

THERMODYNAMIQUE

Exercices – partie 1

LES PRINCIPES DE LA THERMODYNAMIQUE ET L'ÉTUDE DES CORPS PURS RÉELS

Premier principe

Exercice 1 : Questions à choix multiples

- a) Un système isolé ne peut pas échanger de la matière avec le milieu extérieur, mais peut échanger de l'énergie : vrai faux
- b) La variation d'énergie interne d'un système ne dépend que de l'état initial et de l'état final et pas de la nature de la transformation : vrai faux
- c) Pour calculer la variation d'énergie interne d'un système, il faut nécessairement que son état initial et son état final soient des états d'équilibre thermodynamique : vrai faux
- d) Lors d'une transformation isobare réversible, la quantité de chaleur échangée avec le milieu extérieur est égale à la variation d'enthalpie du système : vrai faux
- e) Lors d'une transformation isotherme réversible, la quantité de chaleur échangée avec le milieu extérieur est nulle : vrai faux
- f) Lors d'une transformation adiabatique réversible, le travail échangé avec le milieu extérieur est nul : vrai faux
- g) Lors d'une transformation isotherme réversible la variation d'énergie interne d'un gaz parfait est toujours nulle : vrai faux

Exercice 2 : Applications directes

(questions indépendantes)

- a) Au cours d'une transformation d'un système fermé au repos, l'énergie interne augmente de 60 kJ. Le système fournit au milieu extérieur un travail de 100 kJ. Quelle est la quantité de cha-

leur échangée par le système avec le milieu extérieur ? Dans quel sens le transfert thermique s'effectue-t-il ?

b) Deux moles d'air considérées comme un gaz parfait ($R = 8,31 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) subissent une compression réversible de 0,5 à 5 bars à température constante de $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Quel est le travail reçu par l'air ? En déduire la quantité de chaleur échangée par l'air avec le milieu extérieur. Dans quel sens le transfert thermique s'effectue-t-il ?

Exercice 3 : Conversion d'énergie dans un système isolé *(questions indépendantes)*

a) Une auto de 636 kg roulant à $72 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ sur une route horizontale s'arrête brusquement à l'aide de deux **freins à disques** de 2,5 kg chacun et de capacité thermique massique $420 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Calculer l'élévation de température des freins en supposant que toute l'énergie cinétique du véhicule est entièrement absorbée par les disques.

b) On considère une **chute d'eau** de hauteur h . En considérant que l'énergie cinétique acquise pendant la chute se dissipe intégralement en énergie interne dans les remous au bas de la chute, déterminer l'élévation de température d'un kilogramme d'eau pour une chute de 100 m ($c = 4,18 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ et $g = 9,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$).

Exercice 4 : Compression adiabatique d'un gaz parfait

Un récipient, fermé par un piston mobile, renferme $m = 2 \text{ g}$ d'hélium (gaz parfait monoatomique avec $\gamma = 1,66$, de masse atomique de $M = 4 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ et de capacité thermique molaire à volume constant $C_{m,v} = 12,5 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) dans les conditions (P_1, V_1, T_1) . On opère une compression adiabatique réversible qui amène le gaz dans les conditions (P_2, V_2, T_2) .

a) Préciser le système, les hypothèses de modélisation, le type de transformation ainsi que l'état initial et l'état final.

b) Sachant que $P_1 = 1 \text{ bar}$, $V_1 = 10 \text{ litres}$ et $P_2 = 3 \text{ bars}$, déterminer successivement le volume final du gaz, le travail reçu par le gaz et la variation d'énergie interne du gaz.

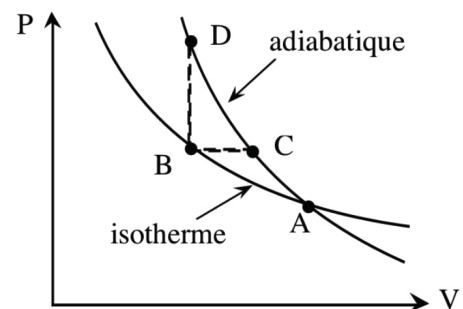
c) En déduire l'élévation de température ΔT du gaz.

Exercice 5 : Transformations réversibles d'un gaz parfait

Considérons les données suivantes :

- 25 g de gaz parfait diatomique ($\gamma = 1,4$),
- A et B sur une même isotherme,
- B et C sur une même isobare,
- B et D sur une même isochore,
- A, C et D sur une même adiabatique.

a) Compléter les valeurs de (P, V, T) pour tous les points ABCD dans le tableau suivant :



GP	A	B	C	D
$P \text{ (Pa)}$	10^5	10^6		
$V \text{ (litres)}$	20			
$T \text{ (K)}$	300			

b) Calculer les différentes énergies ($\Delta U, W, Q$) échangées pendant l'ensemble des cinq transformations (1, 2, 3, 4, 5) correspondant aux chemins (AB, AC, AD, BC, BD) :

GP	AB (1)	AC (2)	AD (3)	BC (4)	BD (5)
ΔU (J)					
W (J)					
Q (J)					

c) En déduire les valeurs des capacités thermiques massiques c_v et c_p et vérifier qu'il s'agit bien d'un gaz diatomique avec $\gamma = 1,4$.

d) La suite de transformations ABDA forme un cycle, déterminez le travail échangé au cours de ce cycle. Est-ce un cycle moteur ou récepteur ?

e) Considérer la transformation définie par la droite AD dans le diagramme $P(V)$. Quelle est la quantité de chaleur échangée par le système au cours de cette transformation ?

Exercice 6 : Succession d'évolutions adiabatique et isotherme

Une mole de gaz parfait ($R = 8,31 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) diatomique ($\gamma = 1,4$) initialement à la température de 20°C sous la pression de 1 bar, est comprimée de façon adiabatique et réversible jusqu'à une pression de 20 bars puis on ramène le gaz à la pression initiale de 1 bar par une détente isotherme.

a) Préciser le système, les hypothèses de modélisation, le type des transformations ainsi que les états initiaux et états finaux. Représenter ces deux évolutions dans un diagramme $P(V)$.

b) Calculer la température en fin de compression.

c) Calculer le travail total échangé par le gaz au cours de ces deux évolutions.

Exercice 7 : Cycle de Lenoir

Au cours des diverses transformations, nous supposons que le gaz, considéré comme parfait ($R = 8,31 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), décrit une suite continue d'états d'équilibres thermodynamiques internes (transformations réversibles). L'état initial d'une mole de ce gaz est caractérisé par $P_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ et $V_1 = 14 \text{ litres}$. On fait subir successivement à ce gaz :

- une détente isobare, qui double son volume,
- une compression isotherme, qui le ramène à son volume initial,
- un refroidissement isochore, qui le ramène à l'état initial (P_1, T_1).

a) Préciser le système, les hypothèses de modélisation, le type des transformations ainsi que les états initiaux et états finaux. Représenter le cycle de transformation dans le diagramme $P(V)$. Donner une représentation graphique du travail échangé au cours de ce cycle et préciser en le justifiant si le système reçoit ou fournit ce travail.

b) Déterminer la température à laquelle s'effectue la compression isotherme. En déduire la pression maximale atteinte.

c) Calculer le travail et la quantité de chaleur échangés par le système au cours du cycle.

Exercice 8 : Compresseur adiabatique – compresseur isotherme

Un compresseur prélève une mole d'air dans l'atmosphère à la pression $P_1 = 1 \text{ bar}$ et à la température $T_1 = 300 \text{ K}$ (état A), la comprime à la pression $P_2 = 10 \text{ bars}$ (état B) puis la refoule à pression constante dans un ballon gonflable (état C) où la pression est toujours égale à P_2 . On suppose que l'air est un gaz parfait diatomique ($\gamma = 1,4$ et $R = 8,31 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), que les diverses transformations sont réversibles et que le piston peut coulisser sans frottement.

1. Considérons d'abord un **compresseur adiabatique** où l'étape de compression est effectuée de façon adiabatique. L'étape de refoulement isobare s'accompagne alors d'un refroidissement jusqu'à la température T_1 .

a) Préciser le système, les hypothèses de modélisation, le type des transformations ainsi que les états initiaux et états finaux. Représenter dans un diagramme $P(V)$, le parcours ABC que subit cette mole d'air au cours de cette opération.

b) Calculer la température T_2 en fin de compression et déterminer le travail total reçu par l'air au cours de cette double opération.

2. Considérons maintenant un **compresseur isotherme** où l'étape de compression est effectuée cette fois de manière isotherme, la température finale en C étant donc toujours égale à T_1 .

a) Préciser de nouveau le système, les hypothèses de modélisation, le type des transformations ainsi que les états initiaux et états finaux. Représenter également, dans un diagramme $P(V)$, le parcours ABC que subit cette mole d'air au cours de cette autre opération.

b) Déterminer le travail total reçu par l'air au cours de cette opération.

c) En comparant les résultats obtenus entre les deux compresseurs, pour le même état initial et état final, en déduire quel type de compresseur est industriellement le plus intéressant.

d) Sachant d'une part qu'un compresseur réel doit fonctionner rapidement et que d'autre part toute transformation, pour être isotherme doit s'effectuer de manière très lente, que pouvez-vous conclure de cette étude ?

Exercice 9 : Compresseur à deux étages

Au cours des diverses transformations, nous supposons que l'air est un gaz parfait diatomique ($R = 8,31 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ et $\gamma = 1,4$) et qu'il décrit une suite continue d'états d'équilibres thermodynamiques internes.

1. Compresseur mono-étagé : Un compresseur amène une mole d'air de l'état initial A (P_1, T_1) à l'état B (P_2, T_2) par une compression adiabatique (transformation AB). L'air est ensuite refroidi de manière isobare de la température T_2 à la température T_1 (transformation BC).

a) Préciser le système, les hypothèses de modélisation, le type des transformations ainsi que les états initiaux et états finaux. Représenter, dans un diagramme $P(V)$, les deux étapes de la transformation ABC que subit l'air au cours de cette compression.

b) Établir l'expression de T_2 en fonction de T_1, P_1, P_2 et γ . Calculer la valeur de la température T_2 pour $P_2 = 10 P_1$ et $T_1 = 300 \text{ K}$.

c) Établir l'expression du travail total W_T échangé au cours de cette suite de transformations, en fonction de R, γ, T_1 et T_2 . Calculer la valeur de ce travail W_T .

d) Pour la suite, on pose $T_2 = a T_1$. Déterminez a en fonction de P_1, P_2 et γ puis calculer la valeur numérique de a .

e) En vous appuyant sur les réponses des questions précédentes, préciser l'expression de a et montrer que W_T s'exprime alors comme :

$$W_T = \frac{\gamma n R}{\gamma - 1} T_1 (a - 1)$$

2. Compresseur bi-étagé : La compression précédente est maintenant réalisée en deux étages. Dans le premier étage, on comprime de manière adiabatique l'air de la pression P_1 à la pression P'_2 comprise entre P_1 et P_2 (transformation AB'). La température de l'air en fin de compression est $T'_2 = b T_1$. À la sortie du premier étage, l'air est refroidi de façon isobare jusqu'à la température

T_1 (transformation B'C'), puis introduit et comprimé de manière adiabatique de la pression P'_2 à la pression finale P_2 (transformation C'B''). La température de l'air est alors $T''_2 = c T_1$ en fin de compression. L'air est enfin ramené à la température initiale T_1 par un refroidissement isobare (transformation B''C).

a) Représenter, dans un diagramme $P(V)$, la transformation AB'C'B''C que subit l'air au cours de cette compression dite bi-étagée. Comparer graphiquement les travaux W_T et W'_T mis en jeu, respectivement, lors des compressions mono-étagée et bi-étagée, faisant évoluer l'air de l'état (P_1, T_1) vers l'état (P_2, T_1) : qu'en concluez-vous ?

b) Établir les nouvelles expressions de T'_2 et de T''_2 en fonction de $T_1, P_1, P_2, P'_1, P'_2$ et γ . En déduire l'expression de c en fonction de a et de b .

c) Montrer alors que l'expression du travail total W'_T échangé au cours de cette compression bi-étagée est :

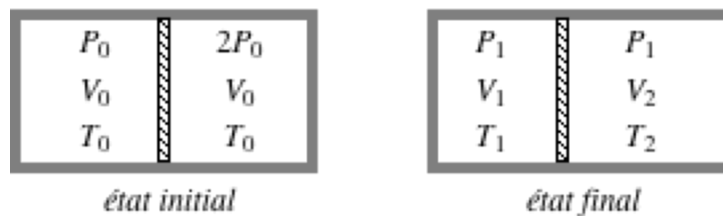
$$W'_T = \frac{\gamma n R}{\gamma - 1} T_1 \left(b + \frac{a}{b} - 2 \right)$$

d) Montrer que, a étant fixé, il existe une valeur de b (c'est-à-dire une valeur P'_2) pour laquelle le travail W'_T est minimum. Déterminer l'expression de b et le travail minimum W'_m correspondant.

e) Calculer W'_m et la valeur P'_2 de la pression correspondante pour $\gamma = 1,4$; $P_1 = 10^5$ Pa ; $P_2 = 10 P_1$; $T_1 = 300$ K.

Exercice 10 : Compartiments à piston

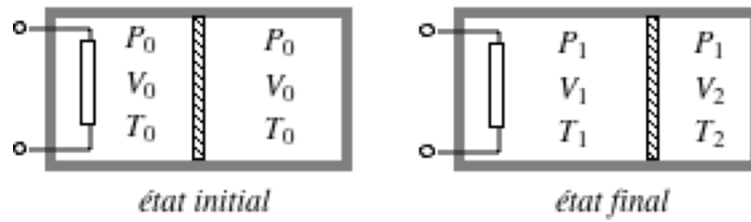
On considère un cylindre horizontal fermé, dont les parois sont isolées (calorifugées), divisé en deux compartiments par un piston mobile sans frottement.



1. Dans un premier temps, **le système est isolé**. À l'état initial, on fixe le piston de manière à ce que les deux compartiments contiennent le même volume $V_0 = 2$ litres d'air (gaz parfait, $\gamma = 1,4$) à la température $T_0 = 300$ K (27 °C). Dans le compartiment de gauche, la pression est $P_0 = 1$ bar et dans celui de droite, elle est de $2 P_0$. On libère ensuite le piston mobile (on admet que le déplacement s'effectue de façon quasi statique). À l'état final, lorsque l'équilibre est établi, il règne la même pression dans les deux compartiments.

- Déterminer les volumes V_1 et V_2 de chaque compartiment à l'équilibre.
- Calculer la pression finale P_1 de l'air en fonction de P_0 et du rapport des capacités thermiques massiques de l'air γ .
- Calculer les températures finales T_1 et T_2 dans chacun des deux compartiments.

2. Dans un deuxième temps, **le système n'est plus isolé**. Cette fois, l'air du compartiment de gauche reçoit de la chaleur du milieu extérieur à l'aide d'une résistance chauffante, celui de droite reste isolé. À l'état initial, les deux compartiments contiennent le même volume $V_0 = 2$ litres d'air à la température $T_0 = 300$ K (27 °C) à la pression $P_0 = 1$ bar. À l'état final, la pression d'équilibre est $P_1 = 3 P_0$.



- Déterminer de nouveau les volumes V_1 et V_2 de chaque compartiment à l'équilibre.
- Calculer les températures finales T_1 et T_2 dans chacun des deux compartiments.
- Déterminer la variation d'énergie interne de l'air ΔU_1 et ΔU_2 dans chacun des deux compartiments. En déduire l'énergie W fournie par la résistance chauffante.

Réponses aux exercices

Premier principe :

1. a) F, b) V, c) V, d) V, e) F, f) F, g) V ;
2. a) 160 kJ, reçu par le système, b) 12,36 kJ, - 12,36 kJ perdu par l'air ;
3.) 60 K, b) 0,23 K ;
4. a) 5,16 litres, 830 J, 830 J, b) 132 K ;
5. a) 2 litres, 10^6 Pa, 3,86 litres, 579 K, $2,5 \cdot 10^6$ Pa, 2 litres, 750 K, b) 4605 J, 4650 J, 7550 J, -1860 J, 6510 J, c) $933 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $666 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, d) - 2,9 kJ (moteur), e) - 16 kJ ;
6. b) 690 K, c) 8,25 kJ, - 17,2 kJ, - 9 kJ ;
7. a) 674 K, $4 \cdot 10^5$ Pa, b) $W > 0$, c) 1082 J, - 1082 J ;
8. 1. b) 306 °C, 8115 J, 2. b) 5740 J ;
9. 1. b) 579 K, c) 8115 J, d) 1,93 ; 2. a) $W'_T < W_T$, c) $c = a/b$, d) $b = a^{1/2}$, e) 6800 J, 3,2 bars.
10. 1.a) 1,52 litre et 2,48 litres, b) 1,47 bar, c) 334 K et 274 K, 2. a) 3,09 litres, b) 1390 K et 409 K, c) 1817 J, 182 J et 2 kJ;