

# Examen Physique Générale II

## Thermodynamique

### SIE GC

#### Énoncé

## Ne pas ouvrir avant le début de l'épreuve

#### Instructions :

- Vérifier que votre nom et numéro sciper sont corrects.
- Le cahier ne doit pas être dégrafé, les pages ne doivent pas être séparées. Les brouillons ne seront pas ramassés. Seul le cahier de réponses est corrigé
- **Ne pas ajouter de feuilles sur papier libre. Elles ne seront pas scannées et donc pas corrigées**
- Des cadres libres ont été ajoutés à la fin des exercices et du feuillet, en cas de nécessité
- **Le ramassage des copies (cahier et énoncé) se fait uniquement à la table, même pour les départs anticipés**
- Seul document autorisé: un formulaire manuscrit A4 recto/verso. Pas de calculatrice.
- L'énoncé de l'examen comporte 8 pages avec 3 exercices, numérotés de 1 à 3. Le cahier de réponses comporte 24 pages. Le nombre de points maximum pour cet examen est de 50 points.
- Dans tous les problèmes, sauf indication contraire, les résultats sont à exprimer en fonction des données fournies et des constantes physiques connues. Chaque réponse doit être justifiée dans le cadre prévu à cet effet.
- Pas de téléphone. Beaucoup des questions sont conceptuelles ou bien nécessitent très peu de calculs et sont indépendantes les unes des autres. On pourra admettre la solution d'une question donnée dans l'énoncé pour résoudre les questions suivantes.

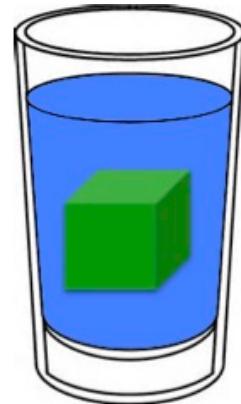
*Page vide*

## Exercice 1 : Art et calorimétrie (14 points)

Données du problème :

$M = 2 \text{ kg}$	Masse d'une pièce d'aluminium
$T_{\text{Al}} = 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Température initiale de l'aluminium
$L_{\text{eau}} = 2000.10^3 \text{ J kg}^{-1}$	Chaleur latente massique de vaporisation de l'eau
$c_{\text{Al}} = 900 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$	Capacité calorifique massique de l'aluminium
$c_{\text{eau}} = 4000 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$	Capacité calorifique massique de l'eau
$V_{\text{eau}} = 2 \text{ l}$	Volume initial de l'eau
$T_{\text{in}} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Température initiale de l'eau ou de l'air
$\rho_{\text{eau}} = 1000 \text{ kg m}^{-3}$	Masse volumique de l'eau
$R = 8 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$	Constante des gaz parfaits
$P$	Pression atmosphérique au niveau de la mer

Un artiste vient de compléter son dernier chef-d'œuvre d'art moderne : deux pièces métalliques en aluminium de  $M = 2 \text{ kg}$  chacune, qui viennent de sortir du four à la température de  $T_{\text{Al}} = 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pour refroidir le premier cube, l'artiste utilise un récipient isolant qui se trouve au niveau de la mer. Le récipient est ouvert vers le haut et contient, dans l'état initial,  $V_{\text{eau}} = 2 \text{ litres}$  d'eau à une température de  $T_{\text{in}} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . La première pièce est immergée dans l'eau et elle échange de la chaleur uniquement avec l'eau liquide jusqu'à atteindre l'équilibre thermique. On néglige les échanges de chaleur entre l'eau et l'environnement extérieur.



-a- Montrer que la température finale,  $T_f$ , du système eau + bloc à l'équilibre thermique est  $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

-b- Quelle quantité d'eau,  $m$ , a été évaporée ?

-c- Quelle est la variation d'entropie,  $\Delta S$ , du système bloc et eau (liquide et vapeur) entre l'état initial et l'état d'équilibre thermique ?

-d- Si la même expérience était faite au sommet du Mont Blanc (4807 m), est-ce que la quantité d'eau évaporée et la température à l'équilibre thermique seraient supérieures ou inférieures à celles calculées aux questions 1 et 2 ? Justifiez votre réponse.

Pour refroidir la deuxième pièce, l'artiste utilise la démarche suivante :

- Il utilise le même récipient rempli maintenant avec de l'air au niveau de la mer, et à la température  $T_{\text{in}}$ .
- Il dépose le cube dans le récipient.
- Il ferme le récipient avec un piston qui peut glisser sans frottement.
- Il attend l'équilibre thermique.

On assimile l'air à un gaz diatomique rigide, et on suppose que il n'y a pas d'échange de chaleur entre l'intérieur du récipient (air + cube) et l'extérieur.

-e- Quelle est température,  $T'_f$ , à l'équilibre thermodynamique si à l'intérieur du récipient fermé par le piston il y a 10 moles d'air ? Donnez le résultat en fonction de  $n$ ,  $R$ ,  $M$ ,  $c_{Al}$ ,  $T_{Al}$  et  $T_{in}$ .

-f- Exprimer :

- Le volume d'air,  $V'_f$ , à l'équilibre thermodynamique en fonction de  $V_{in}$ ,  $T'_f$  et  $T_{in}$ .
- Puis le travail,  $W$  et la chaleur,  $Q$ , échangés avec l'extérieur en fonction de  $V_{in}$ ,  $V'_f$  et  $P$ .

## Exercice 2 : Tentative de conception d'un réfrigérateur (18 points)

*La deuxième partie peut être traitée indépendamment de la première.*

On considère  $n$  moles d'Hélium, que l'on considère comme un gaz parfait monoatomique.

**Première partie.** On considérera dans toute cette partie, que les transformations sont réversibles.

On fait subir au gaz un cycle **résistant** constitué des transformations suivantes :

1. Transformation isobare d'un état A avec un volume  $V_A = V_0$ , et une pression  $p_A = p_0$  à un état B avec un volume  $V_1$  plus faible que  $V_0$ .
2. Transformation isochore de l'état B à l'état C avec pression  $p_1$ , plus faible que  $p_0$ .
3. Transformation isobare de l'état C à l'état D.
4. Transformation isochore de l'état D à l'état A.

-a- Dessinez le cycle A-B-C-D-A dans un diagramme p-V.

-b- Exprimez les pressions, volumes et températures,  $p$ ,  $V$  et  $T$  des points A, B, C et D en fonction de la constante des gaz parfait,  $R$  et  $V_0$ ,  $V_1$ ,  $p_0$ ,  $p_1$  et  $n$ .

-c- On dimensionne le cycle de sorte que  $T_B = T_D$ . Quelle relation doit on avoir entre  $V_0$ ,  $V_1$ ,  $p_0$  et  $p_1$  ?

Dans la suite du problème, on se place dans le cas  $T_B = T_D$ . On modifie le cycle pour faire décrire au gaz un cycle à trois transformations : ABDA, dans lequel BD suit une isotherme.

-d- Exprimez les capacités calorifiques à volume constant,  $C_V$  et à pression constante,  $C_P$  du gaz en fonction de  $n$  et  $R$ .

-e- Exprimez la chaleur,  $Q$  et le travail,  $W$  échangés par le gaz lors de chaque transformation, AB, BD, et DA. Donnez les résultats en fonction de  $n$ ,  $R$  et des températures des points A et B :  $T_A$  et  $T_B$ .

-f- Quelles sont les variations d'énergie interne,  $\Delta U$ , d'enthalpie,  $\Delta H$  et d'entropie,  $\Delta S$  lors de chaque transformation, AB, BD et DA. Donnez les résultats en fonction de  $n$ ,  $R$  et des températures des points A et B :  $T_A$  et  $T_B$ .

-g- Indiquez les signes de la chaleur,  $Q$  et le travail,  $W$  échangés par le gaz lors de chaque transformation.

**Deuxième partie :** Essai de réalisation pratique du cycle précédent. On place les  $n$  moles d'Hélium dans un cylindre dont les parois sont conductrices de la chaleur. Le cylindre est fermé par un piston. Le piston peut être, au choix, bloqué par une vis, pour maintenir un volume constant, ou libéré afin de le laisser évoluer à la pression extérieure, soit de le déplacer pour ajuster la pression. On néglige les frottements entre le piston et le cylindre. On dispose de deux bains thermostatés à  $T_A$  et  $T_B$ , avec  $T_A > T_B$ .

Initialement, le gaz dans le cylindre est à  $p_0$  (pression extérieure),  $V_0$  et  $T_A$ . Le piston est libre de se déplacer. On plonge le cylindre dans le bain à  $T_B$  et on attend que la température du gaz ait atteint  $T_B$ .

-h- La transformation est-elle réversible ou irréversible ? Justifier.

-i- La quantité de chaleur,  $Q_1$ , reçue par le gaz est-elle positive ou négative ? Justifier.

On laisse le cylindre dans le bain et on tire très doucement sur le piston, jusqu'à arriver au volume  $V_0$ .

-j- La transformation est-elle réversible ou irréversible ? Justifier.

-k- La quantité de chaleur,  $Q_2$ , reçue par le gaz est-elle positive ou négative ? Justifier.

On serre la vis pour maintenir le volume à  $V_0$ , et on plonge le cylindre dans le bain à  $T_A$ . On attend que le gaz reprenne la température  $T_A$ .

-l- La transformation est-elle réversible ou irréversible ? Justifier.

-m- La quantité de chaleur,  $Q_3$ , reçue par le gaz est-elle positive ou négative ? Justifier.

On appelle  $Q_{\text{chaud}}$  la chaleur échangée avec le bain à  $T_A$  et  $Q_{\text{froid}}$  la chaleur échangée avec le bain à  $T_B$  au cours du cycle.

-n- Exprimer  $Q_{\text{chaud}}$  et  $Q_{\text{froid}}$  à l'aide de  $Q_1$ ,  $Q_2$  et  $Q_3$ .

-o- Montrer que  $Q_{\text{froid}} < 0$

-p- Est-il possible d'utiliser ce cycle pour en faire un réfrigérateur ?

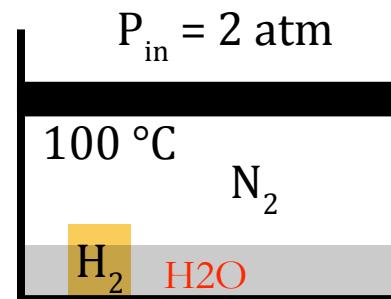
-q- Calculer l'entropie créée,  $S_{\text{int}}$ , au cours du cycle en fonction de  $R$ ,  $n$ ,  $T_A$  et  $T_B$ .

### Exercice 3 : De l'eau dans le piston (18 points)

Données du problème :

$R = 8 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$	Constante des gaz parfaits
$L_{\text{eau}}$	Chaleur latente molaire de vaporisation de l'eau à pression constante
$P_0 = P_{1 \text{ atm}} = 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$	Pression atmosphérique au niveau de la mer
$V_{\text{in}} = 1 \text{ l}$	Volume initial du récipient
$P_{\text{in}} = 2 \text{ bar}$	Pression initiale dans le récipient
$n = 2 \text{ mol}$ <span style="color: red;">0,1 mol</span>	Nombre de moles d'eau dans le récipient
$T = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Température ambiante

Soit un récipient de volume initial  $V_{\text{in}} = 1 \text{ l}$ , fermé par un piston, contenant de l'azote et  $n = 0,1$  moles d'eau. La pression dans le récipient est  $P_{\text{in}} = 2 \text{ bar}$ , les températures de l'ensemble et celle de l'extérieur sont de  $T = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Les parois du récipient conduisent la chaleur. On néglige le volume d'eau liquide. Dans tout le problème on considère que l'azote et l'eau sous forme vapeur se comportent comme des gaz parfaits. Les molécules d'azote sont diatomiques rigides.



-a- Montrer qu'il reste de l'eau sous forme liquide dans le récipient. Calculez le nombre de moles,  $n_l$ , sous forme liquide.

-b- Quelles sont les pressions partielles d'azote,  $P_{\text{N}2}$  et d'eau sous forme gazeuse,  $P_{\text{H}2\text{O}}$ , dans le récipient ?

-c- Quelles sont les humidités relatives,  $h$ , et la température de rosée,  $T_r$ , du gaz dans le récipient.

**Premier cas, A :** En restant à température constante on fait varier le volume de manière réversible.

-d- Déterminez la pression,  $P_{\text{fin}}$ , les pressions partielles d'azote,  $P'_{\text{N}2}$  et d'eau,  $P'_{\text{H}2\text{O}}$  et le volume,  $V_{\text{fin}}$ , quand toute l'eau a été évaporée.

On cherche quelle est la quantité de chaleur,  $Q_A$ , échangée par le système. Nous allons faire le calcul séparément pour les deux sous-systèmes eau et azote.

#### Calcul pour l'eau :

-e- Expliquez pourquoi il est judicieux de considérer la fonction d'état enthalpie,  $H$ .

-f- Écrire la différentielle de l'enthalpie  $dH$  en fonction de  $p$ ,  $V$  et la chaleur échangée de manière réversible,  $\delta Q_{\text{rev}}$ .

-g- En déduire la quantité de chaleur,  $Q_{\text{eau}}$ , échangée par l'eau en fonction de  $n$ ,  $n_l$  et  $L_{\text{eau}}$ .

**Calcul pour l'azote :**

- h- Que vaut la variation d'enthalpie pour l'azote  $\Delta H_{N2}$  ?
  - i- En intégrant  $dH$  le long de la transformation pour l'azote, en déduire la quantité de chaleur échangée par l'azote,  $Q_{N2}$ , en fonction de  $n$ ,  $R$ ,  $T$ ,  $P_{N2}$  et  $P'_{N2}$ . Exprimez ensuite  $Q_A$ .
  - j- Calculer le travail échangé,  $W_A$ , par le système en fonction de  $P_0$ ,  $n$ ,  $R$ ,  $T$ ,  $V_{in}$  et  $V_{fin}$ . Indication : séparer de la même manière que précédemment le calcul pour l'eau et pour l'azote.
  - k- En déduire la variation d'énergie interne  $\Delta U$ .
- Second cas, B :** On passe maintenant brutalement de la pression initiale à la pression finale calculée en 2 et on attend le retour à l'équilibre thermodynamique.
- l- Calculez la chaleur échangée,  $Q_B$ , lors de cette transformation en fonction de  $\Delta U$ ,  $P_{fin}$ ,  $V_{in}$  et  $V_{fin}$ .

*Page vide*