

4 – TRAVAIL, ENTHALPIE, BILANS D'ÉNERGIE.

Plan du chapitre

1 Transfert d'énergie sous forme de travail	2
1.1 Forme ordonnée des échanges d'énergie : le travail W	2
1.2 Expression du travail	2
1.3 Travail des forces pressantes	3
1.4 Application du premier principe	6
1.5 Travail autre que les forces pressantes	7
2 La fonction enthalpie ; premier principe en termes enthalpiques	7
2.1 Position du problème	7
2.2 La fonction d'état enthalpie	7
2.3 Bilan enthalpique	9
2.4 Enthalpie de changement d'état	10
3 Bilans d'énergie	11
3.1 Méthode	11
3.2 Calculs de transfert thermique	11
3.3 Calorimétrie	12
3.4 Énergie mise en jeu lors d'un changement d'état	13
Exercices	14
Travaux dirigés	17

Programme officiel – Premier semestre – **Thème E – énergie : conversion et transfert**

NOTIONS	CAPACITÉS EXIGIBLES
<p>E.2. Bilan d'énergie pour un système thermodynamique</p> <p>Travail.</p> <p>Travail des forces de pression.</p>	<p>Évaluer un travail par découpage en travaux élémentaires et sommation sur un chemin donné dans le cas d'une seule variable. Interpréter géométriquement le travail des forces de pression dans un diagramme de Watt ou de Clapeyron.</p>
<p>Fonction d'état enthalpie.</p> <p>Fonction d'état enthalpie ; capacité thermique à pression constante d'un gaz parfait et d'une phase condensée.</p> <p>Variation d'enthalpie associée à un changement d'état.</p>	<p>Exprimer le premier principe de la thermodynamique sous forme de bilan d'enthalpie dans le cas d'une transformation monobare avec équilibre mécanique dans l'état initial et final. Exprimer l'enthalpie du gaz parfait à partir de l'énergie interne. Exprimer la variation d'enthalpie d'un gaz parfait ou d'une phase condensée indilatable et incompressible en fonction de la variation de température. Citer la valeur de la capacité thermique massique de l'eau liquide.</p> <p>Exploiter l'extensivité de l'enthalpie. Réaliser un bilan énergétique en prenant en compte des changements d'état. Mettre en œuvre un protocole expérimental de mesure d'une grandeur thermodynamique énergétique (capacité thermique, enthalpie de fusion, etc).</p>

1 Transfert d'énergie sous forme de travail

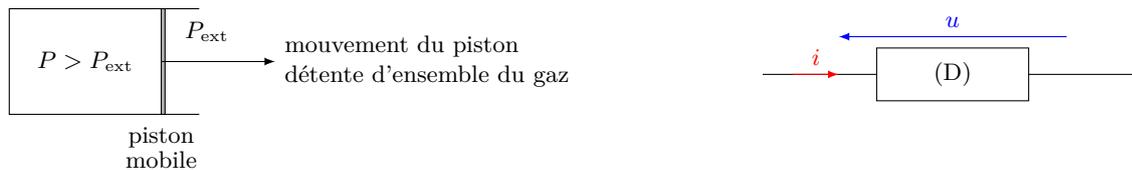
1.1 Forme ordonnée des échanges d'énergie : le travail W

Le travail

Le **travail** est un échange d'énergie **associé à des modifications macroscopiques** du système, qui déplacent en bloc l'édifice moléculaire.

Forme utilisable de l'énergie

Le travail est un **échange ordonné d'énergie** ; l'énergie libérée par un système sous forme de travail est utilisable.



1.2 Expression du travail

Le travail élémentaire reçu par un système au cours d'une transformation s'écrit sous la forme générale : $\delta W_{\text{reçu}} = \pm y \cdot dX$, avec :

- y la grandeur intensive responsable de la transformation (donc appliquée au système),
- X la grandeur extensive (paramètre du système) qui varie sous l'effet de y .

Travail électrique

Un dipôle électrique soumis à une tension u pendant une durée dt est traversé par un flux de charges dq et reçoit un travail élémentaire :

$$\delta W_{\text{reçu}} = u \cdot dq = u \cdot i \, dt$$

Travail mécanique

Un système solide soumis à une force \vec{F} et en mouvement selon un vecteur déplacement élémentaire $d\vec{\ell}$ reçoit un travail élémentaire

$$\delta W_{\text{reçu}} = \vec{F} \cdot d\vec{\ell}$$

Puissance reçue

La puissance associée au travail élémentaire $\delta W_{\text{reçu}}$ pendant l'intervalle de temps infinitésimal dt est :

$$\mathcal{P}_{W_{\text{reçu}}} = \frac{\delta W_{\text{reçu}}}{dt}$$

Rappel : la puissance électrique reçue par un dipôle est $\mathcal{P}_{\text{reçu}} = \frac{ui \, dt}{dt} = ui$.

1.3 Travail des forces pressantes

1.3.1 Formule générale

Importance du travail des forces pressantes :

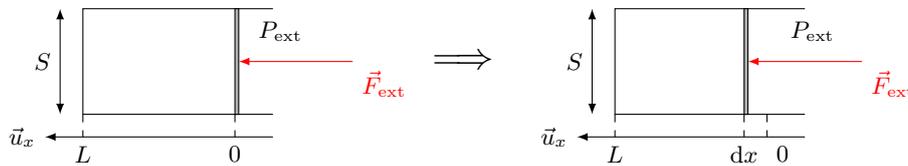
- inévitable dès qu'on travaille au contact de l'atmosphère,
- fondamental dans un grand nombre d'applications techniques.

On va établir la formule générale du travail des forces pressantes à partir d'un exemple simple :

- un gaz est enfermé dans un cylindre de longueur L , fermé par un piston de surface S ,
- le piston est mobile selon la direction \vec{u}_x ,
- une force totale $\vec{F}_{\text{ext}} = F_{\text{ext}}\vec{u}_x$ est exercée par le monde extérieur sur le système et tend à faire varier le volume du système.

Le travail (mécanique) reçu par le gaz lors d'un déplacement $d\vec{\ell} = dx \vec{u}_x$ est :

$$\delta W = F_{\text{ext}}\vec{u}_x \cdot dx \vec{u}_x = F_{\text{ext}} dx$$



Caractère algébrique du travail

- Si $dx > 0$, alors $\delta W_{\text{reçu}} > 0$. Le monde extérieur impose une modification du système. Il y a transfert d'énergie du monde extérieur vers le système, qui reçoit réellement un travail.
- Si $dx < 0$, alors $\delta W_{\text{reçu}} < 0$. Le monde extérieur s'oppose à la transformation. Le système doit fournir de l'énergie.

Travail des forces pressantes

Le travail élémentaire reçu par le système soumis à une force totale F_{ext} s'exerçant sur la surface mobile S du système est :

$$\delta W_{p \text{ reçu}} = -P_{\text{ext}} dV \quad \text{avec} \quad P_{\text{ext}} = \frac{F_{\text{ext}}}{S}$$

Démonstration (à connaître)

Travail total reçu

Le travail total reçu sous l'effet de forces pressantes entre un volume initial V_{ini} et un volume final V_{fin} du système est :

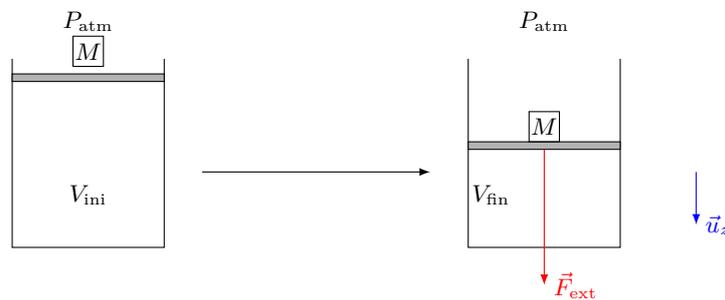
$$W_{p\text{reçu}} = - \int_{V_{\text{ini}}}^{V_{\text{fin}}} P_{\text{ext}} dV$$

Méthode pour calculer le travail des forces pressantes

- Déterminer V_{ini} et V_{fin} .
- Déterminer ce que représente P_{ext} en fonction de toutes les forces appliquées sur la partie mobile du système.
- Exprimer P_{ext} comme une fonction du volume du système V .
- Faire l'intégration $W_{p\text{reçu}} = - \int_{V_{\text{ini}}}^{V_{\text{fin}}} P_{\text{ext}} dV$

1.3.2 Travail reçu lors d'une compression monobare (sous pression extérieure constante)

Soit une quantité de matière n d'un gaz enfermé dans un cylindre de volume initial V_{ini} par un piston mobile de surface S et de masse négligeable. L'ensemble est à l'équilibre. On pose sur le piston une masse M ; le piston descend brusquement et s'immobilise ; le volume final du gaz dans le cylindre est V_{fin} . On cherche le travail reçu par le gaz.



Déterminer V_{ini} et V_{fin}

Données de l'énoncé.

Pression extérieure

P_{ext} en fonction de V

Calcul du travail

Exemple : travail de compression

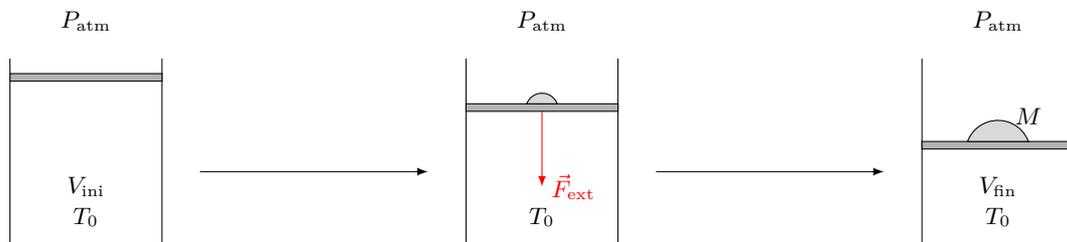
On considère un cylindre vertical de section $S = 10 \text{ cm}^2$ et de hauteur $H = 40 \text{ cm}$. Le cylindre est ouvert, et l'air qui s'y trouve est à l'équilibre avec l'atmosphère $P_{\text{ini}} = 1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ et $T_0 = 25 \text{ °C}$. On ferme le cylindre par un piston de masse $m = 1 \text{ kg}$, et on laisse évoluer le système jusqu'à l'équilibre, la température étant T_0 à la fin du processus. Calculer le travail reçu par le gaz.

Application 1 : travail de détente

On considère 1 mol d'un gaz parfait à la température $T_0 = 15 \text{ °C}$ et sous la pression $P_{\text{ini}} = 2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ se trouvant dans un cylindre fermé par un piston de masse négligeable. L'autre face du piston est au contact de l'atmosphère à la pression $P_{\text{atm}} = 1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ et à la température T_0 . On débloque le piston et on laisse le système évoluer jusqu'à l'équilibre, sachant que la température finale est T_0 . Calculer le travail reçu par le gaz.

1.3.3 Travail reçu lors d'une compression en quasi-équilibre mécanique

Soit une quantité de matière n d'un gaz enfermé dans un cylindre de volume initial V_{ini} par un piston mobile de surface S et de masse négligeable. L'ensemble est à l'équilibre. On pose sur le piston des grains de sable, les uns après les autres, jusqu'à en avoir posé à la fin une masse totale M ; le volume final est V_{fin} . La descente du piston est très lente et on admet que la température reste constante égale à T_0 .



Déterminer V_{ini} et V_{fin}

Données de l'énoncé.

Pression extérieure

P_{ext} en fonction de V

Calcul du travail

Exemple : travail de compression

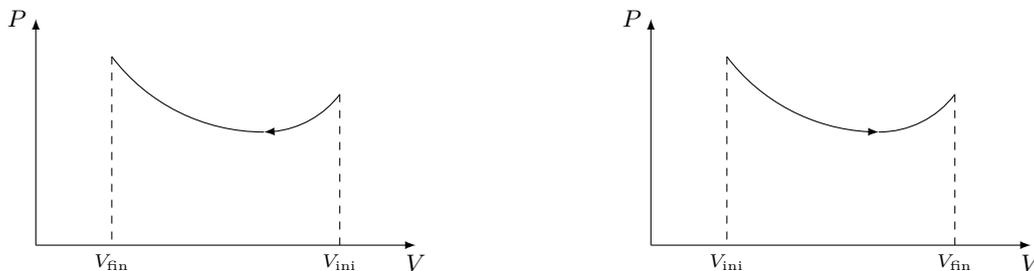
On considère un cylindre vertical de section $S = 10 \text{ cm}^2$ et de hauteur $H = 40 \text{ cm}$. Le cylindre est fermé par un piston sans masse, et l'air qui s'y trouve est à l'équilibre avec l'atmosphère $P_{\text{ini}} = 1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ et $T_0 = 25 \text{ °C}$. On ajoute de façon très progressive des petites masses jusqu'à atteindre la masse totale $m = 1 \text{ kg}$, la température étant T_0 à la fin du processus. Calculer le travail reçu par le gaz.

Transformation en quasi-équilibre mécanique

Une compression ou une détente d'un gaz enfermé dans une enceinte, effectuée en situation de quasi-équilibre (transformation quasi-statique) est telle que la pression P du gaz est égale à la pression extérieure à chaque instant : $P = P_{\text{ext}}$.

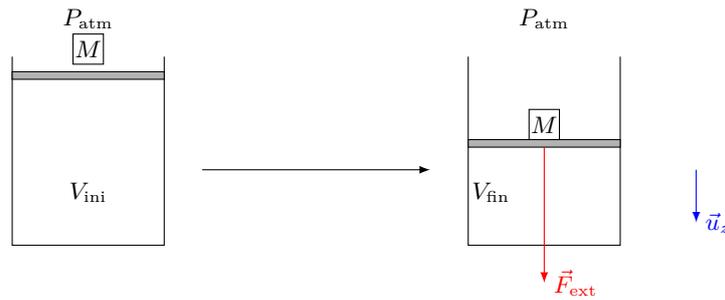
Interprétation graphique du travail

Pour une transformation en quasi-équilibre : $P_{\text{ext}} = P$, avec P la pression du système.



1.4 Application du premier principe

Soit une quantité de matière n d'un gaz enfermé dans un cylindre de volume initial V_{ini} par un piston mobile de surface S et de masse négligeable. Les parois du cylindre sont diathermanes, et l'ensemble est à l'équilibre. On pose sur le piston une masse M ; le piston descend brusquement puis s'immobilise ; lorsque l'équilibre est atteint, le volume final du gaz dans le cylindre est V_{fin} . Durant toute la transformation, la température du monde extérieur est $T_{\text{ext}} = 20 \text{ °C}$. On cherche le transfert thermique reçu par le gaz pendant la transformation.



1.5 Travail autre que les forces pressantes

Le travail des forces pressantes atmosphériques est inévitable, incontrôlable et difficile à calculer.

Travail des forces pressantes et autres travaux

$$W_{\text{reçu}} = W_{p \text{ reçu}} + W_{\text{reçu}}^*$$

- $W_{p \text{ reçu}}$: travail des forces pressantes,
- W^* : autres travaux.

2 La fonction enthalpie ; premier principe en termes enthalpiques

2.1 Position du problème

- Le premier principe a une forme simplifiée pour une transformation isochore : $\Delta U = W_{\text{reçu}}^* + Q_{\text{reçu}}$.
- Il est très difficile de faire des manipulations à volume constant. Pour une manipulation dans l'atmosphère, il y a toujours un terme de travail des forces pressantes atmosphérique, difficilement mesurable (la variation de volume est difficile à mesurer).
- Beaucoup de transformations se font en équilibre mécanique avec le milieu environnant, donc à pression constante.

2.2 La fonction d'état enthalpie

2.2.1 Définition et propriétés

L'enthalpie H

Pour un système donné, d'énergie interne U , de pression P et de volume V , on appelle **enthalpie** du système la fonction **homogène à une énergie en joule** :

$$H = U + PV$$

Les propriétés de H sont analogues à celle de U .

***H* est additive**

L'enthalpie est une fonction extensive et additive.

***H* est une fonction d'état**

La variation de l'enthalpie d'un système entre un état initial et un état final est $\Delta H = H_{\text{fin}} - H_{\text{ini}}$, quelle que soit la transformation qui a mené de l'état initial à l'état final.

L'enthalpie *H* dépend de *T*

Pour un gaz supposé parfait, *H* ne dépend que de *T* (deuxième loi de Joule).
Pour une phase condensée supposée indilatable et incompressible, *H* ne dépend que de *T*.

Démonstration dans le cas d'un gaz parfait (à connaître)

2.2.2 Variation de l'enthalpie d'un système ; capacité thermique à pression constant

Le facteur de proportionnalité entre la variation de *U* et la variation de *T* est la capacité thermique à volume constant. Une grandeur analogue a été définie pour l'enthalpie.

Variation de *H* avec la variation de *T*

Pour une variation de température $\Delta T = T_{\text{fin}} - T_{\text{ini}}$:

$$\Delta H = C_p \Delta T$$

Pour une variation infinitésimale de température *dT* :

$$dH = C_p dT$$

Capacité thermique à pression constante d'un gaz

C_p est la **capacité thermique à pression constante**. Pour une quantité de matière *n* ou une masse *m* d'un gaz donné :

$$C_p = n \times C_{pm} = m \times c_p$$

avec C_{pm} la capacité thermique molaire à pression constante, et c_p la capacité thermique massique à pression constante de ce gaz.

Application 2 : relation de Mayer

Soit une quantité de matière constante *n* d'un gaz parfait. En utilisant la relation entre *U* et *H*, et l'équation des gaz parfaits, montrer la relation de Mayer valable pour un gaz parfait : $C_{pm} = C_{vm} + R$.

Capacité thermique d'une phase condensée

Pour une phase condensée, la capacité thermique à volume constant et la capacité thermique à pression constante sont quasiment égales.

On note simplement C la capacité thermique, C_m la capacité thermique molaire, et c la capacité thermique massique de cette phase condensée.

2.3 Bilan enthalpique

Intérêt de l'enthalpie (démonstration à connaître)

Soit un système initialement à l'équilibre mécanique avec le milieu extérieur, soit $P_{\text{ini}} = P_{\text{ext}}$. On lui fait subir une transformation monobare (pression extérieure constante), qui l'amène à un autre état d'équilibre, pour lequel $P_{\text{fin}} = P_{\text{ext}}$. On peut alors écrire le premier principe sans avoir à prendre en compte le travail des forces pressantes.

Bilan enthalpique

Pour une **transformation monobare** telle que l'équilibre de pression avec l'extérieur soit réalisé à l'état initial et à l'état final, est :

$$\Delta E_c + \Delta E_p + \Delta H = (E_c + E_p + H)_{\text{fin}} - (E_c + E_p + H)_{\text{ini}} = W_{\text{reçu}}^* + Q_{\text{reçue}}$$

Pour une transformation infinitésimale du système (pour une évolution compliquée qu'on ne peut étudier globalement) :

$$dE_c + dE_p + dH = \delta W_{\text{reçu}}^* + \delta Q_{\text{reçue}}$$

Cas très important des transformations isobares d'un système immobile

Une **transformation isobare** est réalisable si le système est en permanence à l'équilibre mécanique avec le monde extérieur de température constante. C'est un cas particulier du système soumis à une transformation monobare avec équilibre de pression au début et à la fin.

$$\Delta E_c + \Delta E_p + \Delta H = Q_{\text{reçue}} \quad \text{à } P = \text{cte}$$

En l'absence de travail autre que les forces pressantes, l'enthalpie est une mesure du transfert thermique reçu (chaleur reçue).

2.4 Enthalpie de changement d'état

- Lors d'un changement d'état au contact de l'atmosphère, on est dans le cas d'une transformation isobare.
- L'énergie à apporter pour passer d'un état plus condensé à un état moins condensé correspond donc à une variation d'enthalpie du système.

Variation d'enthalpie lors d'un changement d'état isobare

Lors d'un changement d'état d'un état plus condensé à un état moins condensé d'une quantité de matière n ou d'une masse m d'un corps pur, la variation d'enthalpie du système est :

$$\Delta H_{\text{ch état}} = n \times \Delta H_{m \text{ ch état}} = m \times \Delta h_{\text{ch état}}$$

avec $\Delta H_{m \text{ ch état}}$ l'enthalpie molaire de changement d'état (ou chaleur latente molaire de changement d'état L_m) en $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$, et $\Delta h_{\text{ch état}}$ l'enthalpie massique de changement d'état (ou chaleur latente massique de changement d'état ℓ) en $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Les trois enthalpies de changement d'état

Pour la fusion : $L_{m \text{ fus}} = \Delta_{\text{fus}} H$

Pour la vaporisation : $L_{m \text{ vap}} = \Delta_{\text{vap}} H$

Pour la sublimation : $L_{m \text{ sub}} = \Delta_{\text{sub}} H$

Conclusion : les deux causes de variation d'enthalpie

L'enthalpie d'un système varie :

- si sa température varie : $\Delta H = C_p \Delta T$,
- s'il subit un changement d'état : $\Delta H = \pm n \Delta H_{\text{ch état}}$.

3 Bilans d'énergie

3.1 Méthode

Méthode générale de résolution des exercices sur le premier principe

- 1 Définir le système étudié et poser éventuellement des hypothèses sur sa nature : gaz parfait, phase condensée de volume invariable, etc.
- 2 Déterminer les caractéristiques de l'état initial et de l'état final : température, volume, etc.
- 3 Identifier les caractéristiques de la transformation : adiabatique, isotherme, isochore, isobare, avec ou sans mouvement d'ensemble, etc.
- 4 Faire les simplifications évidentes imposées par la nature de la transformation :
 - si la transformation est adiabatique, alors $Q_{\text{reçue}} = 0$;
 - si la transformation est isochore, il n'y a pas de travail de forces pressantes, et si aucun autre travail n'intervient, alors $W_{\text{reçu}} = 0$;
 - si le système est immobile, alors $\Delta E_c = 0$ et généralement $\Delta E_p = 0$;
 - etc.
- 5 Appliquer le premier principe, sous sa forme infinitésimale avec la relation ou en terme de puissance, selon les situations. Dans le cas où le volume est constant, le travail des forces pressantes est nul et il est préférable d'utiliser l'énergie interne. Dans le cas où la pression est constante, il faut privilégier la fonction enthalpie.

3.2 Calculs de transfert thermique

3.2.1 Échauffement d'une pièce

On considère une pièce hermétiquement fermée et de volume constant $V = 10 \text{ m}^3$ contenant de l'air à la pression $P_1 = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ et à la température $T_1 = 15^\circ\text{C}$. Les murs de la pièce sont recouverts d'un isolant thermique dont la capacité thermique est négligeable. Un radiateur électrique assimilable à une masse de 3 kg de métal, fournit une énergie de 43 kJ. Quelle est la température finale, si on néglige les pertes thermiques par les parois ?

La capacité thermique molaire à volume constant est : $C_{vm} = 5R/2$.

La capacité thermique massique du métal est : $c = 0,50 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

3.2.2 Refroidissement d'une phase condensée

On considère une masse $m = 1,0 \text{ kg}$ d'eau liquide, initialement à la température $T_1 = 60^\circ\text{C}$. On la laisse refroidir dans un récipient ouvert au contact de l'air ambiant dont la température est $T_0 = 20^\circ\text{C}$. Quel est le transfert thermique de l'eau vers le monde extérieur au cours du processus ?

La capacité thermique massique de l'eau liquide est $c_e = 4,18 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ et est supposée indépendante de la température.

3.3 Calorimétrie

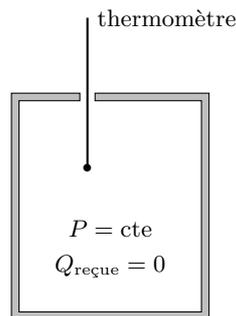
3.3.1 Principe de la calorimétrie

Calorimétrie

La calorimétrie consiste à réaliser une transformation dans une enceinte calorifugée, le **calorimètre**, en mesurant la température intérieure

Le système contenu dans le calorimètre subit une transformation adiabatique.

En pratique, on fait surtout de la calorimétrie soit à pression constante : le couvercle du calorimètre est percé d'un petit trou permettant l'équilibre mécanique entre l'intérieur et l'extérieur.



Bilan enthalpique dans un calorimètre

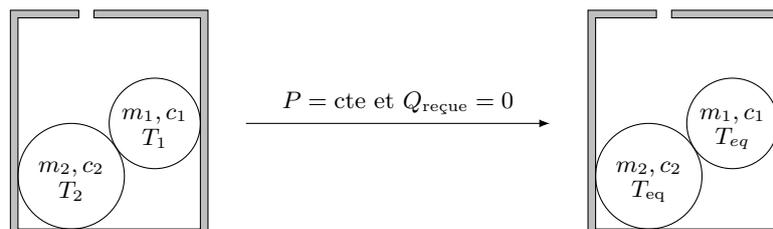
En calorimétrie, le système est l'intérieur du calorimètre qui est immobile, à pression constante et sans transfert thermique. Le premier principe s'écrit :

$$\Delta H_{\text{cal}} + \Delta H_1 + \Delta H_2 + \dots = W^*$$

avec ΔH_{cal} la variation d'enthalpie de l'intérieur du calorimètre, ΔH_1 , ΔH_2 , etc les variations d'enthalpie des corps contenus dans le calorimètre.

3.3.2 Mise à l'équilibre thermique de deux phases condensées

On place dans un calorimètre à pression constante un solide de masse m_1 , de capacité thermique massique c_1 et initialement à la température T_1 , et un solide de masse m_2 , de capacité thermique massique c_2 et initialement à la température T_2 . On referme immédiatement le calorimètre et on attend que la température intérieure se stabilise à sa valeur finale T_{eq} , dont on cherche à déterminer la valeur. La capacité thermique des parois intérieures du calorimètre est C .



3.4 Énergie mise en jeu lors d'un changement d'état

On remplit une bouteille en plastique souple avec 1 kg d'eau liquide (capacité thermique massique $c_\ell = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) initialement à la température $T_1 = 20^\circ\text{C}$. On l'introduit dans un congélateur dont la température est maintenue à $T_2 = -18^\circ\text{C}$ et on attend l'équilibre thermique. Quel est le transfert thermique de l'eau vers le monde extérieur au cours de la transformation ?

La capacité thermique massique de la glace est $c_s = 2,10 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

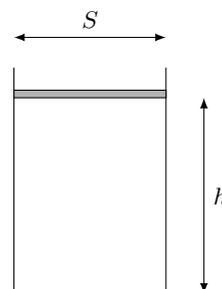
L'enthalpie massique de fusion de l'eau sous 1 bar est $\Delta h_{\text{fus}} = 333 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Exercices

Application directe du cours

Exercice 1 : travail reçu lors de la compression d'un gaz

On considère un système constitué d'un gaz enfermé dans une enceinte de section $S = 50 \text{ cm}^2$. Il est séparé par un piston de l'atmosphère extérieure, dans laquelle règne une pression $P_{\text{atm}} = 1,0 \text{ bar}$. À l'état initial, le piston est bloqué, la pression du gaz est inférieure à la pression atmosphérique et la hauteur de gaz dans l'enceinte est $h_1 = 40 \text{ cm}$. On débloque le piston, et celui-ci descend de $\Delta h = 12 \text{ cm}$ avant de s'immobiliser.



1. Que dire de la pression extérieure (associée à l'ensemble des forces qui s'exercent) ?
2. Calculer la variation de volume du gaz.
3. Calculer le travail reçu par le système au cours de la transformation, si le piston est de masse négligeable.
4. Même question si la masse du piston est $M = 200 \text{ g}$ pour une même variation de hauteur du piston.

Exercice 2 : détente d'un gaz parfait

On considère un gaz parfait, enfermé dans une enceinte de volume $V_1 = 0,40 \text{ m}^3$, fermée par un piston mobile sans frottement et de masse négligeable. L'atmosphère extérieure est à la pression $P_{\text{atm}} = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. Le piston est initialement bloqué, et la pression intérieure est $P_1 = 1,2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. On débloque le piston ; le gaz subit une transformation isotherme.

1. Quelle est la pression du gaz à l'intérieur de l'enceinte à l'équilibre ? En déduire la variation de volume.
2. L'état d'équilibre est atteint suite au déblocage brutal du piston. Calculer le travail reçu par le gaz parfait au cours de la transformation.
3. L'état d'équilibre est maintenant atteint de façon très lente, grâce à l'action d'un opérateur. Préciser ce que l'opérateur doit faire concrètement. Calculer le travail reçu par le gaz parfait.

Exercice 3 : échanges d'énergie lors d'une fusion

Dans tout cet exercice, on étudie une masse $m = 1,0 \text{ g}$ d'eau, sous une pression constante $P_0 = 1,0 \text{ bar}$. On fait passer cette masse d'eau de l'état solide à l'état liquide à température constante égale à 0°C .

1. Quel est le transfert thermique reçu par l'eau ?
2. Que dire de la pression extérieure au cours de la transformation ? Calculer le travail reçu par l'eau sous l'action des forces pressantes.
3. Calculer la variation d'énergie interne de l'eau au cours de la transformation. Quelle est la contribution principale ?

Sous $1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$,
enthalpie massique de fusion de l'eau à 0°C : $\ell_{\text{fus}} = 335 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$
volume massique de la glace à 0°C : $v_s = 1,09 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$
volume massique de l'eau liquide à 0°C : $v_\ell = 1,00 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$

Exercice 4 : transfert thermique lors d'une compression

Soit une quantité de matière n d'un gaz enfermé dans un cylindre de volume initial $V_{\text{ini}} = 2,0 \text{ L}$ par un piston mobile de surface $S = 40 \text{ cm}^2$ et de masse négligeable. Les parois du cylindre sont diathermanes, et l'ensemble est à l'équilibre à la pression $P_{\text{ini}} = P_{\text{atm}} = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ et à la température $T_{\text{ini}} = 20^\circ\text{C}$.

On pose sur le piston une masse $M = 500 \text{ g}$; le piston descend puis s'immobilise ; lorsque l'équilibre est atteint, le volume final du gaz dans le cylindre est V_{fin} . Durant toute la transformation, la température du monde extérieur est $T_{\text{ext}} = 20^\circ\text{C}$.

1. Calculer la quantité de matière dans le cylindre.
2. Calculer la pression finale et la température finale.
3. Calculer le travail reçu et le transfert thermique reçu par le gaz dans le cas où l'opérateur pose d'un coup la masse M sur le piston.
4. Même question si l'opérateur pose très lentement des toutes petites masses jusqu'à avoir posé la masse totale M .

Exercice 5 : travail reçu lors d'une détente adiabatique

On considère de l'air enfermé dans un volume $V_{\text{ini}} = 4 \text{ m}^3$ sous la pression $P_{\text{ini}} = 2,0 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ et à la température 300 K . On effectue une détente très lente jusqu'à atteindre la $V_{\text{fin}} = 6 \text{ m}^3$. Les parois de l'enceinte sont parfaitement athermanes, et on admet que, dans ces conditions, le gaz obéit à la loi de Laplace : la grandeur PV^γ reste constante, avec $\gamma = 7/5$ pour l'air.

1. Calculer la pression finale et température finale.
2. Écrire le premier principe en tenant compte des conditions de la transformation.
3. Calculer de la façon la plus simple possible le travail reçu.

Entrainement

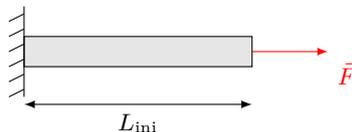
Exercice 6 : travail électrique

Une pile est constituée de deux électrodes, entre lesquelles il existe une différence de potentiel, notée e . On considère un dispositif électrique branché entre les deux bornes de cette pile. Il est traversé par un courant électrique d'intensité i .

1. Rappeler l'expression du travail électrique reçu par ce dispositif pendant le temps dt , en fonction de i et e . En déduire le travail reçu par la pile pendant ce même intervalle de temps.
2. Pendant le temps dt , la charge de la pile évolue de dq . Préciser son signe. Exprimer le travail électrique reçu par la pile pendant le temps dt en fonction de dq .
3. Le dispositif électrique branché sur la pile comporte une partie résistive R . Rappeler la formule donnant l'énergie dissipée sous forme de transfert thermique dans la partie résistive pendant le temps dt . En déduire la fraction de l'énergie fournie par la pile qui peut effectivement être utilisée. Comment minimiser les pertes d'énergie ? Citer une application pratique.
4. Si la pile est rechargeable, on parle d'accumulateur. Que dire du travail reçu par un accumulateur lors de la phase de charge ?

Exercice 7 : allongement d'une tige

On considère une tige de longueur L_1 , fixée à une de ses extrémités. Un opérateur exerce sur la tige une force \vec{F} ; la tige subit un allongement dL .



1. Donner l'expression du travail élémentaire échangé (sans se préoccuper du signe pour le moment) lors de cette transformation, en fonction du module de la force F et de l'allongement élémentaire dL . On pourra faire une analyse dimensionnelle, c'est-à-dire raisonner sur les unités, ou raisonner sur la relation de cause à effet entre force et allongement.
2. La force étant orientée comme sur le schéma, préciser le signe de la variation de longueur de la tige dL . En analysant le sens des échanges énergétiques, déterminer l'expression algébrique du travail reçu par la tige.
3. Écrire l'expression littérale du travail échangé si la tige passe de la longueur L_1 à la longueur $L_2 > L_1$, et proposer une représentation graphique du travail échangé.

Exercice 8 : transfert thermique dégagé lors du refroidissement de fer fondu

On considère une masse $m = 100 \text{ g}$ de fer liquide initialement à la température de fusion $T_f = 1535 \text{ °C}$. On le laisse refroidir au contact de l'atmosphère à $T_0 = 20 \text{ °C}$.

1. Montrer que le fer cède d'énergie au monde extérieur sous forme d'un transfert thermique, successivement selon deux processus différents.
2. Calculer le transfert thermique total dégagé par le fer.

capacité thermique massique du fer solide : $c = 0,460 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

chaleur latente massique de fusion du fer : $\ell_f = 246 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$

Exercice 9 : mesure de la capacité thermique de l'aluminium

Dans un calorimètre à pression constante, on place une masse $m_1 = 1,00 \text{ kg}$ d'eau liquide et on attend jusqu'à stabilisation de la température, qui vaut alors $T_1 = 300,0 \text{ K}$. On introduit une masse $m_2 = 100,0 \text{ g}$ d'aluminium porté à la température $T_2 = 600,0 \text{ K}$. La température intérieure se stabilise à la valeur $T_{\text{fin}} = 306,2 \text{ K}$. On cherche à mesurer la capacité thermique massique de l'aluminium, supposée constante sur l'intervalle de température considéré. La capacité thermique massique de l'eau liquide est : $c_1 = 4,18 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

1. Définir le système d'étude.
2. Dans un premier temps, on néglige la capacité thermique du calorimètre. À l'aide d'un bilan appliqué au système, exprimer la capacité thermique massique de l'aluminium c_2 en fonction de T_{fin} et des autres données du problème. Faire l'application numérique.
3. En réalité, les parois intérieures du calorimètre sont constituées d'un solide de capacité thermique totale $C_{\text{cal}} = 50 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$. Calculer la valeur de c_2 .

Travaux dirigés

Exercice 1 : calcul d'un travail sur une transformation cyclique

On considère un gaz parfait ($C_{vm} = 5R/2$ et $C_{pm} = 7R/2$) enfermé dans un cylindre dont le volume peut varier grâce à un piston mobile sans masse. À l'état initial (état A), le volume est $V_A = 100 \text{ cm}^3$, la pression est $P_A = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ et la température est $T_1 = 20^\circ\text{C}$. La pression sur la face extérieure du piston est de $1,0 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. On fait subir au gaz les transformations suivantes :

- échauffement à pression constante jusqu'à doubler le volume (état B),
- compression isotherme jusqu'à revenir au volume initial (état C),
- refroidissement à volume constant jusqu'à retour à la pression initiale.

1. Représenter la transformation $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ sur un diagramme de Watt donnant P en fonction de V .
2. Expliquer comment on réalise concrètement la transformation $A \rightarrow B$. Calculer le travail reçu par le gaz $W_{\text{reçu AB}}$ de deux façons.
3. Expliquer comment on réalise concrètement la transformation $B \rightarrow C$. Calculer le travail reçu par le gaz $W_{\text{reçu BC}}$.
4. Expliquer comment on réalise concrètement la transformation $C \rightarrow A$. Calculer le travail reçu par le gaz $W_{\text{reçu CA}}$.
5. Calculer le travail total reçu par le gaz $W_{\text{reçu}}$. En déduire le transfert thermique total reçu.
6. Graphiquement, comment lit-on $W_{\text{reçu}}$?

Exercice 2 : mesure d'une chaleur latente

Sous pression atmosphérique, la température d'ébullition du diazote est $T_e = 77,4 \text{ K}$. Le diazote liquide est conservé dans un « vase de Dewar ». Il s'agit d'un récipient bien isolé thermiquement (mais pas parfaitement), qui communique avec l'atmosphère ; en pratique, il est fermé par un couvercle simplement posé sur le vase, ce qui permet une sortie permanente de diazote gazeux. Le faible apport d'énergie à travers les parois et l'ouverture du vase entretient une lente ébullition du liquide, qui s'évapore peu à peu. On dispose ainsi d'une source de froid commode et économique.

1. En supposant que le diazote liquide contenu dans le calorimètre soit homogène, comment évolue sa température au cours du temps ?

On désire mesurer l'enthalpie massique de vaporisation du diazote sous la pression atmosphérique. Pour cela, on place sur une balance électronique un vase de Dewar contenant du diazote liquide. La masse de l'ensemble diminue au cours du temps. Le mode opératoire est le suivant.

- À l'instant initial, la balance indique 528 g.
- Entre $t = 0$ et l'instant $t_1 = 10 \text{ min}$, on alimente une résistance R de capacité thermique négligeable plongée dans le vase de Dewar sous une tension U constante ; à t_1 , la balance indique 486 g.
- Le chauffage est coupé à t_1 ; à $t_2 = 15 \text{ min}$, la balance indique 476 g.

2. Expliquer pourquoi la masse diminue même en l'absence de chauffage.
3. Estimer la masse de diazote évaporé dans la première phase (masse m_1) et dans la deuxième phase (masse m_2).
4. On désigne par P_J la puissance reçue par effet Joule par le contenu du calorimètre et P la puissance reçue par les autres transferts thermiques ; elles sont supposées constantes. Établir pour chaque phase de l'expérience une relation entre m_1 , m_2 , t_1 , t_2 , P_J , P et l'enthalpie massique de vaporisation du diazote Δh_{vap} .
5. En déduire une expression littérale de Δh_{vap} indépendante de P . Calculer sa valeur numérique si $U = 8,5 \text{ V}$ et $R = 10 \Omega$.

Exercice 3 : préparation d'un bain eau-glace

Pour réaliser des expériences (par exemple de cinétique chimique) à température constante et inférieure à la température atmosphérique, la méthode la plus simple est d'opérer dans un bain constitué d'un mélange d'eau liquide et d'eau solide à l'équilibre. On souhaite étudier la préparation d'un tel mélange.

On travaille à pression constante dans un calorimètre aux parois parfaitement athermanes, dont on néglige la capacité thermique. Une masse $m_0 = 200 \text{ g}$ d'eau liquide à la température ambiante est placée dans le

calorimètre ; après mise à l'équilibre thermique, la température intérieure se stabilise à $T_0 = 20\text{ °C}$. Une masse m de glace initialement à la température $T_f = 0\text{ °C}$ est introduite dans le calorimètre, et on attend l'équilibre thermique.

1. Expliquer l'intérêt d'un mélange eau-glace à l'équilibre pour réaliser une expérience à température constante.
2. Expliquer qualitativement ce qui se passe, et mettre en évidence qu'en fonction de la masse de glace introduite, le système final est soit monophasé soit diphasé.
3. Déterminer la masse limite de glace m_{lim} à introduire pour avoir un système final biphasé. Préciser s'il s'agit d'une masse minimum ou maximum. En déduire les conditions pour réaliser un mélange eau-glace à 0 °C .
4. Préciser la nature du système à l'état final si on introduit 100 g de glace. On demande une réponse chiffrée : température du système, nombre de phases en présence et masse de chacune d'elles.
5. Dans le cas où le calorimètre aurait des parois intérieures de capacité thermique non nulle, la valeur de m_{lim} serait-elle moins grande ou plus grande ? Justifier.
6. Même question dans le cas où on réaliserait le mélange dans un récipient non calorifugé au contact de l'atmosphère.

chaleur latente massique de fusion de l'eau sous pression atmosphérique :	$\ell_f = 333\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
température de fusion de l'eau sous pression atmosphérique :	$T_f = 273\text{ K} = 0\text{ °C}$
capacité thermique massique de l'eau solide :	$c_s = 2,1\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
capacité thermique massique de l'eau liquide :	$c_e = 4,2\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$