

Chapitre 2 : Premier principe et bilans d'énergie

Prérequis

- ▶ chapitre **THD1** - Systèmes thermodynamiques à l'équilibre
- ▶ Notions énergétiques en mécanique

Mots-clés

énergie interne, capacité thermique, enthalpie, transfert thermique, travail des forces de pression, 1er principe
transformation monotherme, isotherme, monobare, isobare, isochore, adiabatique, quasistatique, réversible, mécaniquement réversible



PLAN DU COURS

A

Le premier principe de la thermodynamique

- A.1** Échanges énergétiques d'un système avec son milieu extérieur
- A.2** Notion d'énergie interne
- A.3** Énoncé du premier principe

B

Capacité thermique d'un système

- B.1** Définition et intérêt
- B.2** Exemple du gaz parfait
- B.3** Exemple de la phase condensée

C

Travail des forces de pression

- C.1** Comment calculer le travail des forces de pression ?
- C.2** Qu'est-ce que la pression extérieure ?

D

La fonction d'état enthalpie

- D.1** Étude du cas d'une transformation à pression extérieure constante
- D.2** L'enthalpie

E

Transformation d'un système

- E.1** Variation d'une fonction d'état
- E.2** Différents types de transformation
- E.3** Réversibilité d'une transformation



LES SAVOIRS ET LES SAVOIR-FAIRE

A Le premier principe de la thermodynamique



CAPACITÉS EXIGIBLES

- Définir un système adapté à une problématique donnée.
- Distinguer qualitativement les trois types de transferts thermiques : conduction, convection et rayonnement.
- Exprimer l'énergie interne d'un gaz parfait monoatomique à partir de l'interprétation microscopique de la température.
- 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.

A.1 Échanges énergétiques d'un système avec son milieu extérieur

1. Préciser ce que représentent les termes transferts d'énergie W et Q .
2. Rappeler quelles sont les différentes manières de réaliser un transfert thermique.

A.2 Notion d'énergie interne

3. Que représente l'énergie interne U d'un système ?
4. U est une fonction d'état. Expliquer ce que cela signifie. De quelles variables dépend U pour un système fermé ?
5. Pourquoi peut-on affirmer que U est une grandeur extensive ?

A.3 Énoncé du premier principe

6. Énoncer le premier principe.
7. Comment se simplifie son écriture dans le cas d'un système macroscopiquement au repos ?

B Capacité thermique d'un système



CAPACITÉS EXIGIBLES

- Exploiter la propriété $U_m = U_m(T)$ pour un gaz parfait.
- Exploiter la propriété $U_m = U_m(T)$ pour une phase condensée incompressible et indilatable.

B.1 Définition et intérêt

8. Définir la capacité thermique à volume constant C_V d'un système. Quel sens physique accordez-vous à cette grandeur ?
9. Définir la grandeur molaire et massique correspondante.

B.2 Exemple du gaz parfait

10. D'une manière générale, quelle relation peut-on écrire entre ΔU et ΔT pour un gaz parfait ?
11. Pour un gaz parfait monoatomique, justifier que $C_V = \frac{3}{2}nR$.
12. Pour un gaz parfait diatomique, donner l'expression de C_V . D'où vient la différence avec le cas monoatomique ?

B.3 Exemple de la phase condensée

13. Pour une phase condensée de capacité thermique C , justifier que $U = U(T)$ et $\Delta U = C\Delta T$.

C Travail des forces de pression

CAPACITÉS EXIGIBLES

- Évaluer un travail par découpage en travaux élémentaires et sommation sur un chemin donné dans le cas d'une seule variable.

C.1 Comment calculer le travail des forces de pression ?

14. D'une manière générale, comment s'écrit le travail élémentaire δW_p d'une force extérieure de pression P_{ext} s'exerçant sur une paroi mobile du système balayant un volume δV_b lors de son déplacement ?
Le montrer dans le cas unidimensionnel (un cylindre horizontal avec une seule paroi mobile plane se déplaçant suivant un axe Ox).
15. Dans quel cas de figure, peut-on écrire $\delta W_p = -P_{ext}dV$? Expliquer.

C.2 Qu'est-ce que la pression extérieure ?

16. La pression extérieure est-elle nécessairement la pression de l'air extérieur ?

D La fonction d'état enthalpie

CAPACITÉS EXIGIBLES

- 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.

D.1 Étude du cas d'une transformation à pression extérieure constante

17. Dédire du premier principe une expression de $\Delta(U + PV)$ dans le cas d'une pression extérieure constante.

D.2 L'enthalpie

18. Définir l'enthalpie H d'un système et énoncer la formulation du premier principe pour une transformation monobare en exploitant H .
19. Définir la capacité thermique à pression constante C_P .
20. Exprimer C_P dans le cas d'un gaz parfait mono- ou diatomique.
21. Pour un gaz parfait, établir l'expression de C_V et C_P en fonction du coefficient de Laplace γ (coefficient à définir).
22. Donner la valeur de γ pour un gaz parfait mono- ou diatomique.
23. Justifier que $C_P \simeq C_V = C$ pour une phase condensée.

E Transformation d'un système



CAPACITÉS EXIGIBLES

- Exploiter les conditions imposées par le milieu extérieur pour déterminer l'état d'équilibre final.
- Interpréter géométriquement le travail des forces de pression dans un diagramme de Watt.
- Identifier dans une situation expérimentale le ou les systèmes modélisables par un thermostat.

E.1 Variation d'une fonction d'état

24. Justifier que la variation d'une fonction d'état ne dépend pas du chemin suivi au cours de la transformation.

E.2 Différents types de transformation

25. Définir les termes : quasistatique, isochore, monobare, isobare, monotherme (définir dans ce cas ce qu'est un thermostat), isotherme, adiabatique.
26. «Faux-ami» : une transformation adiabatique est-elle isotherme ? Justifier avec un contre-exemple.
27. Qu'appelle-t-on diagramme de Watt ? Représenter l'allure d'une transformation isochore, isotherme ou isobare dans ce diagramme.
28. Transformation quasistatique et adiabatique d'un gaz parfait : énoncer et démontrer la **loi de Laplace**.

E.3 Réversibilité d'une transformation

29. Qu'est-ce-qu'une transformation réversible ?
30. En pratique, comment peut-on rendre une transformation réversible ?
31. Quelle différence faites-vous entre une transformation quasistatique et une transformation réversible ?



EXERCICES

👉 DIFFICULTÉ DE L'EXERCICE (ANALYSE, «TECHNICITÉ», ...)

🕒 DURÉE DE L'EXERCICE

COMPÉTENCES TRAVAILLÉES	Exercices					
	1	2	3	4	5	6
Exprimer ΔU ou ΔH pour un gaz parfait ou d'une phase condensée	•	•	•	•	•	•
Exploiter le 1er principe	•	•	•	•	•	•
Exprimer le travail des forces extérieures de pression	•		•	•		•
Exploiter la fonction enthalpie H	•	•				

Exercice 1

Réalisation d'une détente de différentes manières



On souhaite amener n moles de gaz parfait de coefficient $\gamma = 1,4$ d'un état (a) à un état (c) de manière isotherme et réversible. À l'état (a), température, pression et volume valent respectivement T_0 , P_0 et V_0 . À l'état (c), le volume atteint est βV_0 où $\beta = 4$.

1. Représenter la transformation dans un diagramme de Watt.
2. Quelle est la pression finale P_c ?
3. Exprimer le transfert thermique Q reçu par le gaz en fonction notamment de n , R et T_0 .

Désormais, on souhaite faire passer la même quantité de gaz du même état (a) vers le même état (c) mais en passant par un état intermédiaire (b). De (a) vers (b), la pression diminue et la transformation est isochore. Puis, de (b) vers (c), la transformation est isobare.

4. Représenter la transformation dans un diagramme de Watt.
5. Quelle est la température T_b à l'état (b) ?
6. Exprimer le transfert thermique Q reçu par le gaz en fonction notamment de n , R et T_0 .

On souhaite à nouveau faire passer la même quantité de gaz du même état (a) vers le même état (c) mais en passant par un état intermédiaire (d). De (a) vers (d), le volume augmente de manière isobare jusqu'au volume V_d . Puis, de (d) vers (c), la transformation est adiabatique et réversible.

7. Représenter la transformation dans un diagramme de Watt.
8. Déterminer le volume V_d et la température T_d à l'état (d). On pourra introduire et calculer $\alpha = \beta^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$.
9. Exprimer le transfert thermique Q reçu par le gaz en fonction notamment de n , R et T_0 .

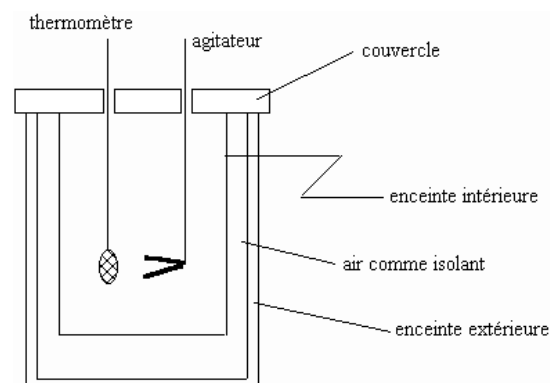
Exercice 2

Mesure d'une capacité thermique



Un calorimètre est un vase à parois calorifugées, non hermétiquement clos de sorte à ce que l'intérieur du vase soit soumis à la pression atmosphérique constante.

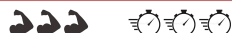
On donne la capacité thermique massique de l'eau $c_e = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{J}^{-1}$. Le calorimètre est de capacité thermique C initialement à température ambiante $\theta_1 = 21,0^\circ\text{C}$. On mélange $m_1 = 195 \text{ g}$ d'eau à θ_1 et $m_2 = 180 \text{ g}$ d'eau à $\theta_2 = 6,0^\circ\text{C}$ dans le calorimètre. Expérimentalement, on obtient à l'équilibre $\theta_e = 14,4^\circ\text{C}$.



1. Déterminer la masse équivalente en eau du calorimètre $\mu = C/c_e$.
2. On plonge un morceau de fer de masse $m = 30 \text{ g}$ dans le calorimètre précédent avec la même quantité totale d'eau. On attend suffisamment pour s'assurer que la thermalisation à l'intérieur se soit effectuée. On relève $\theta_i = 15,0^\circ\text{C}$ la température initiale. La résistance chauffante du calorimètre est alimentée sous une tension $U = 12 \text{ V}$ et un courant $I = 3 \text{ A}$. Au bout de $\Delta t = 25 \text{ min}$, on relève la température finale $\theta_f = 46,3^\circ\text{C}$. En déduire la capacité thermique massique c_{Fe} du fer.

Exercice 3

Compression adiabatique lente ou brutale



On considère un cylindre calorifugé muni d'un piston calorifugé de surface $S = 10,0 \text{ cm}^2$ de masse négligeable et contenant n moles de gaz parfait de coefficient $\gamma = 1,40$. On note $P_1 = 1,013 \text{ bar}$, $T_1 = 20,0 \text{ }^\circ\text{C}$, et $V_1 = 50,0 \text{ cm}^3$ respectivement la pression, température et le volume initial.

Cas d'une compression lente : on augmente au fur et mesure la pression extérieure en rajoutant des petites masses sur le piston jusqu'à atteindre une masse totale $m = 5,00 \text{ kg}$.

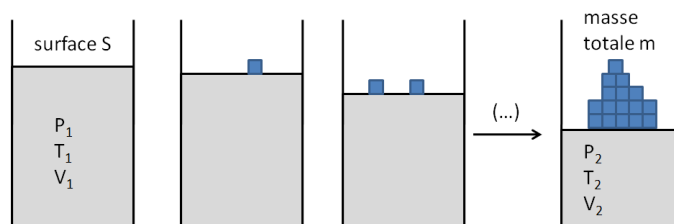
Cas d'une compression brutale : on pose la masse m d'un seul coup sur le piston, le piston chute brutalement sous l'effet du poids et on attend que l'état d'équilibre thermodynamique final soit observé.

1. Dans les deux cas, quelle est la pression finale P_2 ?

2. Compression lente :

- (a) Déterminer le volume final V_2 .
- (b) Déterminer la température finale T_2 .
- (c) Déterminer le travail W reçu par le gaz.

Compression lente



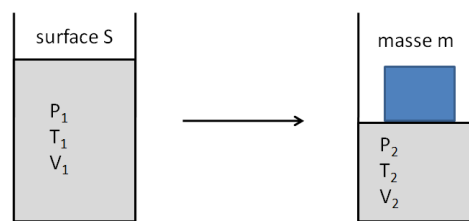
3. Compression brutale :

- (a) La pression extérieure P_{ext} est reliée à la force exercée par le piston d'altitude $z(t)$ sur le gaz : $\vec{F}_{piston/gaz} = -P_{ext}S\vec{u}_z$, avec \vec{u}_z orienté vers le haut. Au cours de la transformation, en appliquant la 2ème loi de Newton au système {piston+masse}, montrer que :

$$P_{ext} = P_2 + \frac{m\ddot{z}}{S}$$

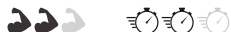
- (b) Montrer que $W = P_2(V_1 - V_2)$.
- (c) En déduire T_2 en fonction de T_1, P_1, P_2 et γ .
- (d) Déterminer V_2 et W .
- (e) Comparer à la compression lente et commenter.

Compression brutale

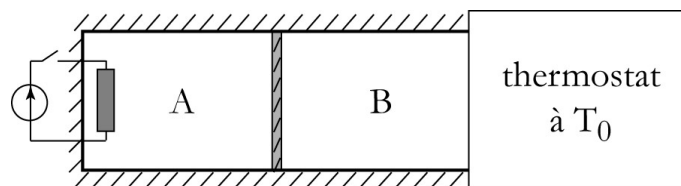


Exercice 4

Effet d'une résistance chauffante

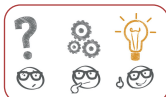


Un cylindre fermé horizontal est divisé en deux compartiments A et B de même volume $V_0 = 10 \text{ L}$ par un piston coulissant librement sans frottement. A et B contiennent chacun n moles de gaz parfait diatomique à la pression $P_0 = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ et à la température $T_0 = 300 \text{ K}$. On note γ le rapport des capacités thermiques, pris constant. Le piston, la surface latérale du cylindre et la surface de base du compartiment A sont adiabatiques. La surface de base du compartiment B est diathermane. Le diagramme ci-dessous illustre le montage expérimental.



Le compartiment A est porté très lentement à la température T_1 à l'aide d'une résistance chauffante (de volume et de capacité thermique négligeables) de telle sorte à ce que la pression dans ce compartiment atteigne $P_1 = 2P_0$. Cette résistance, valant $R = 10 \text{ } \Omega$, est parcourue par un courant continu $I = 1,0 \text{ A}$. La durée de chauffage nécessaire est notée τ . Le compartiment B reste en permanence en contact thermique avec un thermostat de température T_0 . On suppose que les échanges thermiques entre la résistance et le gaz sont rapides et que le mouvement du piston est lent.

1. Quelles sont les pression P_2 , température T_2 et volume V_2 dans le compartiment B à la fin de l'expérience ?
2. Quelle est la température finale T_1 dans le compartiment A ?
3. Quelle hypothèse peut-on faire sur la transformation subie par le gaz du compartiment B ?
4. Quel travail W_2 a été reçu par le compartiment B ? Et celui W_1 reçu par le compartiment de gauche ?
5. Quelle est la durée τ de chauffage ?

E
x

RÉSOLUTION DE PROBLÈME

Exercice 5

Chute d'une goutte dans un verre d'eau



Une goutte d'eau de volume est lâchée sans vitesse initiale au-dessus d'un verre d'eau. Déterminer la variation de température de l'eau qui en résulte.

Exercice 6

Remplissage brutal d'une capsule



On dispose d'une capsule indéformable de volume V_0 initialement vide. On perce un trou dans la paroi et une quantité d'air remplit très rapidement la capsule.

Quelle est la température finale du gaz dans la capsule ?

Volume V_0