique de l'eau : $\rho = 1,000 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.
- Conversion des températures : $T(\text{K}) = \theta(^{\circ}\text{C}) + 273$.

Exercice 13 : Cuiser solaire



Pour réaliser un œuf poché avec un cuiser solaire, on chauffe, de 20 à 95 °C, 250 g d'eau dans un récipient pesant 500 g. On considère le système {eau et son récipient}.

1. a. Quels sont les signes des transferts d'énergie entre le système et l'enveloppe métallique du cuiser solaire, le système et le Soleil qui l'éclaire, le système et l'air environnant ?

b. Seul le transfert thermique entre le cuiser solaire et le système est pris en compte, les autres transferts étant négligés, car très faibles d'un point de vue énergétique. Exprimer la variation d'énergie interne du système.

2. Calculer la variation d'énergie interne du système.

Données

- Capacité thermique massique de l'eau liquide : $c = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$.
- Capacité thermique massique du récipient : $c_r = 445 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$.