

Description d'un système thermodynamique à l'équilibre

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'entraînement : *fiche n°18*

Savoir-faire

Savoir-faire 1 - Définir un système

Pour les trois dispositifs ci-dessous, identifier le système thermodynamique le plus naturel, la surface de contrôle qui le délimite, et le caractériser en termes d'échanges d'énergie.

- Bouteille de plongée ;
- Thermos de café ;
- Canalisation, dans laquelle s'écoule un fluide permettant de mettre en rotation une turbine.

Savoir-faire 2 - Savoir caractériser l'équilibre d'un système

On considère un gaz de pression P_i , température T_i et volume V_i contenu dans un récipient dont la paroi supérieure n'a pas de masse et est mobile.

- On laisse le système longtemps dans une pièce à la température T_0 et à la pression P_0 atmosphérique. Quel est l'état final du système EF_1 ?
- On ajoute une masse m sur la paroi mobile. Le système évolue-t-il ? Si oui, déterminer les paramètres d'état du système à l'état final EF_2 .
- On retire la masse. Le système évolue-t-il ? Si oui, déterminer les paramètres d'état du système à l'état final. Que peut-on dire des paramètres d'état ?

Savoir-faire 3 - Déterminer une variation d'énergie

- Déterminer la variation d'énergie interne d'un litre d'eau liquide passant de 0 à 100°C.
- Comparer à celle d'un litre d'eau solide passant de -100 à 0°C et à celle d'un litre d'eau vapeur passant de 100 à 200°C.

Données :

- Capacité thermique massique de l'eau liquide $c_{v,liq} = 4,18 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$.
- Capacité thermique massique de l'eau solide $c_{v,sol} = 2,06 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$.
- Masse volumique glace $\rho_{glace} = 0,92 \text{ kg.L}^{-1}$.
- Capacité thermique massique de l'eau vapeur $c_{v,gaz} = 2,01 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$.
- Masse volumique vapeur d'eau à 100°C $\rho_{vapeur} = 0,6.10^{-3} \text{ kg.L}^{-1}$.

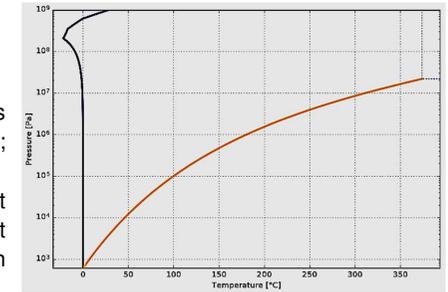
Savoir-faire 4 - Connaître des ordres de grandeur de volumes molaires et massiques

- Exprimer le volume massique et le volume molaire en fonction de la masse volumique et de la masse molaire.
- Faire les applications numériques pour l'eau et le fer.

Données pour le fer : $M(\text{Fe}) = 55, 8 \text{ g.mol}^{-1}$ et $\rho(\text{Fe}) = 7800 \text{ kg.m}^{-3}$.

Savoir-faire 5 – Exploiter un diagramme p-T

On considère le diagramme p-T de l'eau ci-contre. Le reproduire grossièrement sur votre feuille pour répondre aux questions suivantes.



- Compléter le diagramme avec chacune des phases solide, liquide, gaz, fluide supercritique ; indiquer le point triple et le point critique.
- Quelle est l'unique température à laquelle peut avoir lieu à l'équilibre un changement d'état liquide-vapeur sous 10^5 Pa ? Ceci est-il en accord avec votre expérience quotidienne ?
- Quelle est l'unique pression à laquelle peut avoir lieu à l'équilibre un changement d'état liquide-vapeur à 300 °C ?
- On réalise l'expérience suivante : on chauffe de l'eau initialement à 20 °C et 1 bar dans une casserole, jusqu'à ébullition. Tracer l'évolution dans le diagramme p-T.
- Même question pour l'expérience suivante : on place de l'eau initialement à 20 °C et 1 bar dans un congélateur à -18 °C, et on attend plusieurs heures.

Savoir-faire 6 – Exploiter un diagramme de Clapeyron

À l'aide du diagramme ci-dessous, répondre aux questions suivantes :

- Identifier les zones où l'eau est sous phase liquide, gaz, ou diphasée.
- Quelle est la valeur du volume massique de la vapeur saturée à la pression de 100 bar ? En déduire la valeur de la masse volumique correspondante. Même question pour le liquide saturé à la pression de 100 bar.
- Que vaut la température de saturation (ou d'équilibre liquide-vapeur) sous $P = 40 \text{ bar}$?
- Que vaut la pression de saturation (ou d'équilibre liquide-vapeur) à 150 °C ?
- Donner la composition du système aux points A, B et D.

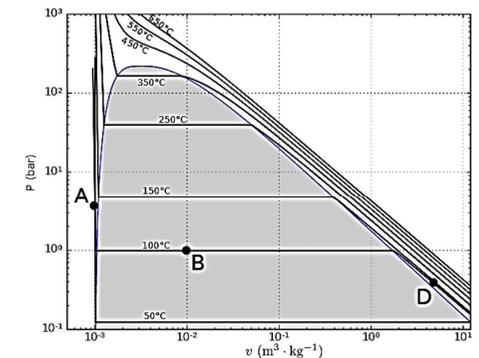
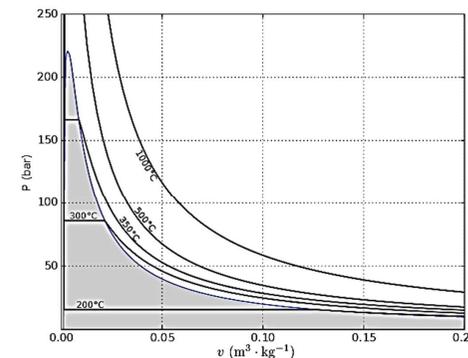
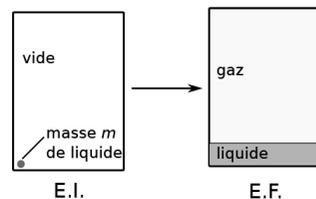


Diagramme de Clapeyron pour l'eau, à gauche échelle linéaire, à droite échelle log-log.

Savoir-faire 7 – Déterminer la composition d'un mélange liquide-vapeur

On place $m = 10$ g d'eau liquide dans une enceinte de volume $V = 10$ L initialement sous vide. Tout se passe au contact d'un thermostat à 100 °C. On donne le volume massique du liquide saturé à 100 °C $v_\ell = 1,04 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, et celui de la vapeur saturée à 100 °C $v_v = 1,673 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$.



- Q1. Exprimer x_ℓ et x_v dans l'état final en fonction de m , V , v_ℓ et v_v .
- Q2. Reprendre la question dans le cas où initialement $m = 1,0$ g.

Exercices incontournables

Exercice 1 : Pression des pneus (★ ★ ★)

La pression préconisée sur les roues avant d'une voiture est de 2,2 bar (attention, cela dépend du modèle). Cette indication concerne en réalité ce qu'on appelle la pression relative P_{rel} , la pression absolue P étant donnée par $P = P_{rel} + P_{atm}$ avec $P_{atm} = 1,0$ bar.

J'ai réglé la pression des pneus de ma voiture un jour froid cet hiver, par une température extérieure de -5 °C.

- Q1. En supposant que le volume des pneus varie de façon négligeable et qu'il n'y a aucune fuite d'air possible, que vaudra la pression (absolue) des pneus un jour chaud cet été, par une température extérieure de 30 °C ? Et la pression relative qu'indiquerait un manomètre ? Commentaire ?

Exercice 2 : Fuite d'hélium (★ ★ ★)

On considère une bouteille de volume constant $V = 10$ L contenant de l'hélium, modélisé comme un gaz parfait monoatomique, à la pression $P = 2,1$ bar et à la température $T = 300$ K.

Données :

Masse molaire de l'hélium $M = 4,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, constante de Boltzmann $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$.

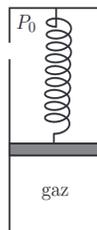
- Q1. Calculer la masse m d'hélium contenue dans la bouteille et la densité particulière n^* , c'est-à-dire le nombre d'atomes par unité de volume.
- Q2. Calculer la vitesse quadratique moyenne des atomes.
- Q3. À la suite de l'ouverture de la bouteille, la pression passe à $P' = 1,4$ bar et la température à $T' = 290$ K. Calculer la masse Δm de gaz qui s'est échappé de la bouteille.
- Q4. À quelle température T'' faudrait-il porter le gaz pour atteindre à nouveau la pression P ?

Exercice 3 : Équilibre d'un gaz (★ ★ ★)

Considérons le système représenté sur la figure suivante à l'équilibre thermodynamique. Le piston est libre de se déplacer sans frottement.

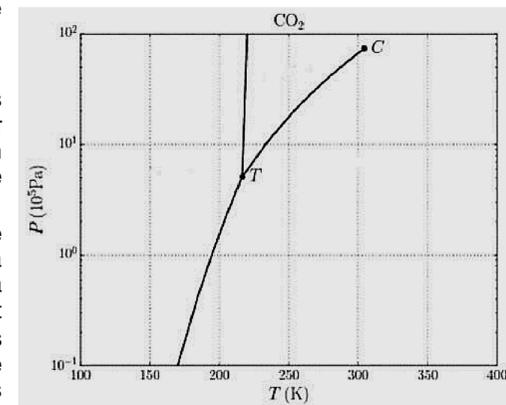
La masse du piston m_p est de $4,0$ kg et sa section S de 35 cm^2 . De plus, le ressort de raideur $k = 6,0 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ est comprimé de $b = 1,0$ cm.

- Q1. Sachant que la pression atmosphérique ambiante P_0 est de $0,95$ bar, déterminer la pression au sein du gaz.



Exercice 4 : Utilisation d'un diagramme P-T (★ ★ ★)

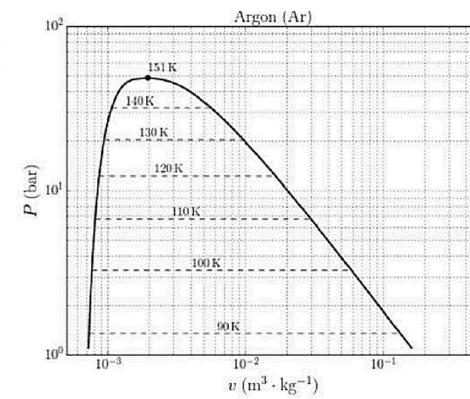
La figure ci-contre montre le diagramme (P, T) du dioxyde de carbone.



- Q1. Placer les phases sur le diagramme.
- Q2. On se place dans les conditions initiales suivantes $T_i = 250$ K, $P_i = 10$ bar. Placer ce point dans le diagramme (P, T) et en déduire dans quelle phase se trouve le dioxyde de carbone dans l'état initial.
- Q3. Partant de cet état, on comprime lentement le dioxyde de carbone à température constante, pour terminer à la pression $P_f = 50$ bar. Placer le point final sur le graphe, en déduire dans quelle phase se trouve le dioxyde de carbone dans l'état final. Décrire alors les différentes étapes de cette compression.
- Q4. Tracer l'allure du graphe qui représente la pression du CO2 en fonction du temps.
- Q5. Faire la même analyse si à la place d'une compression isotherme, on réalise un refroidissement lent à pression constante amenant le CO2 dans l'état final $T_{f0} = 200$ K, $P_{f0} = 10$ bar. On tracera cette fois l'évolution de la température avec le temps.

Exercice 5 : Utilisation d'un diagramme P-V (★ ★ ★)

On considère une masse $m = 1,0$ kg d'argon enfermée dans une enceinte indéformable de volume $V_0 = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$, à la température $T_i = 90$ K. La figure ci-dessous montre le diagramme de Clapeyron de l'argon, de masse molaire $M(Ar) = 40 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.



- Q1. Indiquer sur ce diagramme les zones correspondant à l'argon liquide, gazeux, et diphasé.
- Q2. Compléter ce diagramme en traçant l'allure des isothermes $T = 90$ K et $T = 120$ K.
- Q3. Placer sur le graphe le point I correspondant aux conditions de température et de volume données ci-dessus. En déduire la fraction massique $x_{l,\ell}$ en argon liquide présent initialement dans l'enceinte, ainsi que la pression de vapeur saturante de l'argon à 90 K.
- Q4. On chauffe à présent l'enceinte jusqu'à la température de 120 K. Indiquer sur le graphe la position du point final F , et le chemin suivi pour aller de I à F . Déterminer la fraction massique $x_{F,\ell}$ en argon liquide présent dans l'enceinte dans l'état final, ainsi que la valeur de la pression de vapeur saturante de l'argon à 120 K. Le mélange s'est-il appauvri ou enrichi en liquide ?
- Q5. Déduire du graphe la température minimale à imposer à l'enceinte pour que l'argon soit entièrement sous forme gazeuse. À quelle pression correspond-elle ?

Exercice 1 : Équilibre d'un piston (★★★)

Un récipient aux parois diathermane (qui autorisent les échanges thermiques) est fermé par un piston lui-même diathermane, dont la masse sera négligée. Le récipient contient une mole d'eau dont la fraction en vapeur sera considérée comme un gaz parfait.

À l'état initial d'équilibre, le piston est bloqué de telle sorte que le volume du récipient soit égal à $V_i = 0,10 \text{ m}^3$. On note T_i, P_i respectivement la température initiale et la pression initiale de l'eau dans le récipient.

La température et la pression extérieures valent respectivement $T_0 = 373 \text{ K}$ et $P_0 = 1,01 \text{ bar}$.

Le piston est lâché à l'instant $t = 0$, puis bloqué de telle sorte que le volume du récipient soit égal à $V_f = 0,010 \text{ m}^3$.

On note P_f, T_f respectivement la pression et la température finales de l'eau dans le récipient.

Q1. Dans quel état se trouve initialement l'eau ?

Q2. Montrer que l'eau est sous deux phases à l'état final et calculer la fraction molaire en vapeur d'eau.

Données de la vapeur saturée		
T (°C)	P (bar)	ν'' ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)
70	0,31	5,1
100	1,01	1,7

Le volume massique ν' de l'eau liquide saturant sera pris égal à $1,0 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$ aux deux températures envisagées.