

Problème I Régate spatiale

Lancée en 2010, IKAROS est une voile solaire développée par l'agence spatiale japonaise JAXA. Sa superficie est $S = 173 \text{ m}^2$, sa masse totale $M = 315 \text{ kg}$, et la poussée due aux photons solaires la percutant est annoncée à $1,6 \text{ mN}$. Elle circule sur une trajectoire héliocentrique avec une période de 304 jours.

Nous admettrons que la puissance reçue par unité de surface à la distance D du soleil de la part de ce dernier (flux solaire) est $\Phi_r(D) = C \left(\frac{U}{D}\right)^2$ avec $C = 1,37 \text{ kW m}^{-2}$ et $U = 1,50 \times 10^8 \text{ km}$. Nous supposons de plus que le rayonnement solaire est de longueur d'onde moyenne $\lambda_m = 510 \text{ nm}$ et que la voile solaire, parfaitement réfléchissante, est orientée perpendiculairement à la direction des rayons lumineux provenant du soleil, si bien que les photons arrivent perpendiculairement sur cette dernière, avec l'énergie $E = \frac{hc}{\lambda_m}$ et la quantité de mouvement incidente $\vec{p}_i = \frac{h}{\lambda_m} \vec{u}_x$, avec h constante de Planck et $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ vitesse de la lumière dans le vide. On donne la masse du soleil, $M_S = 2,0 \times 10^{30} \text{ kg}$ et la constante de gravitation $\mathcal{G} = 6,7 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$.

1. En supposant la trajectoire d'IKAROS circulaire, lui appliquer la loi de la quantité de mouvement dans le référentiel héliocentrique supposé galiléen et montrer que le rayon R de cette trajectoire s'écrit $R = \left(\mathcal{G} \frac{M_{\text{soleil}} T^2}{4\pi^2}\right)^{(1/3)}$. En déduire la valeur numérique de R ainsi que le flux solaire Φ_r reçu par IKAROS.
2. On note n le nombre de photons incidents au niveau d'IKAROS. Déterminer en fonction de n , c et S le nombre dN de photons frappant une surface S pendant le temps dt .
3. En déduire l'énergie reçue sur la surface S pendant le temps dt puis montrer que $n = \frac{\Phi_r \lambda_m}{hc^2}$.
4. À partir du nombre de photons heurtant la voile entre t et $t + dt$, déduire la variation totale de quantité de mouvement de ces dN photons entre t et $t + dt$, sachant que la voile est parfaitement réfléchissante. On exprimera $\Delta \vec{p}$ en fonction de S , Φ_r , c , dt et un vecteur unitaire que l'on définira.
5. En déduire la quantité de mouvement cédée par les photons pendant dt à la voile, et la force en résultant, en fonction de Φ_r , c , S . A quelle pression cela correspond-il ?
6. Faire l'application numérique pour cette force, et comparer à la valeur annoncée. Conclure sur le modèle utilisé.

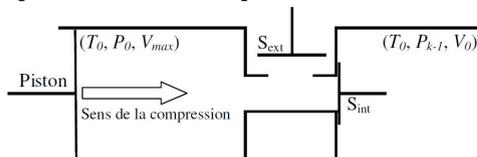
Problème II What else !

Dans une machine à café expresso, on fait circuler l'eau chaude à travers la poudre de café en jouant sur une différence de pression. La plupart des machines à café de ce type réalisent des pressions de 15 bar. On s'intéresse ici au principe d'une pompe à air permettant de comprimer l'air ambiant. La pompe est constituée de deux compartiments, le corps de la pompe de volume fixe V_0 dans lequel est stocké l'air sous pression et un piston qui, à chaque aller-retour, pousse de l'air issu de l'atmosphère extérieure dans le corps.

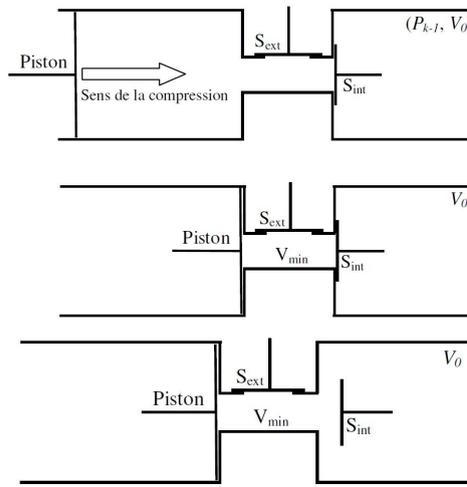
Toutes les transformations sont réalisées à température constante $\theta_0 = 20^\circ \text{C}$, et l'air est assimilé à un gaz parfait de masse molaire $M = 29 \text{ g.mol}^{-1}$ dont la pression dans l'atmosphère est de $P_0 = 10^5 \text{ Pa}$.

On peut décomposer le fonctionnement de la pompe selon une séquence de trois étapes :

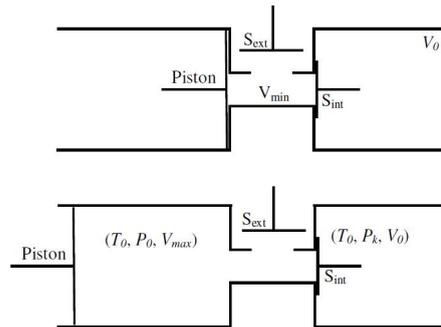
- La soupape interne S_{int} est fermée, la soupape externe S_{ext} est ouverte. La pression dans le corps de pompe, à l'issue du $(k - 1)$ ème coup de piston, est P_{k-1} , le volume V_{max} délimité par le piston est rempli d'air pris dans les conditions de pression de l'atmosphère extérieure.



- On ferme la soupape externe S_{ext} , le piston avance alors jusqu'à délimiter le volume minimal V_{min} indispensable au jeu des soupapes. On ouvre finalement la soupape interne S_{int} pour faire entrer l'air comprimé dans le corps de la pompe.



- On ferme la soupape interne S_{int} puis on ouvre la soupape externe S_{ext} , la pression dans le corps de pompe est maintenant P_k . Il reste à ramener le piston dans sa position initiale et le k ième coup de piston est terminé.



On désire analyser la mise en pression du corps de pompe.

1. Quelles sont les hypothèses vérifiées par un gaz parfait ? Comment peut-on savoir qu'un gaz se comporte comme un gaz parfait ?
2. Comment peut-on justifier que la masse molaire de l'air soit égale à 29 g.mol^{-1} ?
3. Déterminer la quantité de matière n_{k-1} présente dans le corps de pompe quand la soupape interne est encore fermée, c'est-à-dire au début de la séquence. On donnera le résultat en fonction de P_{k-1} , R , T_0 et V_0 le volume du corps de la pompe.
4. Déterminer la quantité de matière n_0 présente dans le volume délimité par le piston après avoir fermé la soupape externe et avant d'ouvrir la soupape interne.
5. En déduire la quantité d'air n_k dans le corps de la pompe à la fin de la séquence en fonction de n_0 , n_{k-1} , V_0 et V_{min} .
6. Montrer que la pression obéit à une relation de récurrence de la forme $P_k = \alpha P_{k-1} + \beta$. On déterminera α et β en fonction de P_0 , V_0 , V_{min} et V_{max} .
7. Exprimer la pression limite P_∞ que l'air peut atteindre dans le corps de pompe.
8. En déduire la valeur du rapport $\frac{V_{max}}{V_{min}}$ pour obtenir $P_\infty = 15 \text{ bar}$.

Problème III Étude d'une Locomotive Diesel

Le moteur des premières locomotives diesels fut inventé en 1892 par l'ingénieur allemand Rudolf Diesel. Mais ces premières locomotives furent un échec : le nombre de vitesses de leur transmission mécanique était insuffisant. La locomotive diesel électrique se passe de boîte de vitesse mécanique : elle est munie d'un moteur diesel qui, en tournant, entraîne un alternateur. Ce dernier fournit de l'énergie à plusieurs moteurs électriques de traction : en somme, cette locomotive fabrique grâce au moteur thermique sa propre électricité.

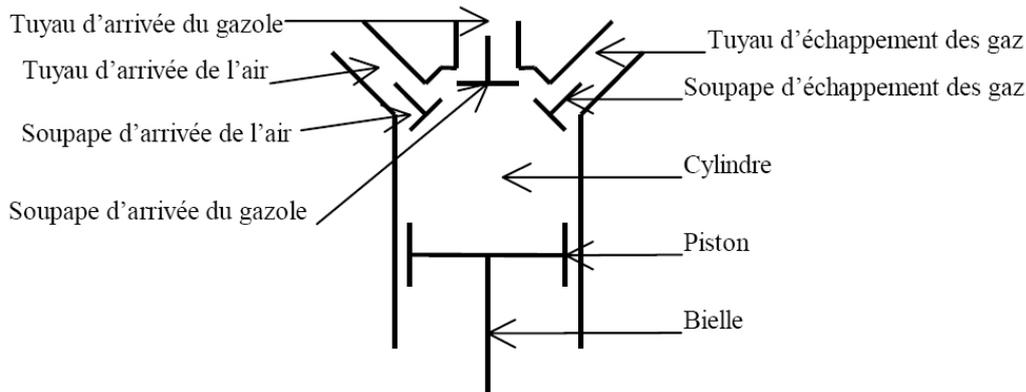
A Transformations d'un gaz parfait

On supposera que le gaz n'est soumis qu'aux forces de pression. On s'intéresse à une transformation de ce gaz parfait qui le fait passer de l'état initial de pression P_i et de volume V_i à l'état final de pression P_f et de volume V_f . On exprimera les réponses aux questions qui suivent, uniquement en fonction de P_i , V_i , P_f , V_f , et de γ .

- A.1** Exprimer le travail W_{isoV} échangé par ce gaz lors d'une transformation isochore réversible.
A.2 Exprimer le travail W_{isoP} échangé par ce gaz lors d'une transformation isobare réversible.

- A.3** Exprimer le transfert thermique Q_{isoV} échangé par ce gaz lors d'une transformation isochore réversible.
- A.4** Exprimer le transfert thermique Q_{isoP} échangé par ce gaz lors d'une transformation isobare réversible.
- A.5** Exprimer le transfert thermique Q_{isoS} échangé par ce gaz lors d'une transformation adiabatique réversible.
- A.6** Démontrer la loi de Laplace $P_i V_i^\gamma = P_f V_f^\gamma$ que suit le gaz parfait lors d'une transformation adiabatique réversible.

B États thermodynamiques successifs lors du cycle diesel :



On s'intéresse à un gaz parfait ($\gamma = 1,40$) dans un cylindre de volume variable, entre $V_{min} = 150 \text{ mL}$ et $V_{max} = 400 \text{ mL}$, fermé par un piston, qui subit un cycle réversible dont les caractéristiques sont :

- Admission : la soupape d'arrivée de l'air est ouverte (la pression est $P_{atm} = 1,00 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, la température $T_{atm} = 300 \text{ K}$), les autres fermées. Le volume passe de V_{min} à V_{max} de façon isobare et isotherme.
- $A \rightarrow B$: compression. Les soupapes sont fermées. Le volume passe de V_{max} à V_{min} de façon adiabatique et réversible.
- $B \rightarrow C$: injection. Les soupapes sont fermées, sauf celle d'injection du gazole. Le volume augmente jusqu'à $V_C = 250 \text{ mL}$, on modélise cette phase de combustion par une évolution isobare ($P = P_{max}$) au cours de laquelle le gaz reçoit un transfert thermique lié à l'injection de gazole.
- $C \rightarrow D$: détente. Les soupapes sont toutes fermées. Le volume augmente encore (jusqu'à V_{max}) mais la pression diminue (il s'agit d'une détente adiabatique et réversible).
- $D \rightarrow A$: ouverture de la soupape d'échappement des gaz. La pression diminue brutalement jusqu'à P_{atm} , le volume restant constant.
- Éjection des gaz : la soupape d'échappement des gaz est ouverte, les autres fermées. Le volume passe de V_{max} à V_{min} de façon isobare.

Déterminer numériquement (dans les unités du système international) les caractéristiques de chaque état thermodynamique intermédiaire (pression, température, volume) :

- B.1** en A : la pression P_A , le volume V_A , et la température T_A ;
- B.2** en B : la pression P_B , le volume V_B , et la température T_B ;
- B.3** en C : la pression P_C , le volume V_C , et la température T_C ;
- B.4** en D : la pression P_D , le volume V_D , et la température T_D .

C Transformations lors du cycle diesel :

Déterminer numériquement lors des phases :

- C.1** $A \rightarrow B$: le travail W_{AB} et la chaleur Q_{AB} échangés par le gaz parfait ;
- C.2** $B \rightarrow C$: le travail W_{BC} et la chaleur Q_{BC} échangés par le gaz parfait ;
- C.3** $C \rightarrow D$: le travail W_{CD} et la chaleur Q_{CD} échangés par le gaz parfait ;
- C.4** $D \rightarrow A$: le travail W_{DA} et la chaleur Q_{DA} échangés par le gaz parfait.

D Diagramme de Clapeyron du cycle diesel :

- D.1** Exprimer numériquement la somme des travaux échangés W_{tot} par le gaz parfait sur un cycle. Que penser de son signe ?
- D.2** Tracer le cycle $P = f(V)$ dans les coordonnées de Clapeyron.
- D.3** Dans quel sens est parcouru le cycle diesel dans le diagramme de Clapeyron ? Est-ce normal ?

E Rendement du moteur diesel :

E.1 Le rendement thermodynamique η correspond au rapport de ce que l'on souhaite sur ce que l'on dépense. Exprimer η en fonction des échanges énergétiques.

E.2 Calculer η .

E.3 La vitesse maximale de rotation est $N = 1,5 \cdot 10^3 \text{ tr/min}$, calculer la puissance maximale P_{moteur} de ce moteur diesel.

Problème IV Transformations d'une masse de dioxyde de soufre

Un piston idéal sans masse et sans frottement, d'aire A , peut se déplacer dans un cylindre d'axe vertical. L'ensemble est thermostaté et est maintenu à la température constante T_0 .

Dans ce récipient, de volume variable, est placée une masse m de dioxyde de soufre SO_2 (corps pur). À la température de l'expérience, la pression de vapeur saturante de ce corps pur est $P^*(T_0)$. Dans l'état initial, noté A, un opérateur maintient le piston à une distance H du fond du cylindre pour laquelle le corps pur SO_2 se présente à l'état de vapeur saturante : la vapeur $SO_{2(\text{vap})}$ est en équilibre avec une petite goutte de liquide $SO_{2(\text{liq})}$.

Hypothèses et données :

- la température de l'expérience est $T_0 = 263 \text{ K}$;
- le dioxyde de soufre vapeur (en équilibre avec le liquide peut être considéré comme un gaz parfait ;
- le volume de la phase liquide est négligé devant le volume de la phase vapeur ;
- M est la masse molaire du dioxyde de soufre : $M = 64 \cdot 10^{-3} \text{ kg.mol}^{-1}$;
- $P^*(T)$ est la pression de vapeur saturante du corps pur SO_2 à la température T : $P^*(T_0) = P^\circ = 1,00 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
- $\Delta_{\text{vap}}h(T)$ est l'enthalpie massique de vaporisation de SO_2 à la température T : $\Delta_{\text{vap}}h(T_0) = 4,00 \cdot 10^5 \text{ J.kg}^{-1}$
- R est la constante des gaz parfait $R = 8,31 \text{ J.mol}^{-1}\text{K}^{-1}$.

A Généralités

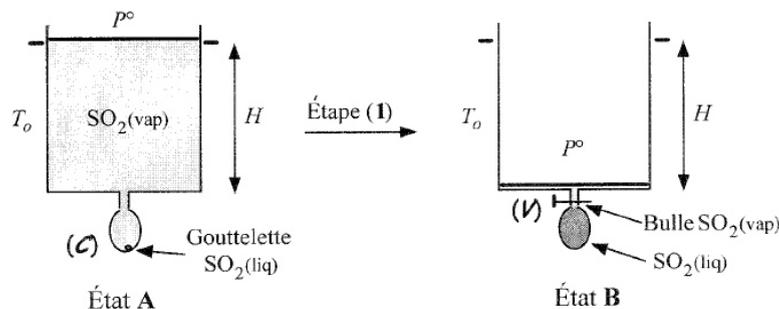
A.1 Dessiner l'allure du diagramme (P,T) d'équilibre du dioxyde de soufre. On fera apparaître sur ce diagramme les différentes phases ainsi que les points triple et critique dont on donnera la définition.

A.2 Tracer l'allure du diagramme de Clapeyron du dioxyde de soufre en définissant les divers domaines du diagramme ainsi que le nom des courbes. On se limitera aux zones correspondant au liquide et à la vapeur puis on placera une isotherme et le point critique.

A.3 Définir l'enthalpie massique de vaporisation du SO_2 à la température T .

B Étape A \rightarrow B

L'expérimentateur fait descendre lentement le piston, de manière quasi-statique jusqu'au fond du cylindre, afin que le corps pur se loge dans un petit conteneur, noté (C) de dimensions négligeables et relié au cylindre par un petit tube muni d'une vanne, notée (V). Cette dernière est alors fermée. Dans (C) le corps pur se présente sous forme de liquide saturant : $SO_{2(\text{liq})}$ est en équilibre avec une petite bulle de vapeur (état B).



Dans les questions qui suivent les expressions littérales devront être exprimées en fonction des données suivantes : m , A , H , $P^*(T_0)$, T_0 et $\Delta_{\text{vap}}h(T_0)$.

B.1 Exprimer le travail W_{AB} reçu par le corps pur.

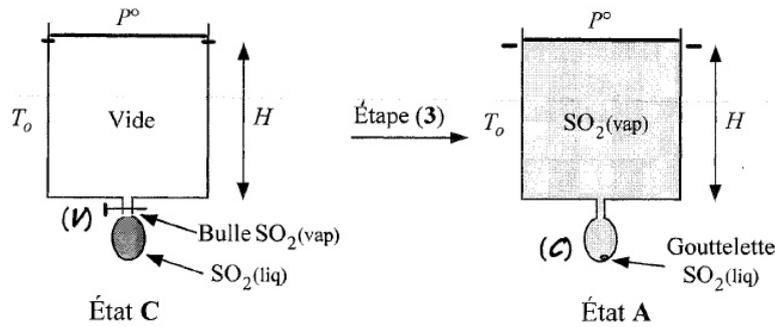
B.2 Exprimer puis calculer numériquement le transfert thermique Q_{AB} reçu par le corps pur. On prendra $A = 2,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$ et $H = 5,0 \cdot 10^{-1} \text{ m}$.

B.3 Exprimer la variation d'énergie interne ΔU_{AB} .

B.4 Calculer la variation d'entropie ΔS_{AB} du fluide. Cette transformation est-elle réversible ?

C Étapes $B \rightarrow C$ et $C \rightarrow A$

Lors de l'étape $B \rightarrow C$, la vanne (V) reste fermée. Le piston est remonté, puis fixé dans sa position initiale : le vide règne alors dans le cylindre (état C). Lors de l'étape $C \rightarrow A$, la vanne (V) est ouverte et le liquide se vaporise pratiquement instantanément : le corps pur se retrouve dans son état initial A .



- C.1 Le corps pur a-t-il subi une transformation au cours de la seconde étape $B \rightarrow C$.
 C.2 Évaluer le travail W_{CA} reçu par le corps pur pendant l'étape $C \rightarrow A$.
 C.3 Que vaut le transfert thermique Q_{CA} reçu par le corps pur ?

D Étude du cycle $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$

- D.1 Rappeler la variation de l'énergie interne ΔU et de la variation d'entropie ΔS du corps pur au cours du cycle.
 D.2 Calculer la variation d'entropie du thermostat ΔS_{th} au cours de ce cycle.
 D.3 A partir d'un calcul d'entropie judicieux, déterminer si ce cycle est réversible ou irréversible.

Problème V Air humide

L'air sec, de masse molaire \overline{M}_a , est constitué de diazote $N_{2(g)}$, de masse molaire M_{N_2} et de dioxygène $O_{2(g)}$ de masse molaire M_{O_2} (pour simplifier, la présence d'autres gaz rares est négligée).

L'air humide, noté **AH**, est un mélange de vapeur d'eau $H_2O_{(g)}$, de pression partielle p_e et d'air sec, de pression partielle p_a .

L'air est saturé en humidité lorsque la pression partielle p_e de vapeur d'eau devient égale à sa pression de vapeur saturante $P_e^*(T)$ à la température T considérée.

L'air humide non saturé, pour lequel $p_e < P_e^*(T)$, peut être décrit par les principaux paramètres suivants :

- le degré hygrométrique h défini par le rapport $h = \frac{p_e}{P_e^*(T)}$, rapport qui varie entre 0 et 1.
- l'humidité relative ε (en %) telle que $\varepsilon = 100h$.

Données et hypothèses de travail

- La vapeur d'eau ainsi que les gaz considérés dans cet exercice, se comportent comme des gaz parfaits de constante $R = 8,31 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$.
- Masses molaires : $\overline{M}_a = 28,9 \text{ g mol}^{-1}$, $M_{N_2} = 28 \text{ g mol}^{-1}$; $M_{O_2} = 32 \text{ g mol}^{-1}$; $M_{H_2O} = 18 \text{ g mol}^{-1}$.
- Capacité thermique massique, à pression constante, de l'eau à l'état de vapeur :
 $c_p = 1,50 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (constant en fonction de T).
- Fraction molaire x_i d'un composant i : rapport de la quantité de matière du composant i n_i et de la quantité de matière totale du mélange n_{tot} : $x_i = \frac{n_i}{n_{tot}}$.
- Pression de vapeur saturante $P_e^*(T)$ de l'eau à différentes températures :

T (K)	277	278	279	280	281	282	283	284	285
$P_e^*(T)$ (Pa)	813	872	935	1000	1070	1150	1230	1310	1400
T (K)	286	287	288	289	290	291	292	293	294
$P_e^*(T)$ (Pa)	1500	1600	1700	1820	1940	2060	2200	2340	2490

- Enthalpie massique $\Delta_{vap}h(T)$ de vaporiation de l'eau à différentes températures :

T (K)	278	283	293
$\Delta_{vap}h(T) \text{ J kg}^{-1}$	$2,49 \times 10^6$	$2,47 \times 10^6$	$2,45 \times 10^6$

A Généralités

- A.1 Déterminer la composition de l'air sec (sans vapeur d'eau) en calculant, numériquement, la fraction molaire x_{O_2} en dioxygène O_2 .

A.2 Rappeler la relation qui existe, dans l'air humide, entre la pression totale P_{tot} et les pressions partielles p_e et p_a .

A.3 Tracer l'allure du diagramme pression-température de l'eau. Indiquer sur ce diagramme les domaines associés aux phases en présence et définir soigneusement les deux points caractéristiques qui interviennent dans ce diagramme.

A.4 On appelle diagramme de Clapeyron le diagramme (p, v) où v représente le volume massique de l'eau. Tracer son allure dans le cas de l'eau. Donner le nom des deux parties de la courbe de saturation puis représenter une isotherme en justifiant dans les différents domaines l'allure de l'isotherme.

A.5 Décrire qualitativement le phénomène observé lorsque de la vapeur d'eau pure est ajoutée, à T et V constants, à un air saturé en humidité.

B Apparition de buée sur les vitres

Une salle de classe de volume constant $V_o = 200 \text{ m}^3$, est remplie d'air humide. Il est admis que, dans ce local, la masse totale d'eau $m_{e,\text{tot}}$ (eau vapeur et éventuellement liquide s'il s'y produit une liquéfaction) reste invariable. La température est maintenue uniforme et constante ($T_o = 293 \text{ K}$) à l'intérieur de toute la salle, sauf aux environs immédiats des surfaces vitrées intérieures des fenêtres où elle est égale à T_v . L'espace, où règne une température intermédiaire entre les valeurs T_o et T_v , est de volume négligeable.

Les pressions partielles p_e et p_a sont uniformes et constantes dans tout le local, y compris au niveau des fenêtres. La pression totale, constante, vaut $P_{\text{tot}} = 1,01 \times 10^5 \text{ Pa}$.

La température T_v diminue par refroidissement de l'atmosphère extérieure : de la buée (microgoutelette, résultat de la liquéfaction de la vapeur d'eau sur une surface froide) commence à apparaître sur les vitres, à l'intérieur de la pièce, lorsque la température T_v atteint la valeur $T_{v,1} = 283 \text{ K}$.

L'étude est envisagée à l'instant où la buée commence à apparaître sur les vitres : état **(1)**. On considère alors que la masse d'eau liquide dans la salle (donc le long des vitres) est encore négligeable : $m_{e,\text{liq}} \ll m_{e,\text{tot}}$.

B.1 Donner la valeur numérique de la pression partielle de l'eau $p_{e,1}$ dans l'air humide (AH) à l'état **(1)**.

B.2 On souhaite caractériser l'état **1** en adaptant le diagramme de Clapeyron de l'eau (corps pur) au cas présent :

B.2.1 Tracer le diagramme p_e en fonction de v . On tracera l'allure de l'isotherme $T_o = 293 \text{ K}$ et on repèrera $P^*(T_o)$.

B.2.2 Tracer l'allure de l'isotherme $T_{v,1}$ sur le diagramme précédent.

B.2.3 Repérer sur le diagramme le point B représentatif du corps pur eau, constituant de l'air humide dans la salle de classe.

B.2.4 Repérer le point C représentatif du corps pur eau sur la surface des vitres.

B.3 Calculer toujours pour l'état **1**, les paramètres de l'atmosphère **AH** suivants :

B.3.1 l'humidité relative ε_1 ;

B.3.2 la fraction molaire $x_{e,1}$ de l'eau dans l'air humide ;

B.3.3 la masse volumique $\rho_{\text{AH},1}$.

B.4 Calculer la masse $m_{e,\text{tot}}$.

C Évolution du système

À partir de l'état **(1)** précédent, un second refroidissement de l'atmosphère extérieure au local entraîne une diminution de la température des surfaces intérieures vitrées : T_v atteint la nouvelle valeur $T_{v,2} = 278 \text{ K}$. Il est admis que, dans la pièce, la pression P_{tot} et la température T_o demeurent inchangées.

C.1 Comment va évoluer la composition du système **AH**, après l'apparition des premières traces de buée ?

C.2 Quelle est, après un temps infini qui correspond à l'état **(2)**, la pression partielle finale $p_{e,2}$ de vapeur d'eau dans la salle de classe.

C.3 Entre les états **(1)** et **(2)**, calculer :

C.3.1 la masse m d'eau qui se liquéfie ;

C.3.2 la variation d'enthalpie ΔH_{1-2} de cette masse m .

Problème VI Hélium superfluide métastable

Dans ce problème, nous nous intéresserons à l'hélium 4 à basse température, que nous appellerons simplement hélium par la suite.

A Hélium liquide à basse température

Lorsque de l'hélium est refroidi en suivant la courbe de coexistence gaz-liquide, on observe une évolution rapide de sa capacité thermique massique à pression constante autour de la température $T_\lambda = 2,17$ K.

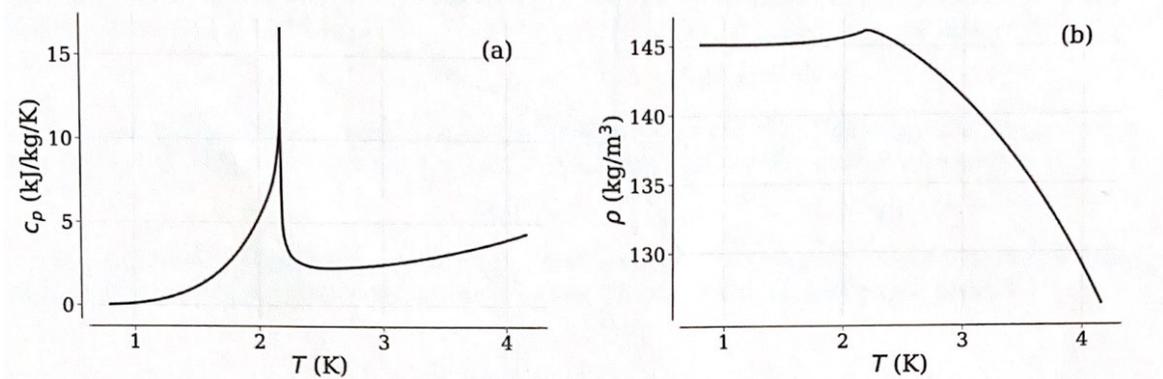
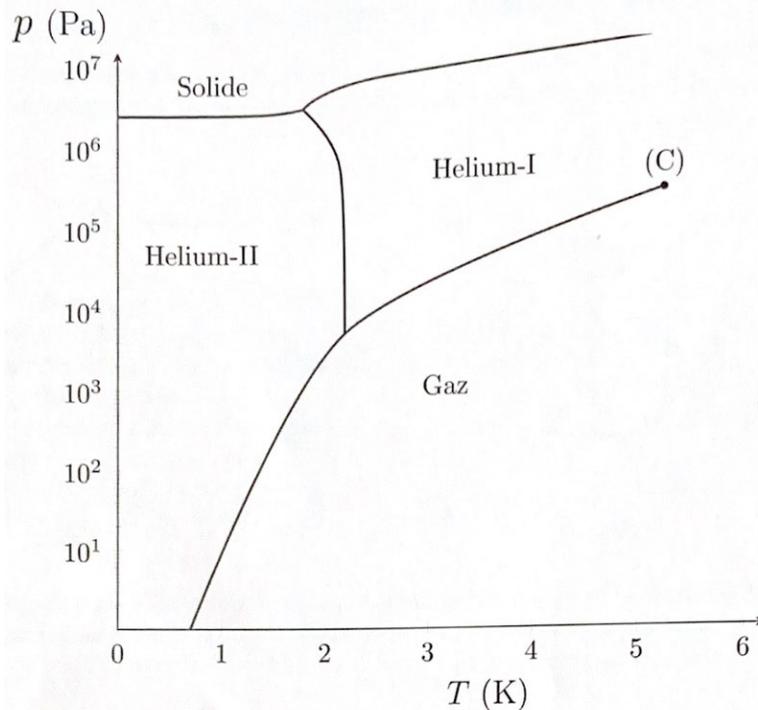


FIGURE 1 – (a) Évolution de la capacité thermique massique à pression constante c_p de l'hélium à la pression de vapeur saturante en fonction de la température T . (b) Évolution de la masse volumique ρ de l'hélium à la pression de vapeur saturante en fonction de la température T .

A.1 On refroidit une masse m d'hélium liquide à pression constante de $T = 5$ K à $T = 1$ K avec une puissance de refroidissement $\mathcal{P}_{th} < 0$ constante au cours du temps. Par application du premier principe, exprimer $\frac{dT}{dt}$ en fonction des données du problèmes. Donner l'allure de l'évolution temporelle de la température de l'hélium à partir de la courbe $c_p(T)$.

Cette évolution rapide de $c_p(T)$ est due à une transition de phase à la température T_λ (appelée transition λ à cause de la forme du pic de c_p proche de T_λ) d'une phase liquide I vers une phase liquide II, que l'on appelle aussi phase liquide « superfluide ». C'est une transition de phase sans chaleur latente, et à laquelle il n'y a pas de discontinuité de la masse volumique (voir Figure 1(b)).

Le diagramme d'état (p, T) de l'hélium est représenté ci-dessous.



A.2 Donner le diagramme (p, T) typique d'un corps pur en équilibre. Comparer avec celui de l'hélium. Que se passe-t-il lors du refroidissement d'un système le long de sa ligne de coexistence avec la phase gazeuse? Que se passe-t-il pour l'hélium?

B États métastables et pression négative

L'hélium liquide à basse température, a la caractéristique de pouvoir être obtenu avec une remarquable pureté. En effet à quelques kelvin, toute impureté éventuellement présente dans le liquide est gelée sur les parois ou sédimente au fond du contenant. On peut ainsi par filtrage obtenir un liquide extrêmement pur. Cela offre la possibilité d'étudier les états métastables de l'hélium liquide.

Il est possible d'étudier l'hélium liquide à des pressions p inférieures à sa pression de vapeur saturante p_{sat} . Les états métastable de l'hélium sont si robustes que l'on peut même atteindre des pressions négatives (des valeurs de $-p$ de l'ordre de plusieurs bars peuvent être obtenus!).

B.1 Quelle est l'interprétation microscopique de la pression pour un gaz parfait ? Peut-elle être négative pour un gaz parfait ?

Une pression négative ne peut être atteinte que dans des systèmes où il y a des interactions attractives entre les particules. Beaucoup de fluides peuvent être décrit par l'équation d'état de Van der Waals :

$$\left(p + a \frac{N^2}{V^2} \right) (V - Nb) = Nk_B T$$

où a et b sont deux constantes positives qui dépendent de la nature du fluide, N est le nombre de particules considérées, V le volume du fluide et k_B la constante de Boltzmann.

B.2 Pourquoi peut-on avoir $p < 0$ à basse température ? Donner en fonction de a , b et k_B la température T^* en dessous de laquelle la pression peut devenir négative.

Les systèmes à pression négatives ne sont pas de simple curiosités de laboratoires : il en existe dans la nature, c'est par exemple le cas de la sève dans les arbres.