Sciences physiques

ATS – Lycée Louis Armand

Thème 4 : Bilans thermodynamiques

Travaux dirigés

Exercice faisant uniquement appel à des outils mathématiques

Exercice facile et/ou proche du cours

Exercice accessible mais demandant du recul sur le cours et/ou sur les outils mathématiques

Exercice complexe, de par son côté calculatoire et/ou astucieux

Il est normal de « bloquer » sur les **exercices** : personne ne s'attend à ce que vous sachiez les faire en cinq minutes seulement. Il faut cependant persévérer, avoir le cours à côté afin de voir si un raisonnement similaire a déjà été abordé, et ne pas hésiter à parler avec vos camarades ou votre professeur.

Les **problèmes** sont issus d'annales de concours et/ou d'examens. Ils sont au moins aussi importants à aborder que les exercices, car ils sont les plus proches (en terme de rédaction et de questions « bout-à-bout ») de ce que vous aurez en devoir surveillé ainsi qu'au concours.

Chapitre 1 : Bilans d'énergie

Capacités exigibles et exercices associés

Capacités exigibles	Exercice(s)
Définir un système fermé et établir pour ce système un bilan énergétique faisant intervenir le travail et le transfert thermique	1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6

Questions de cours

- ☐ Donner l'expression du travail élémentaire des forces de pression δW_p^{ext} fourni par l'extérieur à un système thermodynamique. Comment l'interpréter physiquement (en particulier : son signe) ?
- ☐ Qu'est-ce qu'une transformation isochore ? Démontrer que l'expression du travail isochore des forces de pression est $W_p^{\text{iso}-V} = 0$.
- ☐ Qu'est-ce qu'une transformation monobare ? Démontrer que l'expression du travail monobare des forces de pression est $W_p^{\text{mono}-p} = -p_{\text{ext}}(V_f - V_i)$.
- ☐ Qu'est-ce qu'une transformation isotherme ? Démontrer que l'expression du travail isotherme des forces de pression d'un gaz parfait est $W_p^{\text{iso}-T,\text{G.P}} = -nRT \times \ln\left(\dfrac{V_f}{V_i}\right)$.
- ☐ Énoncer le premier principe de la thermodynamique. Que représente-t-il physiquement ?
- ☐ Exercice du chauffe-eau électrique.
- ☐ Exercice de l'explosion d'un ballon.
- ☐ Exercice du cycle de Carnot.
- ☐ Exercice de la température du bain.
- ☐ Établir l'expression de Q pour une transformation isochore d'une phase condensée idéale ou d'un gaz parfait.

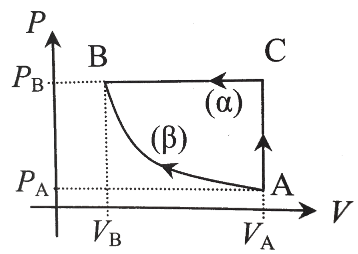
Exercices

1.1 Deux chemins de transformation

On fait passer une quantité n de gaz parfait d'un état d'équilibre A (p_A, V_A, T_A) à un autre état d'équilibre B ($3p_A$, V_B, T_B) par deux chemins distincts :

— α : isochore AC puis isobare CB ;

— β : isotherme AB.



1. Déterminer T_B en fonction de T_A.
2. En utilisant le fait que le gaz est parfait, exprimer V_B en fonction de V_A.
3. Déterminer W_{AB}, W_{AC} et W_{CB} en fonction de p_A et V_A.
4. En déduire alors les travaux W_α et W_β reçus par le gaz au cours des transformations α et β. Commenter.
5. En déduire les transferts thermiques Q_α et Q_β reçus par le gaz au cours des transformations α et β.

1.2 Deux modes de chauffage

Soit $n = 10\,\mathrm{mol}$ d'un gaz parfait, dont la capacité thermique molaire à volume constant est $C_{V,m} = \dfrac{3}{2}R$.

1. On considère que le gaz est emprisonné dans un récipient indéformable et calorifugé. Exprimer puis calculer l'élévation de température subie par le gaz après qu'il a reçu un travail électrique $W_{\text{élec}} = 1 \times 10^4\,\mathrm{J}$.
2. On considère désormais que le gaz est emprisonné dans un ballon déformable (pression extérieure constante $p_{\text{ext}} = 5\,\mathrm{bar}$) mais toujours calorifugé.
   (a) Montrer, en utilisant notamment la loi des gaz parfaits, que le travail des forces de pression vaut $W_p = -nR\Delta T$.
   (b) Exprimer puis calculer l'élévation de température subie par le gaz après qu'il a reçu un travail électrique $W_{\text{élec}} = 1 \times 10^4\,\mathrm{J}$, sachant que les états initial et final sont des états d'équilibre.

1.3 Arnaque ou bon plan ?

Monsieur Sousse a acheté chez un antiquaire une statue garantie en or massif, de masse $m = 860\,\mathrm{g}$. Pour vérifier sa composition, il souhaite mesurer la capacité thermique massique à volume constant c_V du métal qui la constitue.

Pour cela, il plonge la statue, à la température initiale $T_0 = 293\,\mathrm{K}$, dans une masse $m_e = 300\,\mathrm{g}$ d'eau, de température initiale $T_e = 353\,\mathrm{K}$ et de capacité thermique massique à volume constant $c_{V,e} = 4180\,\mathrm{J\cdot K^{-1}\cdot mol^{-1}}$. Le tout est contenu dans un récipient parfaitement calorifugé, initialement à la température T_e.

Monsieur Sousse mesure alors la température finale T_f du système { eau + statue + récipient } à l'équilibre thermodynamique : $T_f = 346\,\mathrm{K}$.

On définit la masse équivalente en eau μ du récipient par la relation : $\mu = \dfrac{C_{V,\text{récipient}}}{c_e}$, avec $C_{V,\text{récipient}}$ la capacité thermique à volume constant totale du récipient. On a alors $\mu = 40\,\mathrm{g}$.

Pendant toute la transformation, le système Σ est en contact avec l'atmosphère où règne une pression p_0.

1. Que vaut la variation d'énergie interne ΔU du système entre l'état initial et l'état final d'après le premier principe de la thermodynamique ?
2. En déduire que $c = \dfrac{\mu + m_e}{m} \times c_e \times \dfrac{T_e - T_f}{T_f - T_0}$, où c est la capacité thermique massique de la statue. Faire l'application numérique.
3. Pour tous les métaux à température ordinaire, la capacité thermique molaire à volume constant a la même valeur : $C_{V,m} = 3R$ où R est la constante des gaz parfaits. En déduire la masse molaire M du métal constituant la statue.
4. La masse molaire de l'or est $M_{\text{Au}} = 197\,\mathrm{g\cdot mol^{-1}}$. Monsieur Sousse s'est-il fait arnaquer ?

1.4 Gonflage d'un ballon

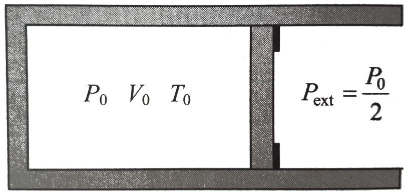
Soit un ballon, considéré comme une sphère dont le rayon R peut varier. Initialement, on a $R_i = 3\,\mathrm{cm}$. Un enfant gonfle le ballon en soufflant de l'air à l'intérieur ; à l'état final, on a $R_f = 13\,\mathrm{cm}$.

L'air contenu dans le ballon est considéré comme un gaz parfait. On rappelle que le volume d'une sphère de rayon R est $\dfrac{4}{3}\pi R^3$. La pression extérieure, considérée comme constante, est égale à $p_{\text{ext}} = 1\,\mathrm{bar}$.

1. Expliquer sans calcul pourquoi on peut considérer la transformation comme isotherme (pour la suite, on prendra $T = 20\,°\mathrm{C}$).
2. Pour quelle raison le volume du ballon augmente-t-il ?
3. Exprimer puis calculer le travail des forces de pression entre l'instant initial et l'instant final.
4. En déduire la quantité de chaleur Q dissipée vers l'atmosphère.

1.5 Détente d'un gaz parfait

Une quantité n d'un gaz parfait est enfermée dans un récipient aux parois parfaitement calorifugées ; l'une des parois est mobile horizontalement, sans frottement.



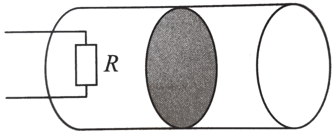
Dans l'état initial, la paroi est bloquée et le gaz occupe alors un volume V_0, à une température T_0 et sous une pression p_0.

On débloque alors la paroi mobile et le gaz se détend spontanément, jusqu'à un nouvel état d'équilibre caractérisé par les paramètres V_1, T_1 et p_1. La pression de l'air extérieur est constante : $p_{\text{ext}} = \dfrac{p_0}{2}$. La capacité thermique à volume constant du gaz est $C_V = \dfrac{5}{2}nR$.

1. Déterminer la pression finale p_1.
2. En appliquant le premier principe, déterminer V_1 et T_1.
3. Vérifier qu'il s'agit bien d'une détente. Le gaz s'est-il réchauffé ou refroidi ?

1.6 Transformations couplées

Un cylindre horizontal est séparé en deux parties par une paroi mobile. Le mouvement de la paroi s'effectue sans frottements. Le cylindre horizontal, ainsi que la paroi mobile (de masse et de capacité thermique négligeables), sont calorifugés et rigides. Les deux gaz contenus dans chacun des compartiments sont parfaits et identiques ; leur capacité thermique à volume constant est $C_V = \dfrac{5}{2}nR$, où R est la constante des gaz parfaits.



À partir d'un état initial identique pour chaque compartiment (pression $p_0 = 1\,\text{bar}$, température $T_0 = 300\,\text{K}$ et volume $V_0 = 1\,\text{L}$), on chauffe lentement le compartiment de gauche à l'aide d'une résistance $r = 200\,\Omega$. Celle-ci est parcouru par un courant $I = 0{,}1\,\text{A}$ pendant une durée $\Delta t = 50\,\text{s}$.

1. Quel est le lien entre p_g (pression à gauche) et p_d (pression à droite) à l'équilibre ?
2. Par conservation du volume, établir une relation entre V_g et V_d.
3. En appliquant la loi des gaz parfaits, établir une relation entre les grandeurs de gauche et une relation entre les grandeurs de droite.
4. Enfin, par application du premier principe au système { gaz de gauche + paroi mobile + gaz de droite }, établir une relation entre T_g et T_d.
5. On admet que $T_d = 328\,\text{K}$. Déterminer les valeurs de toutes les autres grandeurs.

Chapitre 2 : Bilans d'enthalpie

Capacités exigibles et exercices associés

Capacités exigibles	Exercice(s)
Exprimer le premier principe sous la forme d'un bilan d'enthalpie dans le cas d'une transformation monobare.	tous
Déterminer le transfert thermique reçu par un corps pur lors d'un changement d'état à pression constante.	2.1, 2.2, 2.3
Déterminer le transfert thermique reçu par un système réactionnel lors d'une combustion complète réalisée à température et à pression constantes, à partir du pouvoir calorifique adapté et des paramètres du système.	2.4, 2.5
Déterminer la masse de CO_2 produite lors du dégagement d'une énergie donnée par combustion complète d'un hydrocarbure, les données nécessaires étant fournies.	2.4, 2.5

Questions de cours

- ☐ Donner la définition de l'enthalpie, puis l'expression du premier principe enthalpique. À quelle(s) condition(s) cette version du premier principe est-elle utilisable ?
- ☐ Donner l'expression de l'enthalpie d'une phase condensée idéale en fonction notamment de sa capacité thermique massique à pression constante c_p. Pour quelle raison peut-on dire que $\Delta H \approx \Delta U$ (et donc que $c_p = c_V = c$) ?
- ☐ Définir l'indice adiabatique γ. Donner les expressions de C_V et C_p pour un gaz parfait en fonction de n, R et γ.
- ☐ Rappeler la définition de l'enthalpie de changement d'état. Quelle est son unité, dans le système international ? Comment interpréter son signe ?
- ☐ Donner les définitions du pouvoir calorifique supérieur et du pouvoir calorifique inférieur.

Exercices

2.1 Transpiration

1. Expliquer en quoi le fait de transpirer participe au refroidissement du corps.
2. Quel volume d'eau doit-on transpirer par jour pour débarrasser son corps des $75\,\mathrm{W}$ de puissance thermique produits par le métabolisme au repos ? On prendra une température de la peau égale à $33\,^\circ\mathrm{C}$ et l'enthalpie massique de vaporisation de l'eau égale à $2420\,\mathrm{kJ\cdot kg^{-1}}$.
3. Commenter la dernière valeur, sachant que le corps humain évacue environ $0{,}5\,\mathrm{L}$ de transpiration par jour.

2.2 Fusion d'un bloc de glace

À la pression atmosphérique normale, un bloc de glace de $4\,\mathrm{kg}$, initialement à $0\,^\circ\mathrm{C}$, se met à fondre par une température ambiante de $8\,^\circ\mathrm{C}$ (température que prendra l'eau de fusion).

On donne l'enthalpie massique de fusion de la glace : $\Delta_{\text{fus}}h = 335\,\mathrm{kJ\cdot kg^{-1}}$ et la capacité thermique massique de l'eau : $c = 4{,}18\,\mathrm{J\cdot K^{-1}\cdot g^{-1}}$. Par ailleurs, on indique que la glace occupait un volume initial de $4{,}4\,\mathrm{dm^3}$.

1. Calculer la variation d'enthalpie ΔH du système.
2. Calculer le travail échangé W. Commentaire ?

2.3 Vaporisation d'eau

1. Calculer la variation d'enthalpie d'un kilogramme d'eau liquide à $100\,°\mathrm{C}$, que l'on vaporise sous la pression atmosphérique.
2. En utilisant la relation entre énergie interne et enthalpie, calculer la variation d'énergie interne correspondante. On assimilera la vapeur d'eau à un gaz parfait.
3. Quelle quantité de chaleur faut-il fournir à un litre d'eau à $25\,°\mathrm{C}$ pour la transformer en vapeur à $100\,°\mathrm{C}$, sous la pression atmosphérique ?

Données :

- Enthalpie massique de vaporisation de l'eau : $\Delta_{\text{vap}}h = 2{,}26\,\mathrm{kJ\cdot g^{-1}}$;
- Masse volumique de l'eau liquide à $100\,°\mathrm{C}$: $958\,\mathrm{g\cdot L^{-1}}$;
- Masse molaire de l'eau : $M = 18\,\mathrm{g\cdot mol^{-1}}$;
- Volume molaire de la vapeur d'eau à $100\,°\mathrm{C}$ et sous pression atmosphérique : $V_m = 30{,}6\,\mathrm{L\cdot mol^{-1}}$;
- Capacité thermique massique de l'eau : $c = 4185\,\mathrm{J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}}$.

2.4 Consommation en méthane (adapté du concours ATS 2023)

Dans le cas d'une centrale au gaz, le combustible brûlé est du méthane $CH_{4(g)}$, de masse molaire $M = 16\,\mathrm{g\cdot mol^{-1}}$. La réaction de combustion s'écrit :

$$CH_4 + 2\,O_2 \longrightarrow CO_2 + 2\,H_2O$$

On donne le PCI et le PCS du méthane : $\text{PCS} = 55{,}5\,\mathrm{MJ\cdot kg^{-1}}$ et $\text{PCI} = 50{,}1\,\mathrm{MJ\cdot kg^{-1}}$.

1. Donner l'expression du transfert thermique Q libéré par la combustion isobare et isotherme d'une quantité de matière n_0 de $CH_{4(g)}$.
2. La chaudière de la centrale doit produire $150\,\mathrm{MW}$ de puissance thermique. Établir alors l'expression de la quantité de matière n_0 de $CH_{4(g)}$ consommée dans la chaudière pour une heure de fonctionnement dans les mêmes conditions que la question précédente.
3. On prend $n_0 = 7\times10^5\,\mathrm{mol}$. En déduire la valeur de la masse de méthane consommée pour une heure de fonctionnement. Quelle masse de dioxyde de carbone ($M(CO_2) = 44\,\mathrm{g\cdot mol^{-1}}$) est produite pendant cette durée ?
4. En réalité, l'eau est vaporisée lors de la transformation. Déterminer l'énergie libérée par la combustion de la quantité n_0 de méthane.

2.5 Poids écologique de l'aviation

Le kérosène est un mélange d'hydrocarbures. Issu du raffinage du pétrole, ce carburant est utilisé notamment dans le monde de l'aviation, permettant de faire fonctionner des turboréacteurs.

Une forme hautement raffinée de ce combustible est le RP-1, dont la combustion peut être modélisée par celle du n-dodécane $C_{12}H_{26}$:

$$2\,C_{12}H_{26(l)} + 37\,O_{2(g)} \longrightarrow 24\,CO_{2(g)} + 26\,H_2O_{(g)}$$

On donne les masses molaires du n-dodécane ($170\,\mathrm{g\cdot mol^{-1}}$) et du dioxyde de carbone ($44\,\mathrm{g\cdot mol^{-1}}$), ainsi que le PCI du dodécane ($7520\,\mathrm{kJ\cdot mol^{-1}}$).

1. Pour chaque molécule de n-dodécane réagissant dans l'équation, combien de molécules de CO_2 sont-elles produites ?
2. Quelle quantité $n(CO_2)$ de dioxyde de carbone est-elle produite lors de la combustion d'un kilogramme de n-dodécane ? En déduire la masse correspondante.
3. Calculer l'énergie libérée lors de la combustion d'un kilogramme de n-dodécane ; l'exprimer en kilowatts-heures.

Le tableau suivant donne une indication des émissions de CO_2 par nature de centrale, selon les calculs du GIEC. Elles sont exprimées en gramme d'équivalent CO_2 par kWh (gCO_2e/kWh). Elles incluent les émissions dégagées lors de la construction des centrales, celles dues à la production d'électricité elle-même, et éventuellement celles dues au recyclage des déchets produits. D'autres facteurs interviennent, comme le lieu de fabrication des matériaux ou le degré de modernité des centrales. Il s'agit donc de chiffres médians, très variables selon les pays.

Émissions de CO_2 par type de centrale

Type de centrale	Emissions (gCO_2e/kWh)
Charbon	820
Pétrole (fioul)	600
Gaz naturel	490
Photovoltaïque	48
Hydraulique	24
Nucléaire	12
Eolien	11-12

Source : GIEC, 2018

4. En utilisant vos résultats précédents, calculer les émissions de dioxyde de carbone par unité d'énergie de combustion de n-dodécane en gCO_2/kWh. Commenter.