LICENCES

Physique Chimie
Sciences pour l'Ingénieur
Sciences Physiques Anglais
Mathématiques – Physique Chimie

Semestre S2

BASES DE LA THERMODYNAMIQUE

Polycopié pour Travaux Dirigés

(2022-2023)

Enseignants :
TD1 - Valérie Malavergne
TD2 – Syphax Fereka
TD3 – Julien Léopoldès
TD4 – Yacine Khidas
TD5 – Régis Henrion

Plan du cours (à titre indicatif)

I. Présentation générale de la Thermodynamique
Systèmes thermodynamiques – Variables thermodynamiques – Equilibre thermodynamique

II. Le gaz parfait et son équation d'état – Théorie cinétique
Modèle du gaz parfait – Equation d'état –Notion sur la loi de distribution des vitesses – Pression – Température – Energie– Mélange de gaz parfait (Loi de Dalton)

III. Diagramme d'état de l'eau
Diagramme de phases et changements d'état

IV. Le premier principe de la thermodynamique
Echange d'énergie sous forme de chaleur et sous forme de travail – Calorimétrie – Equivalence chaleur travail – Energie interne (et Enthalpie)

V. Applications du premier principe de la thermodynamique pour les gaz parfaits
Energie – Capacité thermique – Transformation isotherme, adiabatique, isobare et isochore.

VI. Les machines - le deuxième principe de la thermodynamique - Entropie.
Notions de réversibilité et d'irréversibilité – Enoncé du Second Principe – Les machines dithermes – Théorème de Carnot – Inégalité de Clausius.
Définition de l'entropie – Propriétés générales de l'entropie – (Le troisième Principe) – Application aux Gaz Parfaits

Table des matières :

Equilibre thermodynamique, gaz parfaits et diagramme de phase

Ex 1 : **<u>Conversion d'unité</u> :**

Rappel : Loi d'Avogadro : Une mole de n'importe quel gaz parfait occupe toujours le même volume si l'on travaille dans les mêmes conditions de température et de pression.
Sachant qu'à 0°C et 1 atm, le volume molaire pour un gaz parfait est de 22,4L/mol, calculer la constante R des gaz parfaits en $J.mol^{-1}.K^{-1}$(S.I.), en $cal.mol^{-1}.K^{-1}$ et en mm $Hg.l.mol^{-1}.K^{-1}$.

Ex 2 : **<u>Application de l'équation d'état d'un gaz parfait.</u>**

Une certaine masse de gaz parfait occupe à - 20°C un volume de 1 L ; la pression est de 1 atm. A quelle pression doit-il être comprimé pour que son volume ne soit plus que d'un demi-litre quand la température est de 40°C ?

Ex 3 : **<u>Pression dans une cocotte-minute</u>**

Une cocotte-minute étanche contient de l'air humide, considéré comme un gaz parfait, à la température de T_1 = 22 °C et à la pression de P_1 = 1 atm.

1) Quelle pression P_2 règne-t-il dans la cocotte lorsque la température est portée à T_2 = 128 °C ?
2) Sachant que le récipient délimite un volume de V = 3 litres, quelle quantité de matière d'air humide (air + vapeur d'eau) contient-il ?

Ex 4 : **<u>Volumes d'une bulle d'air</u>**

Une bulle d'air prend naissance au fond d'un étang, en un lieu où la pression est P_1 = 3,03 atm et la température T_1 = 7°C. L'air est considéré comme un gaz parfait. La bulle monte vers la surface dont la température est T_2 = 27°C et qui est à la pression atmosphérique. Déterminer le rapport des volumes de la bulle au fond de l'étang et à la surface puis faîtes l'application numérique.

Ex 5 : **<u>Fuite de réservoir</u>**

Un récipient contient une masse m_0 = 1 g de dioxygène à une pression P_0 = 10 atm et à une température T_0 = 47 °C. . Le dioxygène est considéré comme un gaz parfait. On trouve qu'un peu plus tard, à cause d'une fuite, la pression est tombée à 5/8 de sa valeur initiale et que la température est tombée à T_1 = 27 °C.

1) Quel est le volume du récipient ?
2) Quelle quantité de dioxygène s'est-il échappé entre les deux observations ?

On donne la masse molaire de l'oxygène : 16 $g.mol^{-1}$.

Ex 6 : **<u>Gonflage d'un pneu</u>**

La pression d'un pneumatique est ajustée l'hiver, à T_1 = – 10 °C, à la pression de 3 atm que préconise à froid le fabricant. En été, la température est T_2 = 30°C. L'air est considéré comme un gaz parfait.

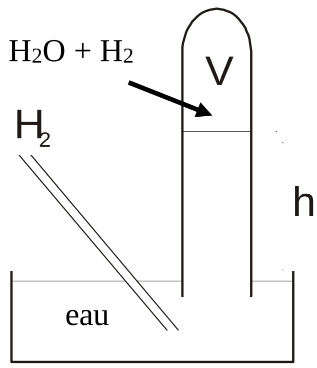
Etant capable de ressentir les effets néfastes d'une variation de pression de 10 %, le conducteur doit-il tenir compte du changement de saison pour le gonflage des pneumatiques (on négligera la variation de volume du pneu) ?

Ex 7 : <u>Mélange idéal de deux gaz parfaits</u>

Soit une masse m = 80 g d'un mélange gazeux de diazote N_2 et de méthane CH_4, formé de 30 % en masse de diazote. Ce mélange occupe un volume V = 9,95 litres à T = 150°C.
Il est considéré comme un mélange idéal de gaz parfaits.
On donne : Masse molaire de diazote : M_{N2} = 28 g/mol. Masse molaire du méthane : M_{CH4} = 16 g/mol.

1) Calculer la pression totale du mélange gazeux.
2) Calculer les pressions partielles de chacun des gaz.

Ex 8 : <u>Mélange idéal de deux gaz parfaits</u>



On recueille dans une cuve à eau un mélange de dihydrogène (H_2) et de vapeur d'eau (H_2O) qui occupe un volume V = 150 cm^3. La pression atmosphérique vaut 1 bar et la température 20°C. La dénivellation d'eau est *h* = 5 cm. Evaluer la masse d'hydrogène.
On donne la pression de vapeur saturant P_{H2O} = 0,023.10^5 Pa à 20°C.
On donne aussi la loi de l'hydrostatique : Soit deux points *A* et *B* respectivement à l'altitude z_A et z_B dans un même fluide (de masse volumique ρ_{fluide}), alors leurs pressions sont telles que : $P_B - P_A = -\rho_{fluide} g (z_B - z_A)$.

Ex 9 : <u>Dissociation du dibrome Br_2</u>

Une masse $m = 1\ g$ de dibrome (Br_2) à la pression atmosphérique passe de la température initiale $T_0 = 900K$ à la température finale $T_1 = 1800K$.

1) Sachant que $M_{Br} = 80 g.mol^{-1}$, quel est le volume initial V_0 et final V_1 ? On considérera le dibrome comme un gaz parfait.
2) L'expérience montre que le volume final est en fait V'_1 = 1,20 L. Ce résultat s'explique en admettant qu'une partie des molécules Br_2 s'est dissociée en atomes de brome Br.
    a. Déterminer la quantité de matière de dibrome à l'état initial, n_0.
    b. On note *X* la proportion de molécule de dibrome qui s'est dissociée ($X = n_{dissocié}/n_0$). En appliquant la conservation de la quantité de matière, déterminer puis calculer *X*.

Ex 10 : <u>Air humide</u>

Le point triple de l'eau est obtenu à T_0 = 0,01°C et P_0 = 0,0061 atm.
Or, on peut observer simultanément de la vapeur d'eau, de la pluie et de la grêle dans l'air humide ambiant (T_0 = 0°C et P = 1 atm)

1) Rappeler ce qu'est le point triple de l'eau.
2) Dans l'air humide (il ne s'agit donc plus d'un corps pur), à T_1=0°C et P_1=1 atm, on peut aussi observer un équilibre entre la glace, l'eau liquide, et la vapeur d'eau. Dans quelles proportions l'air et la vapeur d'eau sont-ils alors mélangés ?

Donnée : on considèrera que P_{vsat}(0°C)=P_{vsat}(0,01°C)=P_0.

Théorie cinétique des gaz parfaits

Ex 1 : On donne la constante des gaz parfaits $R = 8{,}31\ J\ K^{-1}\ mol^{-1}$ et la constante de Boltzmann $k = 1{,}381\ 10^{-23}\ J\ K^{-1}$.

Un récipient cubique contient, sous la pression $P_0 = 1{,}013\ 10^5$ Pa et à la température T = 273,15 K, $n = 10^3$ moles d'argon Ar de masse molaire M = 39,90 $g.mol^{-1}$.

En considérant ce gaz comme parfait, calculer littéralement, puis numériquement :

- le nombre d'atomes N du gaz,
- la masse m d'un atome,
- le volume V du récipient et son arête a,
- le nombre moyen $\overline{n}$ d'atomes par mètre cube,
- l'ordre de grandeur s de l'espacement moyen entre deux atomes voisins,
- l'énergie cinétique moyenne $\overline{E}$ d'un atome,
- la vitesse quadratique moyenne v*.

Ex 2 (facultatif) : Un gaz parfait, formé de molécules neutres, occupe à la température uniforme T, un volume V, sous la pression P. On désigne par **n** la densité particulaire (le nombre de particules par unité de volume) et par k la constante de Boltzmann.

1) Exprimer la pression du gaz en fonction des seules données **n**, k, et T.

2) a) Rappeler la formule donnant la pression d'un gaz composé de particules monoatomiques, de masse m, en fonction de **n**, m et de la vitesse quadratique moyenne v* des particules. En déduire l'énergie cinétique d'une particule en fonction de k et T.

b) Exprimer la vitesse quadratique moyenne en fonction de M, R, T, M étant la masse molaire du gaz et R la constante du gaz parfait relative à une mole.

3) *Applications numériques dans le cas du néon :* P = 0,5 Pa ; T = 273 K ; $k = 1{,}38\ 10^{-23}\ J\ K^{-1}$; $M = 20\ g\ mol^{-1}$; R = 8,32 S.I. Calculer la densité particulaire, l'énergie cinétique d'une particule en électrons-volts, la vitesse quadratique moyenne pour le néon.

Calorimétrie

Ex 1 : <u>Mélanges d'eau</u>

1) Quel volume V_1 d'eau à $T_1 = 60°C$ faut-il ajouter au volume $V_2 = 100$ L d'eau à $T_2 = 20°C$ pour obtenir un bain à $T = 35°C$? Donner l'expression littérale avant le résultat numérique.
2) On mélange $m_1 = 150$ g de glace à $T_1 = 0°C$ avec $m_2 = 500$ g d'eau à $T_2 = 50°C$.
   Calculer, littéralement puis numériquement, la température finale T_f du mélange.

[chaleur latente de fusion de la glace L = 80 cal/g ; capacité thermique C = 1 cal/(g.°C)]

Ex 2 : <u>Quantité d'énergie reçue au cours d'une transformation physique</u>

Toutes ces transformations se font à pression ambiante
Déterminer les formules littérales avant de faire les applications numériques.

1) On considère m = 1 kg de glace dans un freezer. Cette glace est à $T_1 = -10°C$.
   Quelle est la quantité de chaleur Q_1 à apporter pour changer cette glace en eau à la température $T_2 = 20°C$?
   a. On veut obtenir de la vapeur à $T_3 = 150°C$: quelle quantité de chaleur Q_2 supplémentaire doit-on fournir ?
2) Quelle énergie interne faut-il pour faire passer 1kg de glace à –15°C à de la vapeur d'eau à 200°C ?. On suppose que la vapeur d'eau est assimilable à un gaz parfait. Le système est thermiquement isolé.

On donne :

Capacité thermique massique de la glace : C_g= 2090 J kg^{-1} K^{-1} .
Capacité thermique massique de l'eau : C_e= 4180 J kg^{-1} K^{-1}.
Capacité thermique massique de la vapeur d'eau à pression constante: C_P = 2006 J.kg^{-1}.K^{-1}.
Chaleur latente de fusion de la glace : L_f = 334 10^3 J kg^{-1}.
Chaleur latente de vaporisation de l'eau : L_v = 2244 10^3 J kg^{-1}

<u>Ex 3 : Quantité de chaleur reçue au cours d'un échauffement</u>

Aux faibles pressions, la capacité thermique massique à pression constante d'un gaz diatomique peut s'exprimer par la relation empirique : $C_p = A_0 - (A_1 / T) + (A_2 / T^2)$
Donner l'expression de la quantité de chaleur qu'il faut fournir à n moles d'un tel gaz, de masse molaire M, pour l'échauffer de la température T_1 à la température T_2.
Application numérique :
$T_1 = 27°C$; $T_2 = 127°C$; n = 1 mol ; le gaz est le monoxyde de carbone (CO = 28 g.mol^{-1}) pour lequel on a les coefficients A_0 = 1,41 J.g^{-1}.K^{-1} ; A_1 = 492 J.g^{-1} ; A_2 = 16.10^4 J.g^{-1}.K.

Ex 4 : <u>Contact thermique de 2 compartiments séparés par une paroi mobile</u>

Une enceinte contient V_1 = 44,8 litres de dioxygène à T_1 = 0°C et P_1 = 1 atm.
Cette enceinte est mise en contact thermique avec une autre enceinte ayant un volume de V_2 = 20 litres et contenant une mole d'argon Ar à T_2 = 127°C.
1) Calculer les vitesses quadratiques moyennes des molécules de chacun des deux gaz avant la mise en contact.
Exprimer, en fonction des données, l'énergie cinétique totale avant la mise en contact.
2) Soit T_f la température d'équilibre après la mise en contact. Exprimer, en fonction de T_f, l'énergie cinétique après la mise en contact.
Appliquer le principe de conservation de l'énergie pour calculer la température d'équilibre T_f.
En déduire la pression à l'équilibre si l'on suppose l'ensemble thermiquement isolé et si la paroi est mobile, sans frottement, entre les deux compartiments.
3) Calculer les vitesses quadratiques moyennes à l'équilibre.
On donne : masse molaire O_2 = 32 g mol^{-1} ; masse molaire Ar = 40 g mol^{-1}.

Application du 1er principe aux gaz parfaits.

Ex 1 : <u>Représentations de transformations d'un gaz parfait dans le diagramme de Clapeyron ; calculs de travaux, quantités de chaleur reçues et variation d'énergie interne</u>

On considère une mole de gaz parfait à chaleurs massiques c_P et c_V constantes, subissant les transformations suivantes :

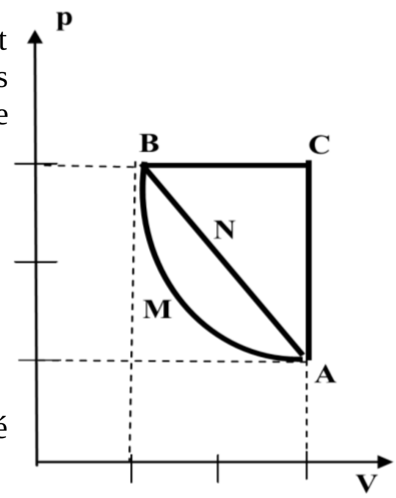
A $\Rightarrow$ B : compression isochore quasistatique avec $P_B = 2P_A$;
B $\Rightarrow$ C : dilatation isobare quasistatique avec $V_C = 2V_A$;
C $\Rightarrow$ D : détente isotherme quasistatique avec $V_D = 3V_A$;
D $\Rightarrow$ E : détente adiabatique réversible avec $V_E = (4/3)^{1/\gamma}\, V_D$ où γ est le coefficient adiabatique.

1) Exprimer P_E en fonction de P_A.
2) Tracer ces transformations sur un diagramme de Clapeyron (P,V).
3) Pour chacune des transformations AB, BC, CD, DE, donner l'expression :
   - du travail reçu : W_{AB}, W_{BC}, W_{CD}, W_{DE} ;
   - de la quantité de chaleur reçue : Q_{AB}, Q_{BC}, Q_{CD}, Q_{DE} ;
   - de la variation d'énergie interne : ΔU_{AB}, ΔU_{BC}, ΔU_{CD}, ΔU_{DE}.

   En déduire ΔU_{ABCDE}.
4) Donner le travail et la quantité de chaleur reçus, ainsi que la variation d'énergie interne au cours de la transformation directe AE, en fonction de T_A et T_E.
5) L'ensemble de cette question doit être traité sans aucun calcul.
   Sur un diagramme de Clapeyron, le travail reçu au cours d'une transformation peut être représenté par une surface. Recopier le diagramme de Clapeyron tracé en 2).
   Sur ce nouveau diagramme :
   - Hachurer en //////// la surface correspondant au travail reçu au cours de la transformation ABCDE. Ce travail est-il positif ou négatif ?
   - Hachurer en \\\\\\\\ la surface correspondant au travail reçu au cours de la transformation directe AE. Ce travail est-il positif ou négatif ?
   - Comparer W_{ABCDE} à W_{AE} et ΔU_{ABCDE} à ΔU_{AE}. Commenter.

Ex 2 : <u>Calculs de travaux et quantités de chaleur reçus au cours de transformations d'un gaz parfait</u>

On considère deux moles de dioxygène (gaz supposé parfait) que l'on peut faire passer d'un état initial A à un état final B par trois transformations quasistatiques distinctes dont la représentation dans un diagramme de Clapeyron (P-V) est donnée ci-contre, avec $P_B = 3P_A$ et $T_B = T_A$:



- AMB : transformation isotherme,
- ACB : transformation isochore puis isobare,
- ANB : transformation représentée par une droite.

1) Préciser l'équation de la courbe représentant l'isotherme AMB.

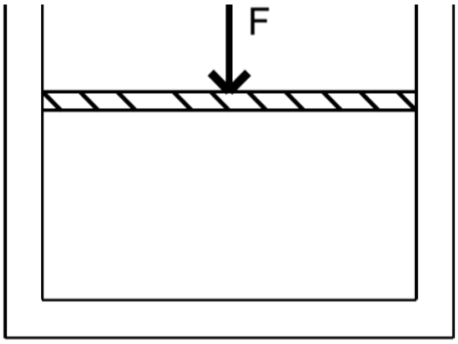
2) Déterminer et comparer, en fonction de R et T_A, le travail et la quantité de chaleur mis en jeu dans chacune de ces transformations.
Justifier chaque réponse.
A.N: T_A = 300 K et R = 8,32 S.I.

Ex 3 : Transformations adiabatiques irréversible et réversible d'un gaz parfait monoatomique

Un cylindre, muni d'un piston de surface $S = 100$ cm² et de masse négligeable, contient une masse d'hélium $m = 1$ g (assimilable à un gaz parfait de masse molaire 4 g/mol et de coefficient adiabatique $\gamma = 5/3$), à la température initiale $T_0 = 300$ K.
Cette enceinte est adiabatique. La pression atmosphérique est $P_0 = 10^5$ Pa.
1) Donner la valeur initiale des variables d'état de l'hélium.
On va dans la suite exercer une force de valeur $F = 1000$ N sur le piston.

2) Soit P_1 la pression du gaz à l'équilibre lorsqu'on exerce la force **F** sur le piston.

Calculer le rapport $x = P_1 / P_0$.



3) La force **F** est exercée en plaçant "d'un seul coup" sur le piston des masses marquées : le piston oscille puis s'arrête. L'état final du gaz est défini par (P_1, V_1, T_1).
De quel type de transformation s'agit-il ?
Exprimer la quantité de chaleur reçue Q, le travail reçu W et la variation d'énergie interne ΔU.
Les comparer.
En déduire l'expression, en fonction de x et γ, du rapport V_1 / V_0 , puis celle du rapport T_1 / T_0.

4) La force **F** est exercée en plaçant lentement et successivement sur le piston de nombreuses masses marquées de petite valeur. L'état final du gaz est défini par (P_2, V_2, T_2).
De quel type de transformation s'agit-il ?
Que vaut la pression P_2 ? Justifier.
Calculer, en fonction de x et γ, les rapports V_2 / V_0 et T_2 / T_0.

Machines thermiques et second principe

Ex 1 : Cycle de Carnot d'un gaz parfait

On considère m = 1 kilogramme d'air (considéré comme un gaz parfait), subissant un cycle de Carnot moteur ABCDA : AB et CD isothermes et BC et DA adiabatiques réversibles.
La température au point A est T_A = 300 K.
Les pressions aux points A, B et C sont respectivement P_A = 1 atm, P_B= 3 atm et P_C = 9 atm.
On donne $C_p = 10^3$ J.kg $^{-1}$.K $^{-1}$ et $\gamma = 7/5$.

1) Représenter sur un diagramme de Clapeyron l'allure du cycle ABCDA (sans calcul).
2) Déterminer la pression P_D.
3) Calculer le rendement thermodynamique du cycle de 2 manières :
   a. en faisant le bilan thermique du cycle.
      i. *Indications :*
      ii. *Exprimer le rendement r à partir des travaux et quantités de chaleur, puis à partir des seules quantités de chaleur. Calculer Q_{AB} et Q_{CD} ; en déduire r.*
   b. à partir des températures extrêmes du cycle.
4) Calculer la variation d'entropie au cours de chaque transformation du cycle, puis sur la totalité du cycle.

Ex 2 : Cycle de Carnot d'un gaz parfait

Une machine réversible fonctionne en cycle de Carnot entre 700 K et 300 K. Quel pourcentage de la chaleur absorbée par la machine est converti en travail ?

Ex 3 : Machine frigorifique

Le fluide d'un réfrigérateur subit une transformation cyclique suivant un cycle de Carnot.
Au cours d'un cycle, de durée Δt, le fluide reçoit le travail W (W > 0).

1) Représenter le cycle dans le diagramme de Clapeyron.
2) Comparer la valeur Q_2 de la chaleur cédée par la source froide (température T_2) à celle Q_1 de la chaleur reçue par la source chaude (température T_1).
   Peut-on refroidir l'air d'une cuisine en laissant ouverte la porte du réfrigérateur ?
3) En supposant le cycle décrit de façon réversible, calculer Q_2 en fonction de W, T_1 et T_2.
4) Quelle masse de glace m à 0°C peut-on fabriquer par seconde à partir d'eau prise à 0°C ?

A.N : Le travail est fourni par un moteur de puissance $\mathcal{P} = 200\,W$;
$T_1 = 50°C$; $T_2 = -5°C$;
Chaleur latente massique de solidification de l'eau : $L = 320\,J/g$.
Durée d'un cycle : $\Delta t = 10\,s$.

Ex 4 : <u>Etude d'une turbine à gaz</u>

On considère une turbine à gaz, dont le fonctionnement <u>réversible</u>, suit le cycle théorique de Joule, c'est-à-dire que les n moles de gaz, considéré comme <u>parfait</u>, subissent les transformations suivantes :

- $A \rightarrow B$: compression adiabatique (dans le compresseur),
- $B \rightarrow C$: échauffement isobare (dans la chambre de combustion),
- $C \rightarrow D$: détente adiabatique (dans la turbine),
- $D \rightarrow A$: refroidissement isobare (dans un échangeur thermique).

1) Représenter le cycle dans le diagramme de Clapeyron $P = P(V)$. S'agit-il d'un cycle moteur ou récepteur ? Justifier à partir de la représentation.

2) a Déterminer les expressions des travaux reçus au cours de chacune des transformations adiabatiques (AB et CD) en fonction du coefficient adiabatique du gaz $\gamma = C_p / C_v$, des pressions P_A, P_B, P_C et P_D, ainsi que des volumes V_A, V_B, V_C et V_D.
Préciser le signe de chacun de ces travaux (en raisonnant sur les travaux élémentaires). En déduire une expression de ces travaux en fonction de γ, de la constante R des gaz parfaits et des températures T_A, T_B, T_C et T_D.
   b. Déterminer les expressions des travaux reçus au cours de chacune des transformations isobares (BC et DA) en fonction de n, R et des températures T_A, T_B, T_C et T_D. Préciser le signe de chacun de ces travaux.

3) Déterminer les expressions des quantités de chaleurs reçues au cours de chacune des transformations, en fonction de n, de la capacité calorifique molaire C_p, supposée constante, du gaz, et des températures T_A, T_B, T_C et T_D. Préciser le signe de chacune de ces quantités de chaleur.

4) a. Donner la relation de définition du rendement η du cycle en fonction du travail reçu au cours du cycle et d'une des quantités de chaleur précédentes.
   b. Montrer que ce rendement peut s'exprimer par : $\eta = 1 - \dfrac{T_D - T_A}{T_C - T_B}$.

5) a. Exprimer les rapports de températures T_A / T_D et T_B / T_C en fonction des volumes correspondants.
   En utilisant ensuite les relations liant volumes et températures lors des transformations adiabatiques, démontrer la relation $\dfrac{V_D}{V_A} = \dfrac{V_C}{V_B}$.
   En déduire une relation entre les rapports de températures.
   b. A partir des résultats de 4-b et de 5-a, déterminer l'expression du rendement η du cycle en fonction des seules températures T_A et T_B.

Ex 5 : <u>Variation d'entropie au cours d'un mélange</u>

On mélange, sous la pression atmosphérique, une masse $m_1 = 10$ kg d'eau prise à la température $T_1 = 27°C$, et une masse $m_2 = 1$ kg de glace prise à la température $T_2 = -10°C$.
Déterminer littéralement, puis numériquement, la température d'équilibre T et la variation d'entropie du système. Justifier le signe de ΔS.

Chaleur massique de l'eau : $C_1 = 4{,}2\ kJ.kg^{-1}.K^{-1}$;

Chaleur massique de la glace: $C_2 = 2{,}15\ kJ.kg^{-1}.K^{-1}$;

Chaleur latente massique de fusion de la glace : $L = 336\ kJ.kg^{-1}$.

Ex 6 : Variation d'entropie d'un gaz parfait :

Exprimer la variation élémentaire d'entropie d'un gaz parfait en fonction des variables indépendantes T et V. En déduire la variation d'entropie d'une mole de gaz parfait lorsque l'on triple simultanément la température initiale et le volume initial du gaz. On indiquera deux méthodes de résolution.
A.N. : $\gamma = 7 / 5$

Ex 7 (facultatif) : Centrale thermique

Une centrale thermique électrique, qu'elle soit alimentée en combustible nucléaire ou fossile, est une machine thermique qui fonctionne entre la température du réacteur ou du foyer et celle du milieu ambiant, représenté en général par un fleuve ou une autre masse d'eau.
On considère une centrale nucléaire moderne de puissance $\mathcal{P}$ = 750 000 kW ; la température du réacteur atteint 315 °C et on dispose d'un fleuve à 21 °C.

1) Quel rendement thermique maximal peut-on obtenir de la centrale ? Justifier.
   Exprimer le rendement en fonction de la puissance $\mathcal{P}$ et de la quantité de chaleur Q rejetée dans le fleuve pendant le temps t (t = 1 s).
   En déduire la quantité minimale de chaleur qui doit être rejetée dans le fleuve en fonction des températures.

2) Si le rendement théorique effectif de la centrale est 60 % du rendement théorique maximal, calculer la quantité de chaleur par seconde qui doit être rejetée dans le fleuve, ainsi que l'augmentation de la température de ce dernier lorsque son débit est 165 m^3/s.
On rappelle la chaleur massique de l'eau : $C_P = 4{,}19\ 10^3$ J kg^{-1} K^{-1}.

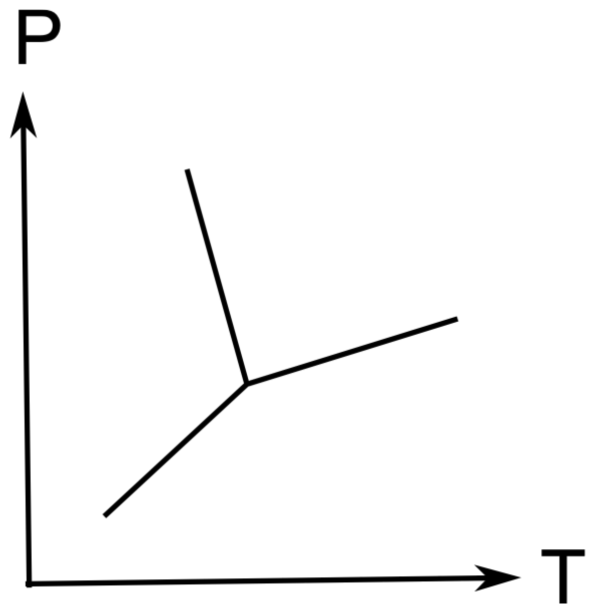
Université Gustave Eiffel 29 mars 2022
Licence PC-SPI-SPA, S2

Examen partiel de Thermodynamique
Calculatrice non programmable autorisée.
Le barème est indicatif.
Durée de l'épreuve : 2h

On donne la valeur de la constante des gaz parfaits : R=8,31 (J/K/mol)

<u>Questions de cours (4,5 pts)</u>

1.Enoncer le premier principe de la thermodynamique. (1)
2. Exprimer la variation infinitésimale dU de l'énergie interne d'un gaz parfait. (0,5)
3. Qu'est-ce qu'une transformation quasi-statique ? (1)
4. Compléter le diagramme de phase de l'eau ci-dessous y en indiquant les phases et le point triple. Expliquer ce que représentent les différents segments. Placer sur ce diagramme la pression ambiante. (2)



<u>Exercice I. Mélange de gaz parfaits (7 pts)</u>

On considère un système composé de deux récipients A_1 et A_2 dont les parois sont adiabatiques, indéformables et étanches. Initialement, chaque récipient contient un seul gaz parfait placé dans des conditions indiquées dans le tableau ci-dessous.

Récipient	Gaz	Volume (litre)	Pression (atm)	T(K)	n (mol)
A_1	N_2	V_1=30	P_1=2	T1=300	
A_2	O_2	V_2= 40	P_2=1	T2=400	

Les deux gaz ont une capacité thermique molaire constante $C_V = \frac{5}{2}R$ (J/K/mol).

1. Exprimer de façon littérale les quantités de matière n_{N2} et n_{O2}, puis compléter le tableau. (1)

A partir de cet état initial, les deux récipients sont mis en communication par des ouvertures et on laisse l'équilibre s'établir, correspondant à un état final pour lequel le mélange de gaz est à la pression P_f et à la température T_f. Les deux récipients communicants forment un système isolé.

2. Quelle est la définition de la pression partielle d'un gaz ? (0.5)
3. Montrer comment la pression partielle d'un gaz P_i est reliée à la fraction molaire du gaz x_i et à la pression P_f. (1)
4. Expliquer pourquoi la variation d'énergie interne du système entre l'état final et l'état initial est nulle. (0.5)
5. Exprimer de façon littérale la température finale du mélange T_f en fonction des données du problème et faire l'application numérique. (2)

On admettra pour la suite que $T_f = 333{,}3$ K .
6. Calculer la pression du mélange gazeux P_f. (1)
7. En déduire les pressions partielles de chacun des trois gaz dans le mélange à l'équilibre. (1)

Exercice II . Calorimétrie (4.5)

II-1 Mesure d'une capacité thermique (2)

On désire mesurer la capacité thermique massique C_{ve} d'un morceau de verre à l'aide d'une expérience réalisée à pression atmosphérique. Pour cela, on dispose d'un liquide de capacité massique C_{li} et d'un récipient permettant de placer le système dans un état isolé. Les capacités thermiques sont toutes supposées constantes. On insère dans le récipient une masse m_1 du liquide à la température T_1 avec une masse m_2 du verre à une température T_2. A l'équilibre, la température est T_3 et aucun changement de phase n'a lieu.

1. Quelle est l'expression de la variation infinitésimale de la chaleur δQ reçue par un liquide ou un solide dans cette expérience ? En déduire l'équation qui relie les chaleurs échangées par les deux corps. (1).
2. Donner l'expression littérale de C_{ve} puis la calculer. (1).

Capacité calorifique du liquide C_{li} =4000 J/K/kg.
m_1=300g, m_2= 200g, T_1=30°C, T_2=80°C, T_3=37°C.

II-1 Fonte d'un glaçon (2.5)

On verse 0,1 litre d'eau chaude sur un morceau de 100 g de glace à 0°C pour le faire fondre.
Quelle doit être la température de l'eau chaude à utiliser pour faire fondre la totalité du glaçon en eau à 0°C ?

Chaleur latente massique de fusion de la glace à 0°C : $3{,}35 \times 10^5$ J/kg,
Chaleur massique de l'eau : c_e=4180 $J.kg^{-1}.K^{-1}$
Chaleur massique de la glace : c_g=2090 $J.kg^{-1}.K^{-1}$

Exercice III . Travail des forces de pression (5)

Soit une mole de gaz parfait dans un piston étanche de volume V variable. On notera P et T respectivement la pression et la température à l'intérieur du piston. Le piston est en contact avec un milieu extérieur dont la pression est notée P_{ext} permettant l'application d'un travail des forces de pression.

1. Quelle est l'expression de la variation infinitésimale du travail fourni par le milieu extérieur ? (0.5)
2. Dans le cas où la transformation réversible, donner l'expression du travail W_{0f} reçu par le gaz durant la transformation entre un état initial (0) et un état final (f). (0.5)

Dans la suite, on considère des transformations d'un état initial (P_0,V_0,T_0) vers un état final (P_f,V_f ,T_f).

3. Le gaz subit une détente isobare réversible telle que T_f=2T_0. Représenter la transformation dans un diagramme de Clapeyron (P,V) et donner l'expression du travail reçu par le gaz en fonction de P_0 et V_0 et en fonction de R et T_0. (1.5)
4. Le gaz subit une compression isotherme réversible telle que P_f=2P_0. Représenter la transformation dans un diagramme de Clapeyron et donner l'expression du travail reçu par le gaz en fonction de R et T_0. (1.5)
5. Le gaz subit une compression isochore avec P_f=2P_0. Représenter la transformation dans un diagramme de Clapeyron (P,V) et donner l'expression du travail reçu par le gaz. (1)

AUCUN DOCUMENT AUTORISÉ
Le barème est indicatif. Calculatrice non programmable autorisée.
Tous les exercices sont indépendants.
Pour toutes les réponses, on attend un calcul littéral et un résultat littéral en fonction des données du sujet, avant le calcul numérique.

On donne :
- la constante des gaz parfaits : $R = 8{,}31\ (J/K/mol)$
- la constante de Boltzmann : $k_B = 1{,}38.10^{-23}$ J K^{-1}
- le nombre d'Avogadro : $N_A = 6{,}02\ .\ 10^{23}$
  On rappelle $R = k_B N_A$

I. Questions de cours (3,5 points)

1. On considère un moteur ditherme (la machine reçoit les chaleurs Q_1 et Q_2 de 2 thermostats à la température respective T_1 et T_2 avec $T_1 > T_2$). Faire un schéma représentant les transferts d'énergie au cours d'un cycle. Ecrire l'inégalité de Clausius (inégalité reliant Q_1, Q_2, T_1 et T_2) et préciser son expression dans le cas de transformations réversibles. Exprimer le rendement de ce moteur ditherme en fonction des chaleurs (Q_1 et Q_2) puis en déduire le rendement maximal de ce moteur ditherme en fonction des chaleurs des températures (T_1 et T_2).
2. Donner les différentes hypothèses du modèle du gaz parfait monoatomique à l'échelle microscopique d'un gaz pour qu'on puisse le considérer comme un gaz parfait ?

II. Calorimétrie (4,5 points)

On verse dans un récipient une masse m_1 d'eau liquide à la température T_1. On introduit dans ce récipient un cube de glace d'eau de masse m_2 pris initialement à la température T_2. On attend l'obtention d'un nouvel équilibre thermique pour lequel toute la matière est liquide qui se fait à la température T_3. Cette expérience se fait à pression ambiante. On néglige la capacité thermique du récipient et on considère le système {eau liquide + glace} isolé. On notera c_l et c_g les capacités thermiques massiques de l'eau liquide et de la glace et L_f la chaleur latente de fusion de l'eau.
1. Déterminer littéralement la température finale T_3. Détailler et argumenter votre raisonnement.
2. Exprimer littéralement la variation d'entropie, pour le système {eau liquide + glace}, entre l'état initial et final. Cette variation d'entropie devrait-elle être nulle, positive ou négative ? Pourquoi ? Expliquer et justifier bien chacune de vos réponses.

III. Théorie cinétique du gaz parfait (4,5 points)

1. Calculer le volume occupé par une mole d'un gaz parfait à la température de $T_1 = 0°C$ sous la pression $P_1 = 1$ atm. En déduire un ordre de grandeur de la distance moyenne entre molécule.
2. Soit un gaz parfait monoatomique contenu dans un récipient indéformable et isolé thermiquement. Il occupe un volume V_2 à la température $T_2 = 500$ K et contient N atomes.

a. Exprimer l'énergie cinétique ε_c moyenne d'un atome de ce gaz en fonction de k_B et T_2. En déduire l'expression de l'énergie interne U de l'ensemble du gaz parfait en fonction des données de l'exercice. Calculer ε_c et U pour une mole de ce gaz.

b. Déduire de la question précédente l'expression de la vitesse quadratique moyenne v* des molécules en fonction de la masse molaire *M* du gaz, de sa température T_2 et de R. Faites l'application numérique pour un gaz ayant une masse molaire M = 40g/mol.

c. La température est abaissée de moitié ($T_2 = 250$ K). Que pouvez-vous dire de ε_c , U et v* ?

IV. Machine thermique (8 points)

On considère une machine ditherme fonctionnant avec deux sources de chaleurs (thermostats) à des températures respectives T_A et T_C telles que $2T_A = T_C$. Cette machine suit le cycle de Stirling qui se caractérise par :

- une détente isotherme réversible de **A** →**B** à la température T_A telle que $V_B=3V_A$
- une échauffement isochore réversible de **B** →**C**
- une compression isotherme réversible de **C**→**D** à la température T_C
- une refroidissement isochore réversible de **D** → **A**

Le fluide décrivant ce cycle dans le sens **ABCDA** est assimilé à un gaz parfait contenant n moles. On considérera que toutes les transformations sont réversibles.

1. Représentation graphique.

a. Exprimer P_B, P_C, et P_D en fonction de P_A.

b. Représenter l'allure du cycle de cette machine thermique dans un diagramme pression en fonction du volume P(V).

Placer les points A, B, C et D, les volumes V_A et V_B, ainsi que les 4 pressions, on indiquera sur le schéma les courbes correspondant aux isothermes T_A et T_C.

La machine fonctionne-t-elle en mode moteur ou récepteur ?

2. Exprimer littéralement le travail, la quantité de chaleur et la variation d'énergie interne pour chacune des transformations. Déterminer le signe pour chaque quantité.

3. On utilise cette machine thermique comme une machine frigorifique dont l'objectif est de prendre de la chaleur à la source froide au cours de l'isotherme la plus froide.

a. Définir le rendement η (efficacité ou coefficient de performance) de cette machine en mode frigorifique.

b. Montrer que l'efficacité peut s'écrire sous la forme :

$$\eta = \frac{T_A}{T_C - T_A}$$

c. Calculer η