

Fluides réels, phases condensées et changements d'états

1. Échauffement isochore de l'eau liquide On donne un extrait d'une table thermodynamique indiquant le volume massique (en m^3/kg) en fonction de la pression en MPa (horizontal) et de la température en $^{\circ}\text{C}$ (vertical).

	5	10	15	20	30	50
0	0,0009977	0,0009952	0,0009928	0,0009904	0,0009856	0,0009766
20	0,0009995	0,0009972	0,0009950	0,0009928	0,0009886	0,0009804
40	0,0010056	0,0010034	0,0010013	0,0009992	0,0009951	0,0009872
60	0,0010149	0,0010127	0,0010105	0,0010084	0,0010042	0,0009962
80	0,0010268	0,0010245	0,0010222	0,0010199	0,0010156	0,0010073
100	0,0010410	0,0010385	0,0010361	0,0010337	0,0010290	0,0010201
120	0,0010576	0,0010549	0,0010522	0,0010496	0,0010445	0,0010348
140	0,0010768	0,0010737	0,0010707	0,0010678	0,0010621	0,0010515
160	0,0010988	0,0010953	0,0010918	0,0010885	0,0010821	0,0010703
180	0,0011240	0,0011199	0,0011159	0,0011120	0,0011047	0,0010912
200	0,0011530	0,0011480	0,0011433	0,0011388	0,0011302	0,0011146

À 0°C , le volume massique de l'eau est de $1,000 \text{ dm}^3/\text{kg}$. On remplit totalement d'eau un récipient métallique de volume constant $V_0 = 1 \text{ dm}^3$ à la température $T_0 = 0^{\circ}\text{C}$ et sous la pression $P_0 = 0,1 \text{ MPa}$.

1. Quelle est la pression lorsque la température atteint $T_1 = 40^{\circ}\text{C}$?
2. Quelle est la température de l'eau lorsque la pression atteint $P_2 = 500 \text{ bar}$?
3. Mêmes questions avec un gaz parfait à la place de l'eau.

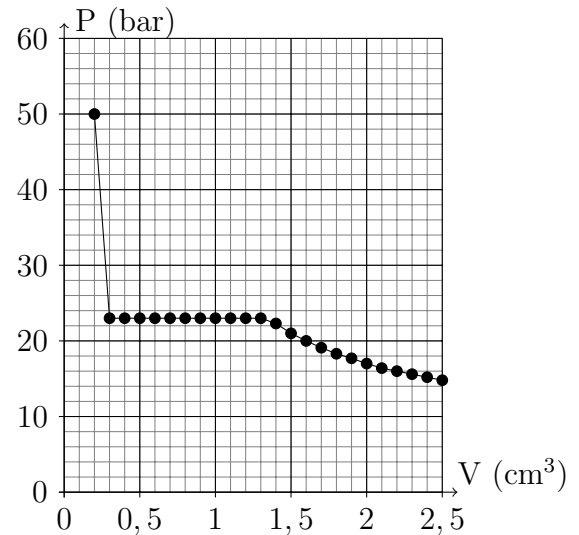
2. Application directe à partir des tables thermodynamique de l'eau*

1. Déterminer :
 - (a) la pression de vapeur saturante de l'eau à 160°C ;
 - (b) les volumes massiques du liquide saturant et de la vapeur saturante à 160°C .
2. Indiquer, en le justifiant (1 ligne) si l'eau, dans chacun des cas suivants, est à l'état de liquide comprimé, de vapeur surchauffée ou correspond à un équilibre liquide/vapeur :
 - (a) $60^{\circ}\text{C}/0,15 \text{ bar}$
 - (b) $250^{\circ}\text{C}/50 \text{ bar}$
 - (c) $4 \text{ bar}/100^{\circ}\text{C}$
 - (d) $200^{\circ}\text{C}/0,05 \text{ m}^3/\text{kg}$
 - (e) $300^{\circ}\text{C}/0,03 \text{ m}^3/\text{kg}$
 - (f) $100 \text{ bar}/0,0013 \text{ m}^3/\text{kg}$
3. Calculer le volume massique d'une masse d'eau ayant un titre en vapeur de 70% à 200°C .
4. Calculer les masses et les volumes d'eau liquide et de vapeur d'eau (en équilibre) contenus dans un récipient de $0,4 \text{ m}^3$ sachant que la masse totale d'eau est de 2 kg et que la pression est de 6 bar.

3. Ébullition de l'eau, aspects qualitatifs

1. De l'eau qui bout à 70°C dans une casserole ouverte, c'est possible...
 - (a) au fond des océans
 - (b) en haut du Mont Blanc
 - (c) en haut de l'Everest
 - (d) ce n'est pas **possible**.
2. Une casserole remplie d'eau se met à bouillir en 5 minutes. Au bout de combien de temps, l'évaporation sera-t-elle totale?

4. Isothermes expérimentales de SF₆ Le graphe ci-contre est l'isotherme de l'équilibre liquide vapeur de SF₆ pour T₀ = 27°C. La pression est en bar et le volume en cm³.



1. En supposant que la vapeur sèche est un gaz parfait, évaluez la quantité de matière de SF₆ étudiée. En déduire la masse correspondante.
2. À partir du graphe, déterminez le volume massique de la vapeur juste saturante, puis celui du liquide juste saturant.
3. Quel est le titre massique si le volume vaut 1 cm³?
4. Inversement quel est le volume si le titre massique du liquide vaut 0,4?

5. Pièce humide On appelle «humidité relative» ou «degré hygrométrique» d'une atmosphère le rapport de la pression partielle de la vapeur d'eau à la pression de vapeur saturante de l'eau à la même température. Calculer la masse d'eau contenue dans l'air d'une pièce de 5,0 m × 4,0 m × 3,0 m à 20°C avec un degré hygrométrique de 80%. À 20°C, P_s(H₂O) = 1,75 cmHg = 2,33 kPa.

6. Séchoir* Un volume de 60 m³ d'air, dont l'humidité relative est de 80% à 24,5°C, est entièrement séché, après son passage dans un séchoir. Quelle est la masse d'eau prélevée?

On donne : La masse molaire d'eau vapeur M = 18 g/mol et la pression de saturation de H₂O à cette température 3073 Pa

7. QCM Humidité*

1. Le modèle des gaz parfaits n'est plus valable approximativement pour une pression :
(a) < 1 bar (b) < 5 bar (c) > 5 bar (d) > 50 bar
2. Les nuages sont formés de vapeur d'eau : Vrai ou Faux?
3. Le domaine d'existence d'un équilibre liquide ↔ solide ↔ vapeur s'appelle :
(a) le point critique (b) le point triple (c) le point de sublimation
4. Il est possible de passer directement un corps d'une phase solide à une phase gazeuse sans passer par une phase liquide : Vrai ou Faux?
5. La pression de vapeur saturante est la pression minimale que peut présenter un gaz : Richtig oder Falsch?
6. Lors d'une vaporisation isobare, la température reste toujours constante : Vrai ou Faux?
7. Lors d'une vaporisation isochore, la pression reste toujours constante : Right or Wrong?
8. Le titre massique d'un mélange liquide + vapeur est le rapport de la masse de vapeur sur la masse de liquide du mélange : Vrai ou Faux?

8. Interpolations linéaires À partir des tables fournies en cours,

1. Déterminer le volume massique de la vapeur d'eau à 435°C sous 250 bar.
2. Déterminer la pression de la vapeur d'eau de volume massique 1,50 m³.kg⁻¹ à 250°C.
3. Déterminer la pression de la vapeur d'eau de volume massique 0,0273 m³.kg⁻¹ à 400°C.
4. Déterminer la pression de la vapeur d'eau de volume massique 0,015 m³.kg⁻¹ à 420°C.

9. Marmite sous pression* Une marmite sous pression, de volume 10 L, est remplie à la température $T_0 = 20^\circ\text{C}$ d'une masse d'eau m et d'air, sous pression normale $P_0 = 1$ bar. On la ferme et on porte sa température à $T_1 = 120^\circ\text{C}$. Déterminer dans les deux cas suivants, la pression à l'intérieur de la marmite : $m = 6,0$ g puis $m = 12$ g. La pression de vapeur saturante de l'eau, dans le domaine $100^\circ\text{C} < T < 200^\circ\text{C}$ vaut (formule de Duperray) $P_v = (T/100)^4$ avec T en $^\circ\text{C}$ et P_v en bar. La vapeur d'eau sèche se comporte comme un gaz parfait. On néglige le volume de l'eau liquide.

10. Ébullition de l'eau, aspects quantitatifs*

1. Déterminer l'expression de la pression en fonction de l'altitude dans le modèle de l'atmosphère isotherme. A.N. Déterminer la pression de l'air au sommet du Mont Blanc ($4,807 \cdot 10^3$ m) si $\theta_0 = 15^\circ\text{C}$.
2. La pression de vapeur saturante de l'eau est donnée approximativement par la formule de Rankine : $\log_{10}(P_{\text{vap}}) = A - B/T$. Commenter l'évolution de P_{vap} avec la température. On donne à 52°C , $P_{\text{vap}} = 0,13$ bar. Déterminer la température d'ébullition de l'eau au sommet du Mont Blanc.

11. Titre en vapeur pour équilibre éventuel* Une masse $m = 200$ g de fréon est introduite dans un récipient indilatable de volume V , initialement vide. Le tout est placé dans un thermostat à la température de 0°C . Calculer la masse de vapeur de fréon pour les valeurs suivantes du volume : $V = 5,0$ L ; $V = 10$ L ; $V = 15$ L.

Données : À 0°C , la pression de vapeur saturante du fréon est $P_s = 3,1$ bar. Le volume massique du liquide saturant est $\nu_\ell = 0,70$ L.kg $^{-1}$ et celui de la vapeur saturante est $\nu_v = 55,4$ L.kg $^{-1}$.

12. Pression au fond de l'océan** On suppose que l'eau d'un océan est à température uniforme $T = 280$ K et qu'elle est faiblement compressible, avec un coefficient de compressibilité isotherme constant :

$$\chi_T = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T = 5 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$$

1. Établir l'expression de la masse volumique μ en fonction de la pression P , de χ_T et des valeurs $P_0 = 1$ bar et $\mu_0 = 10^3$ kg.m $^{-3}$ à la surface.
2. Déterminer le champ de pression $P(h)$ en fonction de la profondeur h mesurée à partir de la surface. Calculer $\varepsilon = \mu_0 g h \chi_T$ et faire un développement limité de $\Delta P = P(h) - (P_0 + \mu_0 g h)$ à l'ordre le plus bas non nul en ε . En déduire l'erreur relative commise sur l'évaluation de la pression à une profondeur $h = 10^4$ m lorsqu'on adopte le modèle du fluide incompressible.

13. Sprinklers : analyse document technique** « Les sprinklers (n.m. français) à pulvérisation comportant une ampoule de 5 mm de diamètre et présentant une réponse standard et une couverture normale. Ils sont conçus pour être utilisés dans des bâtiments commerciaux à risques faibles, courants ou très dangereux, tels que des banques, des hôtels, des centres commerciaux, des usines, des raffineries, des usines de produits chimiques, etc. L'ampoule en verre contient un liquide qui s'étend lorsqu'il est exposé à la chaleur. Une fois la température de fonctionnement atteinte, ce liquide s'étend suffisamment pour briser l'ampoule, ce qui déclenche le sprinkleur et le débit d'eau. L'ampoule est calibrée pour se briser à la pression de 150 bar.....N'installez aucun sprinkleur à ampoule si l'ampoule est fissurée ou s'il y a une perte de liquide. Lorsque vous tenez le sprinkleur horizontalement, vous devez voir une petite bulle d'air. Pour un détecteur qui déclenche à 68°C , le diamètre de cette bulle est d'environ 1,6 mm à température ambiante. Lorsque l'ampoule est portée à 57°C cette bulle de gaz disparaît. Pour un détecteur qui déclenche à 190°C , le diamètre de la bulle est de 2,4 mm ; elle disparaît à 182°C . Chaque ampoule est ainsi testée individuellement....»

Commentez ces éléments d'une documentation technique de déclencheurs d'arrosage automatique en cas d'incendie en plaçant les divers données sur un diagramme thermodynamique (V, P).

14. Transformations isothermes de la vapeur d'eau* On utilisera les tables fournies en cours pour résoudre cet exercice.

- Un cylindre muni d'un piston à un volume de 15,0 litres et contient 750 g de vapeur d'eau à une pression de 125 bars.
 - Déterminer la température à laquelle ces conditions sont réalisées.
 - On désire ramener la pression de cette vapeur d'eau à une valeur de 25 bars, tout en maintenant la température constante. Quel sera le volume occupé par la vapeur d'eau?
 - Évaluer l'erreur sur le volume (en %) que l'on ferait en utilisant le modèle des gaz parfaits.
- Dans un réservoir, on comprime de façon isotherme de la vapeur d'eau à partir des conditions suivantes : $V_1 = 100$ litres, $P_1 = 10$ bars et $\theta_1 = 250^\circ\text{C}$.
 - Quelle masse de vapeur y a-t-il dans le réservoir?
 - Quelle est la pression dans le réservoir lorsque le volume n'est plus que de 37 litres?

15. Transformations successives d'un gaz réel** On utilisera les tables fournies en cours pour résoudre cet exercice.

On considère un récipient fermé par un piston contenant de la vapeur d'eau considérée comme un gaz réel. Au départ (état initial A), la vapeur d'eau est à une pression $P_1 = 4$ bar, une température $\theta_1 = 150^\circ\text{C}$ et occupe un volume $V_1 = 2$ litres. Elle subit les trois transformations successives suivantes :

- un chauffage (A_1A_2) à pression constante (4 bar) portant sa température à $\theta_2 = 900^\circ\text{C}$;
- une compression (A_2A_3) à température constante (900°C) portant sa pression à $P_3 = 25$ bar;
- un refroidissement (A_3A_4) à volume constant ramenant sa pression à $P_4 = 10$ bar.

Déterminer, grâce aux tables thermodynamiques :

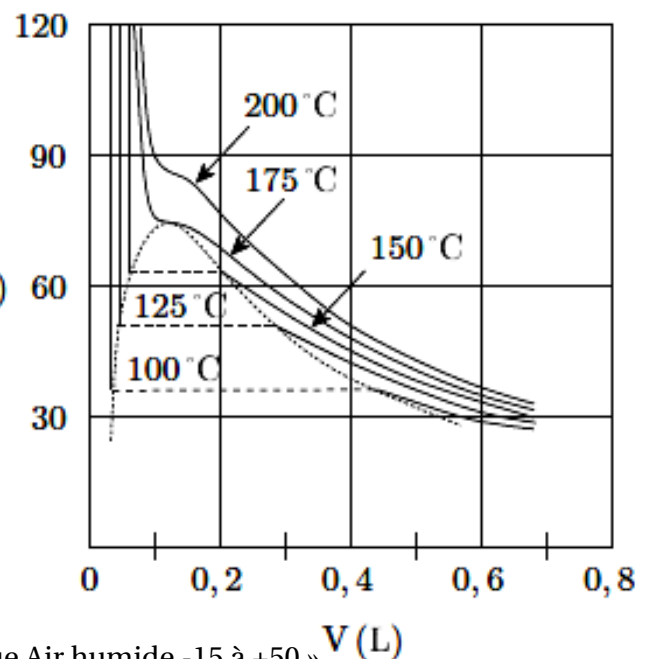
- La masse m de vapeur d'eau dans le récipient;
- Le volume V_2 occupé par la vapeur d'eau à la fin du chauffage A_1A_2 ;
- Le volume V_3 occupé par la vapeur d'eau à la fin de la compression A_2A_3 ;
- La température θ_4 de la vapeur d'eau à la fin du refroidissement A_3A_4 .

16. Lecture des isothermes d'Andrews* La figure suivante représente un ensemble de courbes expérimentales, appelées isothermes d'Andrews (Tracés dans le diagramme de Clapeyron) représentant la pression P d'une mole d'un fluide en fonction du volume V occupé, pour différentes températures.

- Donnez les coordonnées (P_C, V_C) du point critique C .
- Préciser l'état physique du fluide et calculer les titres molaires x_v , et x_ℓ de la vapeur et du liquide pour :

(a) 110 bar/200°C (b) 110 bar/200°C (c) 0,2 L/125°C

- Que vaut le volume molaire de la vapeur saturante sèche à la pression de 40 bar?



17. Hygrométrie : lecture d'un abaque*

Cet exercice exploite le fichier « diagramme psychrométrique Air humide -15 à +50 »

- L'air est à 15°C , l'hygrométrie est de 45%. Quelle est l'humidité absolue?
- L'air est à 12°C , l'hygrométrie est de 50%. Quelle sera l'humidité relative à 20°C ?
- À 19°C , l'humidité relative est de 60%. Que se passera-t-il, lors d'un refroidissement nocturne, à 5°C ?

18. Masse de vapeur* Dans un récipient de volume V initialement vide, on introduit une masse m d'un corps pur. Le système est maintenu à la température T à laquelle la pression de vapeur saturante du corps pur est P_s , le volume massique du liquide ν_ℓ et celui de la vapeur saturante ν_s . À l'équilibre, la masse m_s de vapeur est, lorsque les deux phases coexistent,

$$m_s = \frac{V - m \nu_\ell}{\nu_\ell - \nu_s} \quad m_s = \frac{V - m \nu_s}{\nu_\ell + \nu_s} \quad m_s = \frac{m \nu_s}{\nu_\ell - \nu_s} \quad \text{ou} \quad m_s = \frac{\nu_s}{\nu_\ell} \frac{V}{\nu_\ell - \nu_s}$$

19. Richtig oder Falsch?*

1. Les frontières entre phases sont toutes croissantes dans le diagramme d'état de l'eau.
2. La courbe d'ébullition est l'ensemble des points des isothermes d'Andrews où la vapeur est en équilibre avec le liquide.
3. Un changement d'état s'effectue à pression et température constantes et la variation d'énergie interne est nulle.
4. La pression de vapeur saturante d'un corps pur ne dépend pas de la température.
5. Le passage de l'état vapeur à l'état liquide s'appelle la condensation.
6. Un échauffement isobare d'un corps pur s'accompagne toujours des changements de phase successifs : solide→liquide→vapeur.
7. La compression isotherme d'un gaz peut conduire directement à un solide.
8. La sublimation est la transformation directe
 - (a) du solide en vapeur
 - (b) du solide en liquide
 - (c) du liquide en vapeur
 - (d) de la vapeur en solide
 - (e) de la vapeur en liquide

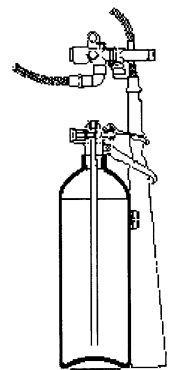
20. Détecteur d'incendie** Une petite quantité d'eau liquide, sous une pression et à une température homogènes, présente des coefficients de dilatation isobare et de compressibilité isotherme constants dans le domaine de température et de pression que l'on envisage dans la suite : $\alpha_{\text{eau}} = 3,0 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ et $\chi_{\text{Teau}} = 5,0 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$. Son volume massique, à la température $T_0 = 293 \text{ K}$ et sous la pression $P_0 = 1,0 \text{ bar}$, vaut $\nu_0 = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$.

1. En remarquant que le volume massique de l'eau liquide varie très peu en fonction de la pression et de la température, calculer sa valeur à $T_0 = 293 \text{ K}$ et sous $P = 1,0 \cdot 10^3 \text{ bar}$. Donner une expression approchée du volume massique en fonction de la température et de la pression.
2. L'eau étudiée est enfermée dans un récipient métallique de volume constant qu'elle remplit totalement, à la température T_0 et sous la pression P_0 . Un incendie chauffe le récipient jusqu'à une température $T_2 = 586 \text{ K}$. Calculer la pression P_2 correspondante et commenter. Quelle aurait été la pression P'_2 avec un gaz parfait à la place de l'eau?
3. Des dispositifs de protection automatique contre l'incendie utilisent cette propriété. Une ampoule en verre de silice est remplie d'éthanol de sorte que sous un bar et à 67°C l'ampoule soit entièrement occupée par le liquide. Si la température atteint 68°C , elle se brise en libérant la vanne d'une conduite d'eau sous pression. Quel est l'avantage de l'éthanol sur l'eau dans ce dispositif? On donne $\alpha_{\text{éthanol}} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ et $\chi_{\text{T,éthanol}} = 1,0 \cdot 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$

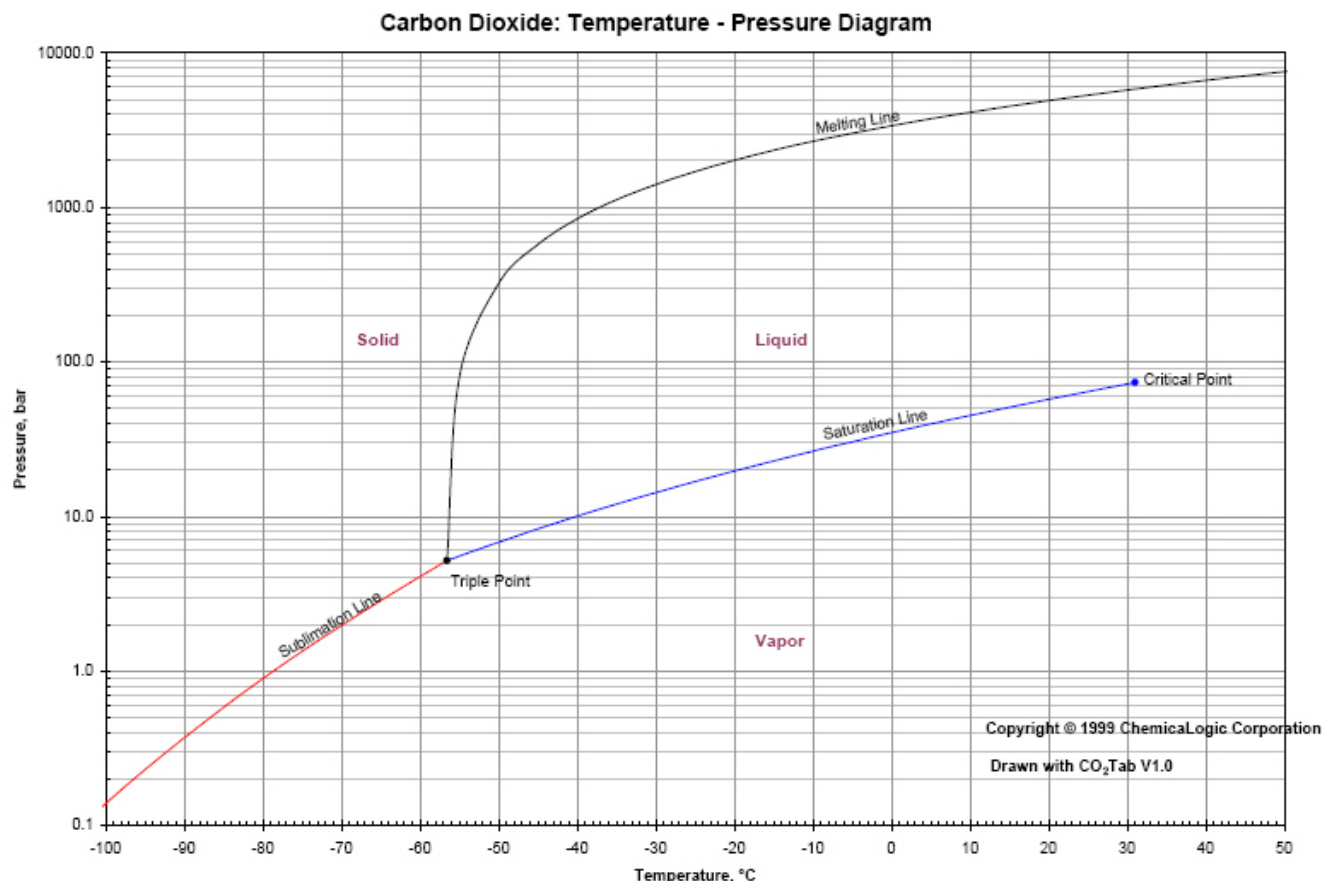
21. Thermomètre de Galilée** Le but de cet exercice est d'étudier le principe de fonctionnement des thermomètres de Galilée. Ces objets décoratifs sont constitués d'une colonne de verre remplie d'un liquide (L) dilatable dans lequel flottent (ou coulent) de petites ampoules marquées chacune d'une température différente. On lit la température T_i ambiante (qui est aussi celle de (L)) sur l'ampoule flottante la plus basse. On appelle, pour un gaz ou un liquide, α le coefficient de dilatation isobare, défini par $\alpha = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P$ où V représente le volume, T la température et P la pression. Pour les liquides ce coefficient est bien évidemment très faible de telle sorte qu'on pourra considérer dans la suite $\alpha \Delta T \ll 1$. De plus, on considérera α constant dans le domaine de température choisi.

1. Montrer alors, qu'à pression constante et en appelant μ la masse volumique du liquide, on peut écrire la loi de variation de μ avec la température (dans un domaine restreint de température autour de T_0) $\mu(T) = \mu_0 [1 - \alpha(T - T_0)]$ où μ_0 est la masse volumique du liquide à T_0 .
2. On considère maintenant que c'est ce liquide qui remplit le thermomètre de Galilée, dans lequel la pression sera supposée uniforme vu la faible hauteur de l'objet. Soit m_i et V_i la masse totale et le volume de l'ampoule marquée T_i ($i = 1$ à 10). Écrire, à l'aide de m_i , V_i , μ_0 , α , T et T_0 la condition pour que cette ampoule flotte (ou coule) dans le thermomètre placé dans une pièce à la température T.
3. En fait on construit un thermomètre où toutes les ampoules (dix au total) ont le même volume $V_0 = 5 \text{ cm}^3$. Mais leurs masses sont différentes de telle sorte que le poids de l'ampoule de masse m_i est juste compensé par la poussée d'Archimède exercée par le fluide à la température T_i où $T_i = (i + 16)^\circ\text{C}$, toujours avec i de 1 à 10. Donner dans un tableau les dix valeurs des masses m_i correspondantes des dix ampoules à l'aide des données suivantes : $T_0 = 20^\circ\text{C}$, $\mu_0 = 1,0 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$ et $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.
4. Sachant qu'en réalité la température est celle indiquée par l'ampoule flottante la plus basse, comment se placent les masses réelles des ampoules par rapport aux masses calculées ci-dessus?
5. Le fabricant annonce que son thermomètre est fiable à $0,5^\circ\text{C}$. Donner la fourchette dans laquelle la masse de chaque ampoule doit se trouver. Quelle erreur relative (en pourcentage) le fabricant peut-il se permettre sur la masse des ampoules? Commenter.

22. Extincteur à CO_2 ** On étudie un extincteur à dioxyde de carbone (voir figure ci-contre). Il est constitué d'une bouteille de dioxyde de carbone liquide à tube plongeant. L'appui sur la gâchette provoque la détente brusque donc adiabatique du liquide. A la sortie, on obtient un jet de dioxyde de carbone et de carboglace à -78°C . L'action de cet extincteur est triple : d'abord un effet de souffle, ensuite une chute du taux de dioxygène et un refroidissement de la zone où est projeté le dioxyde de carbone. Cet extincteur de faible portée est utilisé sur les feux de classe B et les feux électriques. Les calculs se feront pour une bouteille contenant au départ 2 kg de dioxyde de carbone à une pression de 64 bars et moyennant certaines approximations discutables qui seront fournies.



1. Quelle est la valeur minimale de la pression du dioxyde de carbone dans la bouteille pour n'avoir que du dioxyde de carbone liquide à 20°C ? Justifier avec votre diagramme (P,T).
2. Quel est le volume occupé par le dioxyde de carbone dans la bouteille?
3. Pourquoi est-ce qu'une détente adiabatique est forcément accompagnée d'un refroidissement? Justifier alors en vous aidant du diagramme (P,T) la formation de carboglace à la sortie de l'extincteur. Indiquer clairement l'état initial et l'état final de la transformation.
4. Estimer la masse de carboglace formée à la sortie
5. Reprendre l'action triple d'un extincteur à dioxyde de carbone : expliciter ces trois actions et comparer leur efficacité à celles de l'eau dans un extincteur à eau.



23. Équation de Van der Waals*** On considère un fluide de volume molaire v , à la pression P et à la température T , dont l'équation d'état est, dans un domaine de température et de pression, correctement décrite par l'équation de Van der Waals

$$\left(P + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT \quad \text{où } a \text{ et } b \text{ sont des constantes.}$$

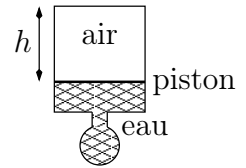
1. Définir ce que l'on appelle coefficient de compressibilité isotherme χ_T . Montrer qu'il s'exprime aussi bien en terme de volume V que de volume molaire v .
2. Montrer que, pour le fluide de Van der Waals, on a $\chi_T = \frac{v^2(v-b)^2}{RTv^3 - 2a(v-b)^2}$
3. Quel doit être selon vous le signe de χ_T pour que le fluide soit mécaniquement stable?

On appelle *spinodale* le lieu des points, dans le diagramme (v, P) , pour lesquels la compressibilité diverge, soit $\chi_T^{-1} = 0$.

4. Donner la relation existant entre v et T sur la spinodale.
5. En déduire l'équation de la spinodale $P = f(v)$ en coordonnées (v, P) .
6. Tracer l'allure de la spinodale dans le diagramme (v, P) en indiquant les zones où le fluide n'est pas stable mécaniquement.
7. Calculer les coordonnées (v_C, P_C) du sommet C de la spinodale, puis la température associée T_C .
8. Montrer que, pour un fluide de Van der Waals, le rapport $P_C v_C / (RT_C)$ est universel (indépendant de a et b). Application numérique : est-ce bien vérifié pour le cas de l'eau ? Propriétés de l'eau au point critique : $\rho_C = 0,322 \text{ g.cm}^{-3}$, $P_C = 22,064 \text{ MPa}$ et $T_C = 373,99^\circ\text{C}$.
9. Tracer dans le plan (v, P) l'allure des isothermes du fluide de Van der Waals en y surimposant l'allure de la spinodale. Regarder notamment les cas $T < T_C$ et $T = T_C$.

24. Cylindre et piston*** On considère un cylindre avec un piston mobile sans frottement et de masse négligeable. Le piston sépare la partie supérieure remplie d'air de la partie inférieure contenant de la vapeur d'eau; cette dernière provient d'une petite sphère placée au bas du cylindre qui contenait initialement $n_0 = 1,0$ mol d'eau ($m_0 = 18$ g). La section du cylindre vaut $s = 2,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$ et la hauteur initiale du compartiment est $h_0 = 0,50$ m.

L'air enfermé, supposé parfait, est à la pression $P_0 = 1,0$ bar lorsque la température est $T_0 = 373$ K et le piston est alors bloqué en bas du cylindre.



1. Calculer le nombre n de moles d'air enfermées dans le cylindre.
2. Le piston étant mobile, on chauffe progressivement l'ensemble du cylindre, avec l'air et l'eau qu'il contient, depuis $T_0 = 373$ K. Que se passe-t-il au cours du chauffage? Montrer que le piston atteint une position d'équilibre lorsque la température est suffisamment élevée. Déterminer alors la hauteur du piston.
3. La pression d'équilibre de la vapeur d'eau avec l'eau liquide est donnée approximativement par la relation

$$P_s(T) = P_0 \left(\frac{T - 273}{100} \right)^4$$

et la vapeur est à peu près un gaz parfait. Montrer que la température T_1 , lorsque le piston a atteint sa position d'équilibre finale, est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{n + n_0}{n} \times \frac{T_1}{T_0} = \left(\frac{T_1 - 273}{100} \right)^4$$

Expliquer une méthode permettant de trouver graphiquement T_1 et déterminer numériquement sa valeur.

4. Quel est le transfert thermique fourni au système {air + eau} pour passer de T_0 à T_1 ?

Données : Air et vapeur d'eau sont des gaz parfaits; le volume massique de l'eau liquide est constant. Capacités thermiques molaires à volume constant de l'air : $C_{V,m} = 20,8 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$, de l'eau liquide : $C_{\text{eau},m} = 75,2 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$. chaleur latente molaire de vaporisation de l'eau en J.mol^{-1} : $L_{v,m}(T) = A - BT$ avec $A = 6,0 \cdot 10^4 \text{ J.mol}^{-1}$ et $B = 52,5 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$.

