LP20-Conservation de l'énergie

Niveau PCSI :

Effectuer des bilans d'énergie.	Mettre en œuvre une technique de calorimétrie.

Notions et contenus	Capacités exigibles
3.3. Premier principe. Bilans d'énergie	
Premier principe de la thermodynamique.	Définir un système fermé et établir pour ce système un bilan énergétique faisant intervenir travail et transfert thermique. Utiliser le premier principe de la thermodynamique entre deux états voisins. Exploiter l'extensivité de l'énergie interne. Distinguer le statut de la variation de l'énergie interne du statut des termes d'échange. Calculer le transfert thermique sur un chemin donné connaissant le travail et la variation de l'énergie interne.
Enthalpie d'un système. Capacité thermique à pression constante dans le cas du gaz parfait et d'une phase condensée incompressible et indilatable.	Exprimer le premier principe sous forme de bilan d'enthalpie dans le cas d'une transformation monobare avec équilibre mécanique dans l'état initial et dans l'état final. Exprimer l'enthalpie $H_m(T)$ du gaz parfait à partir de l'énergie interne. Justifier que l'enthalpie H_m d'une phase condensée peu compressible et peu dilatable peut être considérée comme une fonction de l'unique variable T. Citer l'ordre de grandeur de la capacité thermique massique de l'eau liquide.

Prérequis

- Passage fondamental d'une réalité microscopique à des grandeurs mesurables macroscopique (L1)
- Définitions de systèmes thermodynamiques, variables d'état, expression des forces de pressions (L1)
- Mécanique : Lois de Newton, notion de force
- Energie potentielle, cinétique

Difficultés

Séquence pédagogique

- TD : utilisation du TEC pour retrouver l'équation du pendule simple
- TD : utilisation du TEM pour démontrer qu'on a conservation de la vitesse dans le cas de chocs parfaitement élastiques. (Hecht)
- TD : Variation d'enthalpie dans le cas d'une transformation monobare en équilibre mécanique à l'état final et l'état initial
- TP : détermination de la chaleur latente de fusion de l'eau

bibliographie

- Hecht Physique
- Salamito

Introduction

L'énergie décrit l'état d'un système sous l'influence des quatre forces fondamentales (gravitation, électromag, nuc forte, nuc faible). On peut l'observer indirectement par des variations de vitesse, de masse, de position. La variation d'énergie d'un système est la mesure du changement physique du système.

Propriété la plus importante : l'énergie est transférée d'un domaine d'interaction à un autre, l'énergie totale reste inchangée.

Ainsi, si je prends une balle de tennis et que je la laisse tomber, son énergie potentielle de position est transformée en énergie cinétique. De la même manière, si je prends un pendule, la même transformation s'effectue.

Cependant, on observe que le pendule ne remonte pas autant que de là où je l'ai lâché : on aurait alors une perte d'énergie ?

En réalité, cette énergie mécanique est transférée sous forme de chaleur à la pièce et au pivot du pendule. On a alors variation d'énergie de notre système. Comment la caractériser ?

1 Aspect macroscopique : Mécanique

Pour quantifier la variation d'énergie d'un système on dispose de plusieurs théorèmes selon le cas.

1.1 Théorème de l'énergie cinétique

Enoncé Dans un référentiel galiléen, la variation d'énergie cinétique d'un point matériel entre deux instants est égale au travail des forces qui s'exercent sur ce point entre les deux instants considérés.

démo (pas au tableau) PFD avec la masse constante au cours du temps :

$$m\frac{\mathbf{d}\vec{v}}{\mathbf{d}t} = \sum_i \vec{f_i}$$

on multiplie par $\vec{v}$

$$m\frac{\mathbf{d}\vec{v}}{\mathbf{d}t}\cdot\vec{v} = \left(\sum_i \vec{f_i}\right)\cdot\vec{v} = \sum_i\left(\vec{f_i}\cdot\vec{v}\right) = \sum_i \mathcal{P}(\vec{f_i})$$

avec $\mathcal{P}(\vec{f_i})$ la puissance de $\vec{f_i}$

$$m\frac{\mathbf{d}\vec{v}}{\mathbf{d}t}\cdot\vec{v} = m\frac{\mathbf{d}}{\mathbf{d}t}\left(\frac{\vec{v}\cdot\vec{v}}{2}\right) = \frac{\mathbf{d}}{\mathbf{d}t}\left(\frac{1}{2}mv^2\right) = \frac{\mathbf{d}E_c}{\mathbf{d}t}$$

On obtient alors le théorème de la puissance cinétique :

$$\frac{\mathbf{d}E_c}{\mathbf{d}t} = \sum_i \mathcal{P}(\vec{f_i})$$

$$\int_{t_A}^{t_B}\frac{\mathbf{d}E_c}{\mathbf{d}t}\mathbf{dt} = \int_{t_A}^{t_B}\left(\sum_i \mathcal{P}(\vec{f_i})\right)\mathbf{dt} = \sum_i\int_{t_A}^{t_B}\mathcal{P}(\vec{f_i})\mathbf{dt} = \sum_i\int_{t_A}^{t_B} W_{A\to B}(\vec{f_i})$$

Donc

$$\boxed{\Delta E_C = \sum_i W_{A\to B}(\vec{f_i})}$$

discussion sur le signe de $\sum_i W_{A\to B}(\vec{f_i})$

- Si la somme des travaux des forces est positive, le travail est moteur, le mouvement est alors accéléré.
- Si la somme des travaux des forces est négative, le travail est résistant, le mouvement est alors décéléré.
- Si la somme des travaux des forces est nul, le mouvement est uniforme.

Dans le cas du pendule simple, c'est le travail de la force de gravité qui donne la variation de l'énergie cinétique.

On peut alors retrouver l'équation du mouvement grâce au TEC, c'est ce qu'on fera en TD.

Remarque :Le théorème de l'énergie cinétique n'est que la version énergétique du PFD. Il est avantageux car il ne fait intervenir qu'une équation scalaire, et est donc parfaitement adapté aux mouvements décrits par une seule coordonnée.

1.2 Théorème de l'énergie mécanique

On dit qu'une force est conservative si elle dérive d'un potentiel, c'est-à-dire si

$$\vec{f}\cdot \mathrm{d}\vec{OM} = \delta W(\vec{f}) = -\mathrm{d}E_p$$

Exemples : poids, force gravitationnelle, force de rappel d'un ressort

Comme ces forces dérivent d'une énergie potentielles, leur travail ne dépend pas du chemin suivi : $\Delta W(\vec{f}) = -\Delta E_p$.

Les forces qui ne dérivent pas d'un potentiel sont appelée forces non conservatives.

Ce théorème traduit la variation de l'énergie mécanique.

$$\boxed{\Delta E_m = \sum W(\vec{f_{nc}})}$$

Avec $\vec{f_{nc}}$ une force non conservative.

Les forces non conservative sont dites dissipatrice (forces de frottements) car leur travail dissipe l'énergie mécanique.

Démo

$$W_{tot} = W(\vec{f_C}) + W(\vec{f_{NC}}) = -\Delta E_p + W(\vec{f_{NC}})$$

Théorème de l'énergie cinétique :

$$\Delta E_C = W_{tot} = -\Delta E_p + W(\vec{f_{NC}})$$

Donc

$$\mathrm{d}E_m = \mathrm{d}(E_C + E_p) = \delta W(\vec{f_{NC}})$$

Remarque :Dans le cas de mvt conservatif, l'énergie mécanique est une intégrale première du mouvement.

1.3 Exercice : le pendule de Newton

On montre le pendule simple : pendule de Newton à deux masses (demi pendule)

Collision élastique = énergie cinétique globalement conservée :

$$E_{C,1} + E_{C,2} = E'_{C,1} + E'_{C,2}$$

et forces extérieures au systèmes négligées :

$$\frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2}mv_2^2 = \frac{1}{2}mv_1'^2 + \frac{1}{2}mv_2'^2$$

Avec $v_2 = 0$ et $v_1' = V_0$

Egalité des quantité de mouvements :

$$mv_1 + 0 = mv_1' + mv_2'$$

Donc on a :

$$v_1 - v_1' = v_2'$$
$$v_1^2 - v_1'^2 = v_2'^2$$

factorisation de la 2e

$$(v_1 - v_1')(v_1 + v_1') = v_2'^2$$

Donc

$$v_1 + v_1' = v_2'$$
$$v_1 - v_1' = v_2'$$

Addition : $v_1 = v_2'$ et soustraction $v_1' = 0$

1.4 Transition

: L'énergie est parfois dissipée sous forme de chaleur : premier principe

L'avancée fondamentale du premier principe de la thermodynamique pour la physique consiste en l'introduction de l'énergie interne. Cette énergie rend compte de l'agitation interne du système au niveau atomique. Comme toute énergie, elle est définie à une constante près.

La difficulté de rendre compte de l'état microscopique de la matière la rend souvent impossible à calculer en pratique ; grâce à l'équation du premier principe de la thermodynamique, il est par contre possible de calculer ses variations.

2 Thermodynamique

2.1 Premier principe de la thermodynamique

2.1.1 Enoncé

Le premier principe de la thermodynamique est un principe d'existence. Il postule qu'il existe une fonction U énergie interne telle que

- U est une fonction d'état (elle ne dépend que des états initiaux et finaux de la transformation)
- U est extensive
- U se conserve dans un système isolé.

ΔU est la valeur moyenne de l'énergie totale des particules : elle comprend E_C des particules microscopiques et E_p l'énergie potentielle.

C'est également un principe de conservation de l'énergie :

$$\boxed{\Delta E_m + \Delta E_c + \Delta U = \sum W(\vec{f_i}) + Q}$$

Avec Q le transfert thermique reçu par le système et $W(\vec{f_i})$ les travaux reçus par le système.

Ainsi, la variation de l'énergie totale d'un système, composé des énergies E_C et E_p macro et de l'énergie interne microscopique est égale à l'énergie reçue par le système.

Remarque : On parle d'énergie reçue par le système de manière algébrique, Q peut être négatif.

2.1.2 Cas d'un système isolé et immobile (E_c et $E_p = 0$)

Dans le cas d'un système au repos, on obtient :

$$\Delta U = W + Q$$

2.1.3 Obtention du transfert thermique

On peut avoir accès au travail reçu par le système via les paramètres physiques du système mais on ne peut avoir accès au transfert thermique que par le premier principe pour l'instant, on a donc deux inconnues dans l'équation.

2.1.4 Capacité thermique à volume constant C_v

On appelle capacité thermique à volume constant d'un système fermé Σ la grandeur C_v telle que la variation dU de l'énergie interne de Σ lorsque la température varie de dT, le volume restant constant, est :

$$\mathrm{d}U = C_V \mathrm{d}T$$

C_V est en $\mathrm{J\,K^{-1}}$

2.2 Fonction d'état enthalpie

2.2.1 Définition

La fonction enthalpie est la fonction d'état donnée par

$$H = U + PV$$

2.2.2 Démo Δ H $= \delta$ q dans un système isobare soumis uniquement aux forces pressantes

La fonction d'état enthalpie est utile lors de l'étude des transformations isobare car elle nous permet d'avoir une expression plus simple du premier principe.

Dans le cas d'une transformation isobare entre un état initial i caractérisé par (T_i, P_i, V_i) et un état final f caractérisé par $((T_f, P_f, V_f)$, on a :

$$P_i = P = P_f$$

Le travail des forces de pression dans la transformation est donné par :

$$W_{pression} = -P(V_f - V_i) = -P_f V_f + P_i V_i = -\Delta(PV)$$

Dans le cas d'un système isolé ($\Delta E_p = 0$) et immobile ($\Delta E_c = 0$), le premier principe s'écrit :

$$\Delta U = W + Q = -\Delta(PV) + Q$$

Or, $\Delta U + \Delta(PV) = \Delta(U + PV) = \Delta H$

Pour un système **isolé et immobile** subissant une **transformation isobare**, avec **équilibre mécanique dans l'état initial et final** obtient finalement :

$$\boxed{\Delta H = Q}$$

Remarque : Cette expression est valable également dans le cas d'une transformation monobare en équilibre mécanique à l'état final et l'état initial, démo en TD.

2.2.3 Capacité thermique à pression constante C_p

On appelle capacité thermique à pression constante d'un système fermé Σ la grandeur C_P telle que la variation $\mathrm{d}H$ de l'enthalpie de Σ lorsque la température varie de $\mathrm{d}T$, la pression restant constante, est :

$$\mathrm{d}H = C_P \mathrm{d}T$$

C_P est en $\mathrm{J\,K^{-1}}$

Remarque : La capacité thermique à pression constante dépend de la température.

2.3 Application à la calorimétrie

On a maintenant tous les outils pour quantifier la quantité d'énergie échangée dans un système fermé et nous pouvons donc en tirer des grandeurs caractéristiques comme la capacité calorifique du cuivre.

Manipulation de calorimétrie

Retours

Intro pédagogique : courte, insister sur les difficultés, imager les séances de TP

Intro de la leçon

Diapo : énergie potentielle de pesanteur, électricité Encadrer les résultats, couleur sur les titres

Questions Référentiels, hypothèses, dessin pour chaque théorème On intègre sur la trajectoire : expliquer dOM Non conservatif : dépend du chemin suivi : important d'utiliser les trajectoires

1er principe : il existe une fonction d'état intensive qui pour un système fermé et isolé valide :

P V : définir, donner l'unité

m, kg, mol, A, K, s, candela Monobare : hypothèse à appliquer dès que H est introduit

Capacité thermique

Varier les supports

Ne pas ouvrir le calorimètre pour les mesures

Vérifier la valeur en eau du calorimètre : ne pas faire confiance

Thermocouple : vérifier l'incertitude temps de réponse

Référentiel du labo : 2 min (axes sur la paillasse ne tournent pas)

Pour l'heure : référentiel géocentrique

Pour le mois : référentiel héliocentrique

L'univers est un système fermé : en comptant toutes les formes de l'énergie, l'énergie est conservée.

Pendule pesant : mêmes équations du mouvement que le pendule simple mais avec une masse et une longueur équivalente.

Formalisme expliqué à des élèves physiciens : d droit : variation d'une fonction d'état : ne dépend que de l'état du système, ne dépend pas du chemin suivi, peut être mis sous la forme de la dérivée d'une fonction. d rond : grandeur échangée, dépend du chemin qui est suivi.

delta et delta : variation infinitésimale. delta : on ne peut pas l'écrire en variation, on ne peut pas l'intégrer.