Deuxième principe de la thermodynamique

Travaux Dirigés

Méthodologie : Comment travailler les exercices ?

Avant la séance de TD :

- Sur une feuille de brouillon, avec un crayon à la main et le chapitre ouvert sous les yeux.
- Essayer des « trucs » même si cela n'aboutit pas.
- Faire des schémas complets et suffisamment grands.
- Ne rien écrire sur l'énoncé de TD afin de pouvoir refaire les exercices après la correction en classe.
- Réfléchir environ 10 à 15 min sur chaque exercice demandé. Si vous bloquez complètement sur une question/un exercice, passez à la suite au bout de 10 min, et me poser des questions.

Après la séance de TD :

- Refaire les exercices corrigés ensemble, sans regarder le corrigé dans un premier temps.
- Une fois l'exercice terminé ou si vous êtes totalement bloqué, reprendre avec le corrigé.

En autonomie

Cahier d'entrainement : *fiche n°20* de 20.1 à 20.12

Savoir-faire

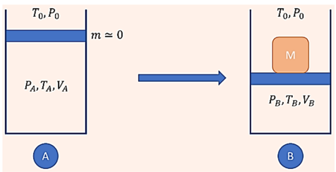
Savoir-faire 1 - Savoir si une transformation est réversible

Pour chaque transformation décrite ci-dessous, dites si elle peut être modélisée par une transformation réversible ou non.

1. On considère une quantité de matière n de gaz parfait, enfermée dans un récipient aux parois diathermanes (qui laisse passer les transferts thermiques), fermé par un piston mobile de section S et de masse négligeable. Ce piston coulisse sans frottement. La pression régnant dans le milieu extérieur, notée P_0, et la température extérieure, notée T_0, sont supposées constantes. Le système est supposé à l'équilibre avant l'instant initial. À t = 0, on ajoute, grain par grain, une masse m de sable sur le piston. On attend que l'équilibre se fasse.
2. Même système, même états initial et final, mais m est ajoutée en une fois.
3. Un cylindre refermé par un piston contient un volume V_1 d'azote, à une pression initiale P_1 et une température T_1. Les parois sont calorifugées. L'élément chauffant électrique est allumé et un courant I y circule pendant une durée τ sous la tension E. L'azote se détend de manière isobare. Le piston coulisse sans frottement.

Savoir-faire 2 – Faire un bilan d'entropie : Transformation monotherme irréversible

On considère n moles de gaz parfait dans un cylindre de section S à parois diathermanes, fermé par un piston de masse m négligeable, à l'équilibre thermodynamique dans l'état initial A. On dépose brutalement une masse M et on attend l'équilibre. L'équilibre est atteint en B où l'on mesure $P_B = 2.P_0$. Voir le cours pour l'expression de l'entropie du gaz parfait.



Q1. Quelle relation lie la masse M et la pression P_0 ?

Q2. Par une étude des équilibres, exprimer le volume final V_B en fonction du volume initial V_A.

Q3. Calculer la variation d'entropie entre A et B.

Q4. Par application du premier principe, calculer la chaleur reçue par le système au cours de la transformation. En déduire l'entropie échangée.

Q5. La transformation est a priori irréversible, prouvez-le à l'aide du second principe et évaluez l'entropie créée.

Savoir-faire 3 – Bilan d'entropie : Détente de Joule-Gay-Lussac

On considère la détente de Joule et Gay-Lussac : le gaz est dans un compartiment parfaitement calorifugé, fermé par un piston mobile calorifugé bloqué par une cale. Le compartiment de droite est vide et initialement de même taille que celui de gauche. À l'instant initial on retire la cale.

On modélise le gaz par un gaz parfait. On donne l'expression

$$S(T,V,n) = S_0 + n.\frac{R}{\gamma - 1}.\ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + n.R.\ln\left(\frac{V}{V_0}\right)$$

avec les notations habituelles. L'indice 0 indique un état de référence.

Q1. Montrer que le travail reçu par le système {gaz + enceinte contenant le gaz} est nul. Montrer alors que la variation d'énergie interne du gaz est nulle.

Q2. En déduire que la détente est telle que la température finale est égale à T_0.

Q3. Déterminer l'expression de l'entropie créée au cours de la détente. Est-elle réversible ? Comment pouvait-on le prévoir dès le départ ?

Savoir-faire 4 – Bilan d'entropie : Phase condensée en contact avec un thermostat

On plonge un morceau de fer de masse m = 100 g à température T = 350 K dans un thermostat à température T_{th} = 280 K. On donne c_{fer} = 460. J.K^{-1}.kg^{-1}.

L'entropie d'une phase condensée incompressible et indilatable

$$S(T) = S_0 + C.\ln(T/T_0)$$

où l'état 0 est un état de référence et C la capacité thermique de la phase condensée idéale.

Q1. Évaluer la variation d'entropie du fer et commenter.

Q2. A l'aide du premier principe, évaluer la chaleur reçue par le thermostat Q_{th} et la chaleur reçue par le fer Q_{fer}.

Q3. En déduire l'entropie d'échange reçue par chacun des deux systèmes.

Q4. Déduire l'entropie de création pour le bloc de fer, et conclure.

Q5. Évaluer enfin la variation d'entropie du système {fer + thermostat}. Commenter.

Savoir-faire 5 - Utiliser la loi de Laplace

On considère un gaz parfait subissant une compression adiabatique réversible, et dont le coefficient adiabatique γ ne dépend pas de la température et vaut 1,4. Le gaz est initialement dans un état de paramètres (P_I = 1 bar, T_I = 300 K). Il arrive à un état de pression P_f = 5 bar.

Q1. Déterminer la température finale.

Savoir-faire 6 - Faire un bilan d'entropie : transformation avec changement d'état

On sort un glaçon de masse m = 100 g du congélateur (de température T_1 = –18°C), on le place dans l'air extérieur à T_{ext} = 20°C et on attend qu'il fonde entièrement. On obtient alors de l'eau liquide à la température T_3 = 20°C. On donne :

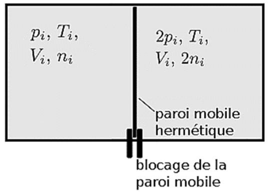
- Capacité thermique massique de la glace c_{sol} = 2,1 kJ.K^{-1}.kg^{-1} ;
- Capacité thermique massique de l'eau liquide c_{liq} = 4,2 kJ.K^{-1}.kg^{-1} ;
- Enthalpie massique de fusion de l'eau Δh_{fus} = 3,3.10^2 kJ.kg^{-1} ;
- Entropie d'une phase condensée idéale de capacité thermique C : $S(T) = C.\ln(T) + cste$.

Q1. Déterminer le transfert thermique $Q_{reçu}$ reçu par le glaçon lors de cette transformation.

Q2. Calculer la variation d'entropie du système {masse d'eau} pour cette transformation. En déduire l'entropie créée lors de la transformation

Exercices incontournables

Exercice 1 : Compartiment séparé en deux (★☆☆)



État initial

On considère la situation initiale ci-contre. Le gaz sera supposé parfait, les parois externes calorifugées et la paroi mobile interne diathermane (elle laisse passer la chaleur). On retire les cales : la paroi part vers la gauche, et après une phase transitoire avec quelques oscillations, le système est à nouveau immobile. On attend suffisamment longtemps. On donne pour un gaz parfait :

$$S(T,V,n) = S_0 + \frac{n.R}{\gamma-1}.\ln(T/T_0) + n.R.\ln(V/V_0)$$

Q1. Déterminer l'état final en fonction de p_i, T_i, V_i et n_i.

Q2. Calculer l'entropie créée au cours de la transformation.

Q3. Quelles sont les causes d'irréversibilité qui donnent lieu à cette entropie créée ? Comment aurait-on pu récupérer de l'énergie en exploitant mieux la transformation ?

Exercice 2 : Effet Joule et création d'entropie (★☆☆)

On considère une résistance chauffante permettant de maintenir constante la température d'un volume d'eau (une baignoire, piscine, bain thermostaté en chimie...).

On prendra R = 1,0 kΩ, I = 1,0 A, une température de l'eau constante égale à T_0 = 50°C et une température externe T_{ext} = 20°C et pression P_{ext} = 1,0 bar (constantes).

On modélisera l'eau, le réservoir et la résistance comme des phases condensées idéales, pour lesquelles $S(T) = S_0 + C.\ln(T/T_0)$.

Il est plus simple de raisonner sur le système {eau + réservoir + résistance} pour mener le bilan entropique.

Q1. Déterminer l'expression de l'entropie créée pendant une durée de fonctionnement Δt, en fonction de R, I, Δt et T_{ext}.

Q2. Quelles sont les causes d'irréversibilité qui donnent lieu à cette entropie créée ?

Exercice 3 : Système Glace/Eau liquide dans un calorimètre (★★☆)

Dans un vase parfaitement calorifugé de capacité thermique C = 120 J.K^{-1}, on verse m_1 = 200 g d'eau de capacité thermique massique c_e = 4,18 J.g^{-1}.K^{-1}. La température d'équilibre s'établit θ_1 = 18°C. On y introduit alors un cube de glace de masse m_2 = 72 g pris initialement à la température θ_2 = - 10°C et on agite jusqu'à obtention d'un nouvel équilibre thermique. La capacité thermique massique de la glace est c_g = 2090 J.K^{-1}.kg^{-1}, et la chaleur latente de fusion est, à 0°C et sous la pression atmosphérique normale : L_{fus} = 333 kJ.kg^{-1}.

Q1. Déterminer, lorsque l'équilibre est atteint, la température finale T_f et faire un bilan glace/eau.

Q2. Calculer (littéralement et numériquement) la variation d'entropie, pour le système {eau liquide + glace + calorimètre}, consécutive à l'introduction de la glace.

Exercices d'entrainement

Exercice 4 : Contact thermique entre deux systèmes (★☆☆)

On met en contact thermique une masse m_1 = 200 g de cuivre, de capacité thermique massique c_1, initialement à la température T_1 = 500 K et une masse m_2 = 400 g de fer, de capacité thermique massique c_2, initialement à la température T_2 = 300 K. Le système constitué des 2 solides est supposé être isolé.

On rappelle que l'entropie d'une phase condensée peut s'écrire :$S(T) = S_0 + C.\ln(T/T_0)$.

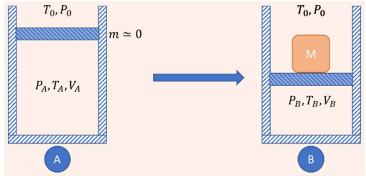
Q1. Sachant que la capacité thermique molaire des 2 solides est : $C_m = 3R$, déterminer les capacités thermiques massiques du cuivre et du fer.
(Données : M(Fe) = 55,8 g.mol^{-1} ; M(Cu) = 63,5 g.mol^{-1}).

Q2. Calculer la température finale des 2 solides.

Q3. Calculer la variation d'entropie du système constitué des 2 solides. Discuter du caractère réversible de cette transformation.

Exercice 5 : Transformation adiabatique irréversible (★★☆)

On considère n moles de gaz parfait diatomique dans un cylindre de section S à parois adiabatiques, fermé par un piston de masse m négligeable, à l'équilibre thermodynamique dans l'état initial A, à la température $T_A = T_0$. On dépose brutalement une masse M et on attend l'équilibre. L'équilibre est atteint en B où l'on mesure $P_B = 2.P_0$. Voir le cours pour l'expression de l'entropie du gaz parfait.



Q1. Quelle relation lie la masse M et la pression P_0 ?

Q2. Par une étude des équilibres, exprimer la relation liant le volume final V_B et la température finale T_B.

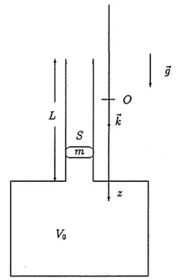
Q3. Calculer l'entropie échangé durant la transformation.

Q4. Par application du premier principe, trouver une seconde relation liant le volume finale V_B et la température finale T_B. En déduire les expressions de T_B en fonction de T_0 et de V_B en fonction de V_A.

Q5. La transformation est a priori irréversible, prouvez-le à l'aide du second principe et évaluez l'entropie créée.

Exercice 6 : Tube de Rüchardt (★★☆)

Un gaz parfait est enfermé dans un ballon dont le col est un tube de section S dans lequel se trouve une bille de masse m. On suppose que la bille joue le rôle d'un piston étanche qu'on modélisera comme un cylindre de section S, et on négligera les frottements de la bille sur le tube. On note pa la pression atmosphérique et V_0 le volume total de gaz à l'équilibre. Le ballon est considéré comme calorifugé. On suppose que la dynamique du système est suffisamment lente pour que l'on puisse considérer l'évolution du gaz comme quasi-statique réversible. On choisira un axe vertical descendant Oz et on notera $p(z)$ la pression dans le ballon quand la bille est à la côte z et p_e la pression dans le ballon à l'équilibre. L'origine de l'axe Oz est confondue avec la position d'équilibre ($z_e = 0$).



Q1. On lâche la bille dans le tube. Prévoir qualitativement ce qu'il se passe.

Q2. Déterminer la pression p_e à l'intérieur du ballon lorsque la bille est à l'équilibre en fonction de p_a, m, g et S.

Q3. Déterminer l'équation différentielle du mouvement de la bille en fonction de m, $p(z)$, p_e, S.

Q4. Exprimer $p(z)$ en fonction de p_e, γ, V_0, S et z.

Q5. En déduire l'équation du mouvement en fonction de m, p_e, S, γ et V_0.

Q6. On rappelle que pour $|x| \ll 1$, on a $(1+x)^\alpha \approx 1 + \alpha x$. Montrer que dans l'hypothèse où la section du tube est suffisamment faible pour que le volume balayé par la bille au cours de son mouvement soit négligeable devant le volume du ballon, le mouvement de la bille est sinusoïdal.

Q7. Montrer alors que la mesure d'une durée caractéristique du mouvement de la bille permet de déterminer l'exposant adiabatique γ du gaz, et préciser la relation correspondante.