

TD20 : Premier principe de la thermodynamique. Bilans d'énergie

CAPACITÉS TRAVAILLÉES :

- ▷ Évaluer le travail des forces de pression par découpage en travaux élémentaires et sommation sur un chemin donné dans le cas d'une seule variable : TLB1, ex2
- ▷ Définir un système adapté à une problématique donnée : TLB2, ex1
- ▷ Interpréter géométriquement le travail des forces de pression dans un diagramme de Clapeyron : TLB2
- ▷ Distinguer qualitativement les trois types de transferts thermiques : conduction, convection et rayonnement : TLB3
- ▷ Identifier, dans une situation expérimentale, le ou les systèmes modélisables par un thermostat : TLB4
- ▷ Exploiter l'extensivité de l'énergie interne : TLB4, ex1
- ▷ Définir un système fermé et établir pour ce système un bilan énergétique faisant intervenir travail et transfert thermique : TLB5,7, ex1,2
- ▷ Distinguer le statut de la variation d'énergie interne du statut des termes d'échange : TLB5, ex2
- ▷ Calculer le transfert thermique sur un chemin donné connaissant le travail et la variation de l'énergie interne : TLB6, ex2
- ▷ 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 : TLB6,8
- ▷ Exprimer l'enthalpie molaire $H_m(T)$ du gaz parfait à partir de son énergie interne : TLB9
- ▷ Citer l'ordre de grandeur de la capacité thermique massique de l'eau liquide : TLB10
- ▷ Exploiter l'extensivité de l'enthalpie et réaliser des bilans énergétiques en prenant en compte des transitions de phases : TLB11

1 Questions de cours

QC1 : Modes de transfert thermique.

QC2 : Premier principe de la thermodynamique.

QC3 : Enthalpie.

2 Tester les bases

TLB1 : Travail des forces de pression

On considère un gaz contenu dans une enceinte fermée par un piston. Initialement, la pression du gaz vaut P_0 , son volume V_0 , sa température T_0 . On note P_{ext} la pression extérieure s'exerçant sur le piston. On modélise le gaz par un gaz parfait.

Dans chacun des cas ci-dessous, exprimer le travail des forces de pression externes reçu par le système {gaz, enceinte et piston}. Sauf dans le cas 1, le volume passe de V_0 à $V_0/2$ au cours de la transformation.

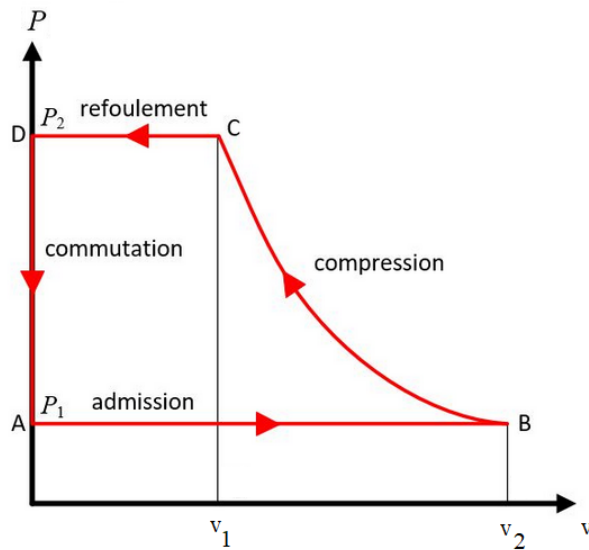
1. Transformation isochore (le piston ne bouge pas).
2. La compression est menée de façon monobare.
3. La compression est menée de façon isotherme et mécaniquement réversible.

TLB2 : Un compresseur

Un **compresseur** (aussi appelé « bloc de compression » ou « élément de compression ») est un mécanisme destiné à augmenter la pression d'un gaz.

Un compresseur désigne aussi, par extension, une machine complète dans laquelle est installé cet élément de compression, incluant châssis, moteur d'entraînement, échangeurs, filtres, tuyauteries, éléments de régulation, armoire électrique...

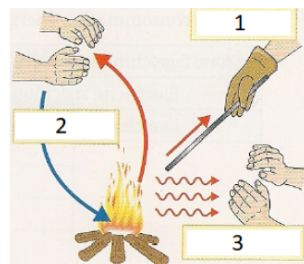
On donne ci-dessous le diagramme de Clapeyron du gaz contenu dans un compresseur lors d'un cycle qui commence par l'admission du gaz et finit par son refoulement.



1. Définir le système.
2. Expliquer comment calculer le travail des forces de pression reçu par le système à partir de ce diagramme et d'une donnée supplémentaire que vous préciserez.
3. Commenter le résultat.
4. Dans une turbine, le diagramme serait parcouru en sens inverse. Quelle en serait la conséquence sur le signe du travail ?

TLB3 : Modes de transfert thermique

1. Citer les trois modes de transfert thermique (CCINP20).
2. Les identifier sur le schéma ci-dessous, et rappeler brièvement en quoi ils consistent.



TLB4 : Cas limite du thermostat

Deux systèmes, notés S_1 et S_2 , sont en contact thermique. Initialement les deux systèmes sont de températures différentes, T_1 et T_2 . Leurs capacités thermiques à volume constant sont différentes, on les note $C_{V,1}$ et $C_{V,2}$. L'ensemble est supposé isolé, et évolue jusqu'à ce que les deux systèmes soient à l'équilibre thermique à la température finale T_f .

1. Exprimer les variations d'énergie interne ΔU_1 et ΔU_2 pour S_1 (modélisé par une phase condensée idéale) et S_2 (modélisé par un gaz parfait).
2. Quelle relation lie les variations d'énergie interne ΔU_1 et ΔU_2 ? En déduire la température finale T_f .
3. Comment est modifié le résultat précédent en considérant que l'un des deux systèmes est un thermostat ?

4. Faire l'application numérique dans le cas d'un volume $V_1 = 200 \text{ mL}$ de thé initialement à la température $T_1 = 60^\circ\text{C}$, dans une pièce de volume $V_2 = 100 \text{ m}^3$ à $T_2 = 20^\circ\text{C}$.

Donnée : La capacité thermique massique à volume constant de l'eau est plus importante que celle de l'air. Le rapport des capacités thermiques volumiques à volume constant de l'eau et de l'air vaut $3,34 \times 10^3$.

TLB5 : Travail et chemin

Un système, constitué de n moles de gaz parfait, subit une transformation d'un état initial ($P_1 = 4,0 \text{ bar}$, $V_1 = 10 \text{ L}$, $T_1 = 600 \text{ K}$) à un état final ($P_2 = 1,0 \text{ bar}$, $V_2 = 20 \text{ L}$).

1. Déterminer la température finale T_2 .

La transformation se fait en deux étapes : évolution isobare de l'état (1) à un état intermédiaire (1'), puis évolution isochore de l'état (1') à l'état (2).

Un autre chemin est envisagé : évolution isochore de l'état (1) à un état intermédiaire (1''), puis évolution isobare de l'état (1'') à l'état (2).

2. Représenter les deux chemins envisagés dans un diagramme de Watt.

3. Pour le chemin $1 \rightarrow 1' \rightarrow 2$, déterminer le travail reçu par le gaz. Même chose pour le chemin $1 \rightarrow 1'' \rightarrow 2$. Commenter.

TLB6 : Un ballon au soleil

Un ballon de baudruche de volume initial $V_i = 2,50 \text{ L}$ et de température initiale $T_i = 20^\circ\text{C}$ est laissé au soleil. Son volume passe à $V_f = 2,65 \text{ L}$, la pression atmosphérique étant $P = 1,013 \text{ hPa} = \text{cste}$. L'air contenu dans le ballon est assimilé à un gaz parfait, de capacités thermiques molaires $C_{V,m} = \frac{5}{2}R$ et $C_{P,m} = \frac{7}{2}R$, où $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ est la constante des gaz parfaits.

1. Déterminer la température finale T_f .

2. Déterminer le transfert thermique Q apporté à l'air du ballon :

2.a. en utilisant la notion d'enthalpie

2.b. sans utiliser la notion d'enthalpie.

TLB7 : Un chauffe-eau (CCINP21)

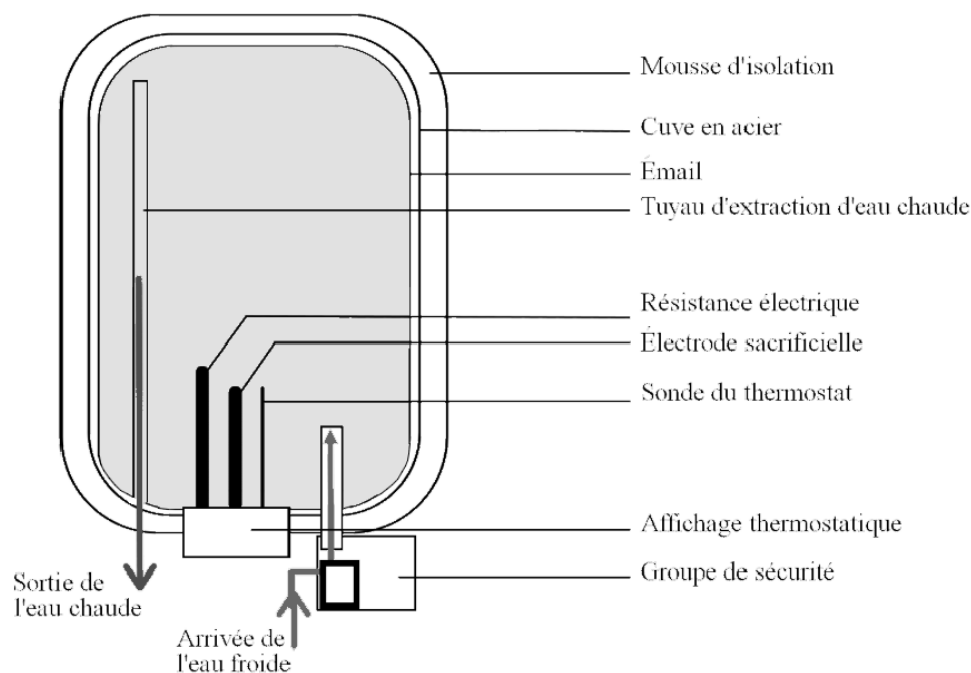


FIGURE 1 – Schéma descriptif du chauffe-eau électrique

Un chauffe-eau est composé d'une cuve cylindrique fermée généralement en acier émaillé, dans laquelle se trouve un dispositif de chauffage piloté par un thermostat. La cuve est en permanence remplie d'eau. En effet, lorsqu'on puise de l'eau chaude, de l'eau froide remplace au fur et à mesure la quantité d'eau chaude utilisée. Le dispositif de chauffage réchauffe l'eau jusqu'à une température de consigne préalablement définie, puis s'arrête. Si de l'eau est puisée, il se remet en fonctionnement.

On s'intéresse à un chauffe-eau électrique schématisé sur la figure 1.

Données :

▷ Capacité thermique massique de l'eau liquide : $c_e = 4180 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$.

▷ Masse volumique de l'eau : $\rho_e = 1,0 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$.

Ces données sont supposées indépendantes de la température et de la pression.

Ce chauffe-eau a une puissance électrique égale à $P = 2000 \text{ W}$ et sa cuve contient un volume $V = 200 \text{ L}$ d'eau. Cette cuve est remplie avec de l'eau froide à $T_{e1} = 288 \text{ K}$. Grâce à une résistance chauffante, cette eau est chauffée à $T_{e2} = 338 \text{ K}$.

1. Déterminer la valeur de l'énergie calorifique Q nécessaire pour chauffer l'eau.
2. En déduire le temps nécessaire Δt pour chauffer l'eau. On précisera le résultat en heures.

TLB8 : Chauffage d'eau liquide (CCINP19)

On considère le système thermodynamique fermé constitué par un volume $V = 0,25 \text{ L}$ d'eau liquide. On le chauffe de manière monobare (pression extérieure constante égale à 1 bar) depuis une température de $T_1 = 20^\circ \text{C}$ jusqu'à une température $T_2 = 100^\circ \text{C}$ (température d'ébullition sous 1 bar).

Déterminer, en justifiant soigneusement, l'expression littérale du transfert thermique reçu par l'eau lors de ce chauffage. Faire l'application numérique.

Données :

▷ Capacité thermique massique de l'eau liquide à pression constante : $c_{\text{eau}} = 4,2 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

▷ Masse volumique de l'eau liquide : $\mu_{\text{eau}} = 1,0 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$

TLB9 : Relation de Mayer

1. Rappeler l'expression de l'énergie interne d'un gaz parfait monoatomique.
2. En déduire l'expression de sa capacité thermique à volume constant.
3. Rappeler la définition de l'enthalpie. Déterminer l'enthalpie molaire d'un gaz parfait monoatomique.
4. En déduire l'expression de la capacité thermique à pression constante pour un gaz parfait monoatomique.
5. En déduire la **relation de Mayer** pour un gaz parfait monoatomique : $C_{P,m} - C_{V,m} = R$. Que devient cette relation pour un gaz parfait polyatomique ?

TLB10 : Différentes formes d'énergie

Le système considéré est 1 L d'eau liquide initialement au repos.

Évaluer un ordre de grandeur de l'énergie nécessaire pour :

- a) lui faire atteindre une vitesse de 1500 km/h ;
- b) augmenter son altitude de 10 km ;
- c) faire augmenter sa température de 25°C .

Commenter le résultat.

TLB11 : Mesure de l'enthalpie massique de l'eau

Un thermoplongeur de puissance $P = 350 \text{ W}$ est immergé dans un récipient calorifugé contenant de l'eau et placé sur une balance. L'eau est portée à ébullition (à 100°C sous la pression

de 1 bar approximativement).

Une balance permet de mesurer la masse m d'eau vaporisée pendant la durée Δt , à partir du début de l'ébullition.

La puissance thermique perdue Φ (qui ne sert pas à chauffer l'eau) est supposée constante. L'enthalpie massique de vaporisation de l'eau est notée $\Delta_{\text{vap}} h$.

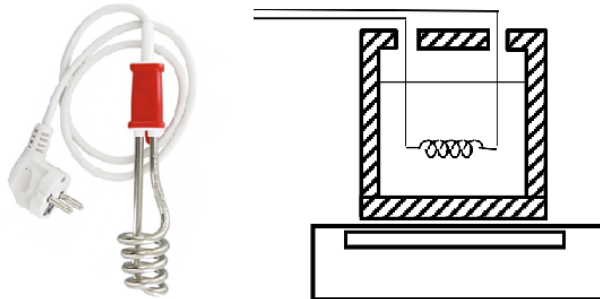


FIGURE 2 – Gauche : photographie du thermoplongeur ; droite : schéma du dispositif expérimental

1. Écrire la relation entre $\Delta_{\text{vap}} h$, m , Φ , Δt et P .

Une expérience permet de mesurer $m = m_1 = 21$ g pour $\Delta t = 3,0$ min. De plus, si un second thermoplongeur (identique au précédent) est ajouté dans le récipient, la mesure donne $m = m_2 = 49$ g pour la même durée Δt .

2. Écrire le système de deux équations vérifié par $\Delta_{\text{vap}} h$ et Φ , faisant intervenir m_1 , m_2 , P et Δt . Exprimer alors $\Delta_{\text{vap}} h$ en fonction de P , Δt , m_2 et m_1 .

3. En déduire la valeur de $\Delta_{\text{vap}} h$.

3 Exercices

Exercice 1 : Mesure de la capacité thermique massique de l'eau (IPhO22)

Cet exercice porte sur la mesure de la capacité thermique massique de l'eau. Cette mesure est réalisée expérimentalement en utilisant un calorimètre. Les parois de ce récipient sont conçues de manière à limiter les échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur du calorimètre, comme dans une bouteille isotherme.

On va dans cet exercice comparer les résultats obtenus grâce à deux méthodes. Pour la première, on place dans un calorimètre, de capacité thermique $C = 200 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ et initialement à la température $T_1 = 0^\circ\text{C}$, une masse $m_1 = 50$ g d'eau à la température $T_1 = 0^\circ\text{C}$. On ajoute ensuite une autre masse d'eau $m_2 = 100$ g à la température $T_2 = 80^\circ\text{C}$. On note c_e la capacité thermique massique de l'eau. À la fin de l'expérience, on mesure une température $T_f = 40^\circ\text{C}$.

1. Justifier qu'il est possible de modéliser par des transformations isochores les évolutions suivies par le calorimètre et chacune des masses d'eau lors de l'expérience réalisée.
2. Écrire la variation d'énergie au cours de la transformation :
 - pour le calorimètre (variation d'énergie ΔU_0) ;
 - pour l'eau initialement froide placée dans le calorimètre (variation d'énergie ΔU_1) ;
 - pour l'eau initialement chaude placée dans le calorimètre (variation d'énergie ΔU_2).
3. Le contenu du calorimètre reçoit-il de l'énergie de la part de l'extérieur ? Justifier.
4. Écrire le premier principe de la thermodynamique pour le contenu du calorimètre.

5. En déduire la valeur de la capacité thermique massique de l'eau.

Une deuxième méthode est envisageable : dans le même calorimètre (vidé), de capacité thermique $C = 200 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ et initialement à la température $T_3 = 20^\circ\text{C}$, on place une masse $m_3 = 200 \text{ g}$ d'eau à la température $T_3 = 20^\circ\text{C}$ et une résistance $R = 1\text{kW}$ à la température T_3 . On note c_e la capacité thermique massique de l'eau. On branche la résistance à un générateur délivrant un courant continu d'intensité $I = 0,4\text{A}$ pendant une durée $\Delta t = 5 \text{ min}$. À la fin de la transformation, la température de l'eau et de la résistance est $T'_f = 66^\circ\text{C}$.

6. L'eau placée dans le calorimètre reçoit-elle de l'énergie ? Justifier.
7. Écrire le premier principe de la thermodynamique pour l'eau placée dans le calorimètre.
8. En déduire la valeur de la capacité thermique massique de l'eau.
9. Les deux valeurs sont-elles cohérentes entre elles ?

Exercice 2 : Transformations d'un gaz

Un récipient contenant une quantité de matière n d'un gaz parfait monoatomique est fermé par un piston mobile de masse quasi-nulle. À l'extérieur se trouve l'air atmosphérique, à la pression $P_0 = 10^5\text{Pa}$ et à la température $T_0 = 298\text{K}$. Les parois permettent les transferts thermiques.

1. Donner un exemple de gaz monoatomique.

Une personne pousse très lentement le piston (on pourra considérer que la transformation est mécaniquement réversible) jusqu'à ce que la pression du gaz soit le double de la pression initiale.

2. Quelle est la température finale T_f du gaz ?
 3. Calculer le travail W reçu par le gaz en fonction de n et T_0 .
 4. En déduire le transfert thermique Q reçu par le gaz.
 5. Faire l'application numérique sachant que le récipient contient $n = 1 \text{ mol}$ de gaz. La constante des gaz parfaits vaut $R = 8,314\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.
 6. Commenter cette expérience en termes de transfert thermique et de variation de température.
- On reprend l'expérience depuis le même état initial, mais en supposant que brusquement, à partir de l'instant initial, le piston est soumis à une pression extérieure constante $2P_0$.
7. Quel est l'état final du gaz, notamment la pression P'_f et la température T'_f ?
 8. Calculer le travail W' reçu par le gaz.
 9. En déduire le transfert thermique Q' .
 10. Commenter les résultats.

4 Résolution de problèmes :

RP1 : chauffage d'un bassin olympique

Les courses olympiques de natation nécessitent une température de l'eau d'environ 27°C . Estimer le coût de l'opération de chauffage d'une piscine olympique initialement remplie d'eau à 20°C .

Donnée : 1kWh d'électricité coûte environ $0,20 \text{ euro}$.

RP2 : glaçons pour l'apéritif

Par une chaude journée d'été, vous avez oublié de mettre au réfrigérateur le jus de fruits de l'apéritif.

Combien de glaçons devez-vous y ajouter pour qu'il soit aussi rafraîchissant ?

Données :

- ▷ enthalpie massique de fusion de l'eau : $3,3 \times 10^2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$;
- ▷ capacité thermique massique de l'eau liquide : $4,2 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$;
- ▷ capacité thermique massique de l'eau solide : $2,1 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$.

RP3 : Un thé glacé pétillant (CCINP24)

Un étudiant souhaite réaliser un thé glacé pétillant bien rafraîchissant. Dans un thermos, il ajoute 100 cL de thé pétillant à la température de 20°C , ainsi que des glaçons à la température de -15°C .

En détaillant la démarche suivie, déterminer la masse de glaçons à ajouter pour obtenir une température finale de 10°C . Commenter.

Données :

- ▷ Masse volumique du thé liquide : $\rho = 1,0 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$
- ▷ Masse d'un glaçon : $m \approx 10 \text{ g}$
- ▷ Capacité thermique massique du thé liquide et de l'eau liquide : $c_{liq} \approx 4,0 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$
- ▷ Capacité thermique massique de la glace : $c_g \approx 2,0 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$
- ▷ Enthalpie massique de fusion de la glace à 0°C : $L_{fus} = 3,3 \cdot 10^2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

RP4 : Détermination d'un état final

On introduit dans un calorimètre aux parois calorifugées et de capacité thermique négligeable une masse $m = 1,00 \text{ kg}$ d'eau liquide initialement à 20°C . On y ajoute $0,50 \text{ kg}$ de glace à 0°C .

Déterminer la composition et la température finale.

On suppose que la transformation a lieu à pression constante $P = 1,0 \text{ bar}$. On donne $\Delta_{fus}h = 3,3 \times 10^2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ (enthalpie massique de fusion de la glace à 0°C) et $c = 4,2 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ (capacité thermique massique de l'eau liquide).