

Premier Principe

Enoncer le premier principe de la thermodynamique.	<ul style="list-style-type: none"> ◇ Il existe une fonction d'état, extensive appelée énergie interne et notée U. ◇ Pour un système fermé $\Delta E_c + \Delta U = W + Q$ <p>où W est le travail reçu par le système (forces conservatives et non conservatives), et Q le transfert thermique reçu par le système.</p>
Enoncer le premier principe de la thermodynamique pour un système macroscopiquement au repos.	<p>Pour un système fermé et macroscopiquement immobile évoluant entre deux états on a</p> $dU = \delta Q + \delta W$ $\Delta U = U_{\text{final}} - U_{\text{initial}} = W + Q$
Définir ce qu'est une fonction d'état.	C'est une fonction mathématique des variables d'état dont la variation ne dépend que de l'état initial et de l'état final et nullement du chemin suivi.
Quel est le sens physique de l'énergie interne.	<p>L'énergie interne contient :</p> <ul style="list-style-type: none"> ◇ l'énergie cinétique des particules ; ◇ l'énergie potentielle d'interaction entre les particules.
Comment peut-on écrire le premier principe pour une transformation isochore (système fermé macroscopiquement immobile) ?	$\Delta U = Q$
Définir l'enthalpie.	$H = U + PV$
Comment peut-on écrire le premier principe lors d'une transformation isobare d'un système fermé macroscopiquement immobile et soumis uniquement aux forces de pression ?	$\Delta H = Q$
Dans quel autre cas la relation précédente est elle valide ?	Si la transformation est monobare et qu'il y a équilibre de pression entre l'intérieur et l'extérieur du système à l'état initial et à l'état final.
Que valent les variations de U et de H pour une transformation cyclique ?	$\Delta U = 0$ et $\Delta H = 0$.

Définir les capacités thermiques à volume et à pression constante.	<ul style="list-style-type: none"> ◇ Pour une transformation isochore, la capacité thermique C_v est définie par $dU = C_v dT$ ◇ Pour une transformation isobare, la capacité thermique C_p est définie par $dH = C_p dT$
Quelle interprétation physique donner à : <ul style="list-style-type: none"> ◇ C_V ? ◇ C_P ? 	<ul style="list-style-type: none"> ◇ C'est la quantité d'énergie thermique qu'il faut apporter de manière isochore à un système pour élever sa température d'un degré : $\delta Q_V = C_V dT$. ◇ C'est la quantité d'énergie thermique qu'il faut apporter de manière isobare à un système pour élever sa température d'un degré : $\delta Q_P = C_P dT$.
Que valent C_V et C_p pour une phase condensée ?	$C_V = C_P = C$
Qu'est ce que le coefficient γ ?	$\gamma = \frac{C_P}{C_V}$
Que dire de U et de H pour un gaz parfait ?	Elles ne dépendent que de T .
Qu'est ce qu'un gaz qui suit la première loi de Joule ? Le seconde ?	<ul style="list-style-type: none"> ◇ Un gaz suit la première loi de Joule si son énergie interne ne dépend que de la température. ◇ Un gaz suit la seconde loi de Joule si son enthalpie ne dépend que de la température.
Qualifier un gaz parfait par rapport aux deux lois de Joule.	Un gaz parfait suit les deux lois de Joule et réciproquement.
Pour un gaz parfait monoatomique, donner les valeurs de U , H , C_V , C_P et γ .	$U = 3/2nRT$, $H = 5/2nRT$, $C_V = 3/2nR$, $C_P = 5/2nR$ et $\gamma = 5/3$.
Enoncer la loi de Mayer pour un gaz parfait.	$C_P - C_V = nR$
Exprimer C_P et C_V en fonction de γ pour un gaz parfait.	$C_P = \frac{nR\gamma}{\gamma - 1}$ $C_V = \frac{nR}{\gamma - 1}$
Que vaut la différentielle de U : <ul style="list-style-type: none"> ◇ lors d'une transformation isochore ? ◇ pour une phase condensée ? ◇ pour un gaz parfait ? 	<ul style="list-style-type: none"> ◇ $dU = C_V dT$ ◇ $dU = C dT$ ◇ $dU = C_V dT = \frac{nR}{\gamma - 1} dT$
Que vaut la différentielle de H : <ul style="list-style-type: none"> ◇ lors d'une transformation isobare ? ◇ pour une phase condensée ? ◇ pour un gaz parfait ? 	<ul style="list-style-type: none"> ◇ $dH = C_P dT$ ◇ $dH = C dT$ ◇ $dH = C_P dT = \frac{nR\gamma}{\gamma - 1} dT$

Tester les Bases

TLB_{MtE} 1 Gaz parfait

Une mole de gaz parfait subit une compression isotherme ($t_0 = 25\text{ }^\circ\text{C}$) infiniment lente de $P_0 = 10^5\text{ Pa}$ à $P_1 = 2P_0$. Calculer le travail reçu par le gaz en précisant les hypothèses nécessaires à chaque étape.

TLB_{MtE} 2 Gaz parfait

1. Une mole de gaz parfait dans l'état $P_1 = 1\text{ bar}$, $V_1 = 2\text{ L}$, $T_1 = 300\text{ K}$ subit une transformation isotherme réversible doublant son volume. Calculer le travail et la chaleur échangés dans cette transformation avec l'extérieur.
2. n moles d'un gaz parfait évoluent d'un état initial P_0, V_0 jusqu'à un état final P_1, V_1 . Calculer la variation

Exercices incontournables

Ex 1 Cas limite du thermostat

On considère deux systèmes S_1 et S_2 de volume constant en contact thermique. L'ensemble $\{S_1, S_2\}$ est isolé. On note T_1 la température initiale de S_1 et T_2 celle de S_2 . Leurs capacités thermiques respectives sont notées C_{v1} et C_{v2} . L'ensemble évolue jusqu'à ce que les deux systèmes atteignent une même température T_f .

1. Déterminer T_f .
2. Montrer que si $C_{v1} \gg C_{v2}$, le système S_1 joue le rôle d'un thermostat.
3. Application numérique :
 - 3.1. On considère 10 mL d'eau à $10\text{ }^\circ\text{C}$ placés dans 1 L d'eau à $50\text{ }^\circ\text{C}$.
 - 3.2. On considère 1 L d'eau à $50\text{ }^\circ\text{C}$ placés dans une pièce de 100 m^3 à $20\text{ }^\circ\text{C}$. Les capacités thermiques vérifient $C_{vol,eau} = 3,34 C_{vol,air}$.

Ex 2 Energie interne et enthalpie

Dans l'état A, à la température $T_A = 293\text{ K}$ et la pression $P_A = 1\text{ bar}$, l'eau possède un volume massique $v_A = 1,0020 \cdot 10^{-3}\text{ m}^3\text{kg}^{-1}$.
 Dans l'état B, à la température $T_B = 350\text{ K}$ et la pression $P_B = 20\text{ bar}$, l'eau possède un volume massique $v_B = 1,0035 \cdot 10^{-3}\text{ m}^3\text{kg}^{-1}$.
 La capacité thermique de l'eau (à pression constante) est supposée constante dans cet intervalle de pression et de température : $c_p \simeq 4,2\text{ kJK}^{-1}\text{kg}^{-1}$.

1. Que vaut la variation d'enthalpie massique Δh de l'eau entre l'état A et l'état B ?
2. Calculer la variation $\Delta(Pv)$ du produit de la pression par le volume massique.
3. Que peut-on conclure pour l'énergie interne.

d'énergie interne.

TLB_{MtE} 3 Vapeur d'eau

Calculer la quantité de chaleur libérée, sous une pression de 1 bar, pour passer d'un kilogramme de vapeur d'eau à $100\text{ }^\circ\text{C}$ à un kilogramme d'eau liquide à $20\text{ }^\circ\text{C}$.
 $c_{eau} = 4,18\text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ et $L_v = 2,25\text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$.

TLB_{MtE} 4 Valeur en eau

- On mélange 95 g d'eau à $20\text{ }^\circ\text{C}$ et 71 g d'eau à $50\text{ }^\circ\text{C}$ dans un calorimètre.
1. Quelle est la température finale à l'équilibre en, négligeant l'influence du calorimètre.
 2. Expérimentalement on obtient $31,3\text{ }^\circ\text{C}$. Expliquer.
 3. En déduire la valeur en eau du calorimètre.

Ex 3 Evolution isobare d'un gaz parfait

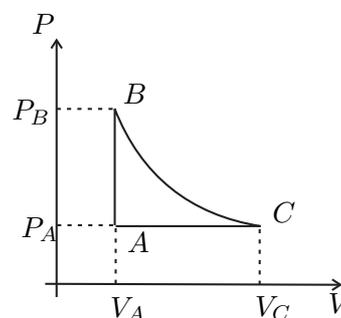
Une quantité $n = 0,05\text{ mol}$ de gaz parfait monoatomique subit une transformation isobare réversible à la pression $P_0 = 1\text{ bar}$ entre les volumes $V_1 = 1\text{ L}$ et $V_2 = 1,5\text{ L}$. Le seul travail reçu par le système est celui des forces de pression.

1. Est-il possible de représenter cette transformation dans un diagramme de Watt ? Justifier et si oui, la représenter.
2. Expliquer pourquoi le volume de gaz peut augmenter alors que la pression est inchangée.
3. Quel est l'échange thermique reçu par le système ? Commenter le sens dans lequel il a lieu.

Ex 4 N moles de gaz parfait subissent les trois transformations du cycle réversible représenté ci-contre. Calculer Q , W , et ΔU pour chacune des trois transformations et pour le cycle.

- ◇ $P_A = 1\text{ bar}$
- ◇ $P_B = 3\text{ bar}$
- ◇ $V_A = 22,7\text{ L}$
- ◇ $\gamma = 1,4$.

La transformation de C vers B est isotherme.



Ex 5 Chaleur latente par Calorimétrie

La température ambiante est de $20\text{ }^\circ\text{C}$. On opère sous pression atmosphérique constante.

1. On dispose d'un calorimètre de valeur en eau μ (masse d'eau qui aurait la même capacité calorifique que le calorimètre). Chaleur massique de l'eau : $c_0 = 4,18\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. On place une masse $m_1 = 100\text{ g}$ d'eau à $20\text{ }^\circ\text{C}$ et une masse $m_2 = 200\text{ g}$ d'eau à $80\text{ }^\circ\text{C}$ dans le calorimètre. On mesure la température finale $\theta_f = 59\text{ }^\circ\text{C}$. Calculer μ .

2. On place 200 g d'eau à $20\text{ }^\circ\text{C}$ et 20 g de glaçons à $0\text{ }^\circ\text{C}$ dans le calorimètre. On mesure $\theta_f = 11,2\text{ }^\circ\text{C}$. Calculer la chaleur latente de fusion de la glace.

Ex 6 Bouilloire

On dispose d'une bouilloire calorifugée de puissance $P = 2000\text{ W}$. Cette bouilloire contient un volume d'eau $V = 1\text{ L}$ à la température $T_1 = 15\text{ }^\circ\text{C}$. Une résistance est totalement immergée dans l'eau et permet par effet Joule de chauffer l'eau.

1. Combien de temps faut-il pour amener l'eau à la température $T_2 = 100\text{ }^\circ\text{C}$.

2. Une fois l'eau à la température T_2 , on verse le volume d'eau $V_1 = 100\text{ mL}$ dans une tasse à thé. On suppose que la tasse est calorifugée. On plonge une cuiller en fer de masse $m = 50\text{ g}$ et à la température $T_3 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ dans cette tasse. Quelle est la température finale du mélange en négligeant les pertes thermiques à l'interface air/eau et air/fer ?

$$\diamond \text{ eau liquide : } c = 4200\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}.$$

$$\diamond \text{ fer solide : } c_f = 444\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}.$$

Ex 7 Chauffage d'une chambre *

Une chambre est séparée de l'extérieur par des murs en béton. La température régnant à l'extérieur est supposée constante à $T_0 = 280\text{ K}$. La température $T(t)$ à l'intérieur du local et sur ses murs est supposée uniforme mais non constante. La puissance perdue par la pièce à cause des fuites thermiques est égale à $P_{th} = \frac{1}{R}(T(t) - T_0)$ avec $R = 2,00 \cdot 10^{-2}\text{ KW}^{-1}$ la résistance thermique des parois, et elle est chauffée par un radiateur délivrant une puissance $P = 2,00\text{ kW}$. La capacité thermique du système {local + murs} est $C = 1,50\text{ JK}^{-1}$. A l'instant $t = 0$, la température est T_0 et on allume le radiateur.

1. Déterminer l'expression de la fonction $T(t)$ et tracer son allure.

2. Calculer la température dans le local une fois le régime stationnaire établi. Doit-on augmenter ou diminuer la puissance du radiateur ?

Ex 8 Échauffement d'une bille *

Une bille métallique, de capacité thermique massique c (supposée constante), est lancée vers le haut avec une vitesse v_0 , dans le champ de pesanteur g supposé uniforme. Elle atteint une altitude h , puis redescend.

1. Déterminer l'altitude maximale h_0 que peut atteindre la bille si on néglige les forces de frottement fluide entre l'air et la bille. Exprimer h_0 en fonction de v_0 et g .

2. On constate que l'altitude h est inférieure à h_0 , à cause des forces de frottement. Calculer la variation de température ΔT de cette bille entre l'instant où elle est lancée et l'instant où elle atteint son point le plus haut en supposant que :

- \diamond l'on néglige toute variation de volume de la bille,
- \diamond l'air ambiant reste macroscopiquement au repos,
- \diamond le travail des forces de frottement se dissipe pour moitié dans l'air ambiant et pour moitié dans la bille.

Exprimer ΔT en fonction de h_0 , h , g et c .

3. Calculer h_0 , puis ΔT .

Données : $c = 0,4\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, $v_0 = 10\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $h = 5\text{ m}$.

Ex 9 Chauffage par résistance électrique *

Un cylindre horizontal indilatable est séparé en deux compartiments (1) et (2) par un piston d'épaisseur négligeable devant la longueur du cylindre et mobile sans frottement. Les parois du cylindre et le piston sont calorifugés. Dans l'état initial, les deux compartiments contiennent une même quantité d'air, assimilé à un gaz parfait de coefficient $\gamma = 1,4$, dans les mêmes conditions de température $T_0 = 293\text{ K}$ et de pression $P_0 = 1\text{ bar}$ et occupant le même volume $V_0 = 1\text{ L}$. Une résistance électrique traversant le compartiment (1) permet de chauffer lentement le gaz le contenant jusqu'à ce que sa pression soit $P_1 = 3\text{ bar}$.

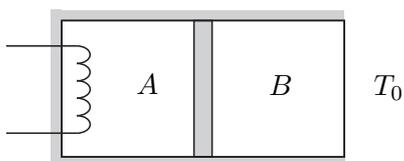
1. Dans l'état d'équilibre thermodynamique final, exprimer puis calculer les paramètres d'état (P_2 , V_2 , T_2) pour le gaz dans le compartiment (2) ainsi que les paramètres (V_1 , T_1) pour le gaz dans (1).

2. Montrer que le transfert thermique Q_1 échangé par le gaz dans le compartiment (1) s'écrit $Q_1 = \Delta U_1 + \Delta U_2$ où U_1 et U_2 sont les énergies internes des gaz dans les compartiments (1) et (2).

3. Exprimer Q_1 en fonction de P_0 , V_0 et γ . Le calculer.

Ex 10 Premier principe *

Un cylindre fermé horizontal est divisé en deux compartiments A et B de même volume V_0 par un piston coulissant librement sans frottements. A et B contiennent chacun 1 mole de gaz parfait monoatomique à la pression P_0 et à la température $T_0 = 273$ K (température de la glace fondante à la pression atmosphérique). Les parois grisées sont calorifugées. Le compartiment B reste à la température T_0 par contact thermique avec la glace fondante. On fait circuler un courant électrique dans la résistance. On attend l'équilibre. La température du compartiment A est alors T_1 .



1. Exprimer les volumes V_A , V_B et la pression finale d'équilibre P_f en fonction de T_1 , T_0 , V_0 correspondant à la position d'équilibre du piston.
2. Quelle est la variation d'énergie interne du gaz à l'intérieur de A et de B? En déduire la variation d'énergie interne du système $\{A + B\}$.
3. Quelle est la nature de la transformation subie par le gaz en B?
4. Quel est le travail reçu par le système B. En déduire la quantité de chaleur Q_1 reçue par le thermostat.
5. En considérant le système $\{A+B\}$ trouver la quantité de chaleur Q_2 fournie par la résistance chauffante.

Ex 11 Calorimétrie : méthode des mélanges *

Une vieille dame achète chez un antiquaire une statue garantie en or massif de masse $m = 860$ g. Pour vérifier sa composition, elle souhaite mesurer la capacité thermique massique c du métal qui la constitue. Pour cela elle plonge la statue à la température initiale $T_0 = 293$ K dans une masse $m_e = 300$ g d'eau, de température initiale $T_e = 353$ K et de capacité thermique massique $c_e = 4,18 \cdot 10^3$ JK⁻¹k⁻¹g, contenue dans un calorimètre et elle mesure alors la température final T_f du système à l'équilibre thermodynamique.

On définit la masse équivalente en eau du calorimètre μ par la relation $\mu = C_{cal}/c_e$ avec C_{cal} la capacité thermique du calorimètre, sa valeur est $\mu = 40$ g. Pendant toute la transformation, le système $\Sigma = \{\text{eau, statue, calorimètre}\}$ est en contact avec l'atmosphère où règne une pression P_0 .

1. Exprimer la capacité thermique c du solide en fonction de m_0 , m , μ , c_e , T_f et T_0 . Faire l'application numérique, sachant que la température finale mesurée est $T_f = 346$ K.

2. Pour tous les métaux à température ordinaire, la capacité thermique molaire a la même valeur $C_m = 3R$ (loi de Dulong et Petit). En déduire la masse molaire du métal constituant la statue et la comparer à celle de l'or ($M_{Au} = 197$ g · mol⁻¹). La vieille dame s'est-elle fait arnaquer?

Ex 12 Evolution d'une masse d'eau *

Le système étudié est constitué d'une masse $m = 1$ kg d'eau de masse molaire $M = 18$ g · mol⁻¹. Il subit successivement les transformations réversibles suivantes :

- ◊ état A : $T_1 = 298$ K, $P_1 = 1$ bar : on chauffe à pression constante jusqu'à un état B de température $T_2 = 473$ K.
- ◊ On comprime à température T_2 constante jusqu'à un état C de volume $V_3 = 0,1$ m³ et de pression P_3 inconnue.
- ◊ On détend ensuite jusqu'à un état D situé sur la courbe de vaporisation à la pression $P_4 = 14,5$ bar.

On donne les valeurs suivantes :

T (K)	P_{sat} (bar)	ℓ_{vap} (kJ · kg ⁻¹)
373	1	2250
473	15,5	1950

Capacités calorifiques massiques de l'eau liquide et de l'eau vapeur (à pression constante) : $c_\ell = 4,2$ kJ · K⁻¹ · kg⁻¹ et $c_v = 2,0$ kJ · K⁻¹ · kg⁻¹.

1. Sous quelle(s) phase(s) se trouve l'eau dans les états A, B, C et D?
2. Représenter les transformations suivies dans un diagramme (P,T).
3. Déterminer la pression P_3 .
4. Au cours de la transformation AB, calculer le transfert thermique et le travail reçu par le système.
5. Soit m_v la masse de vapeur, m_ℓ la masse de liquide et x le titre massique en vapeur dans l'état C. Calculer m_v , m_ℓ et x .

Exercices pour s'entraîner et/ou pour aller plus loin

Ex 13 Transpiration

Quel volume d'eau devez-vous transpirer pour débarrasser votre corps des 75 watts de puissance thermique correspondant à votre métabolisme lorsque vous êtes au repos ? On prendra la température de la peau égale à 33°C et l'enthalpie massique de vaporisation de l'eau à cette température égale à $2420 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Commenter sachant que, normalement, on évacue par transpiration environ 0,5 litre par jour. Le fait de s'essuyer avec une serviette aide-t-il au refroidissement du corps ?

Ex 14 Surfusion *

Un récipient où l'atmosphère maintient une pression constante $P_0 = 1 \text{ bar}$ contient 1 kg d'eau liquide à une température T_0 inférieure à la température de fusion $T_F = 273 \text{ K}$ à la pression P_0 : l'eau est surfondue.

Il suffit d'un choc très rapide pour que l'eau passe rapidement à l'état solide.

On donne l'enthalpie de fusion de l'eau $\ell_F = 330 \text{ kJ/kg}$ et la capacité thermique massique $c = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ supposée indépendante de la température et identique pour l'eau solide et l'eau liquide.

- Déterminer la température T_1 dans l'état final où toute l'eau est à l'état solide en supposant l'évolution suffisamment rapide pour être adiabatique.
- Exprimer l'entropie créée au cours de cette évolution et en déduire une condition sur T_0 (voir TH5!).

Ex 15 Remplissage *

Un récipient de volume V_0 est initialement vide. Il est entouré par l'air atmosphérique à la pression P_0 et à la température T_0 . On perce un petit trou de telle sorte que de l'air pénètre à l'intérieur du récipient. On referme le trou dès que les pressions intérieures et extérieures sont égales. Quelle est alors la température de l'air ayant pénétré dans le récipient ?

L'air est assimilé à un gaz parfait de coefficient γ .

Ex 16 Expérience Clément et Desormes **

Cette expérience permet la mesure du coefficient γ d'un gaz :

$$\gamma = \frac{C_{pm}}{C_{vm}}$$

Un récipient de grande capacité et muni d'un robinet R contient une certaine quantité de gaz (assimilé à un gaz parfait) à la pression P_0 et à la température atmosphérique T_0 .

Ce récipient est relié à un manomètre à liquide (eau) permettant de mesurer la pression à l'intérieur du gaz intérieur.

A l'aide d'une pompe, on comprime très légèrement le gaz. Lorsque la température est stabilisée à T_0 , la pression du gaz vaut $P_1 = P_0 + p_1$ avec $p_1 \ll P_0$. Le manomètre indique une dénivellation h_1 . On ouvre et on referme aussitôt le robinet. On constate alors que la dénivellation du liquide dans le manomètre s'annule dans un premier temps puis, prend une valeur h_2 , quand le gaz retrouve sa température initiale T_0 .

- Analyser les transformations que subit le gaz pendant l'ouverture et après la fermeture du robinet. Représenter le graphe dans un diagramme de Clapeyron.
- Calculer le coefficient γ en fonction de dénivellations h_1 et h_2 .
Pour l'air on a mesuré $h_1 = 18,2 \text{ cm}$ et $h_2 = 5,0 \text{ cm}$. En déduire la valeur de γ .