

Fluides réels, phases condensées et changements d'états

1. Échauffement isochore de l'eau liquide <https://youtu.be/NssSqHn1hF0>

2. Application directe à partir des tables thermodynamique de l'eau* <https://youtu.be/iXsQ4X1gZ7s>

3. Ébullition de l'eau, aspects qualitatifs <https://youtu.be/9f9elCuFDww>

1. La formule de Rankine (trouvée sur Wikipédia) donne approximativement la pression de vapeur saturante p_{sat} (en bar) en fonction de la température T (en K) de 5 à 140°C. Elle s'écrit

$$\ln p_{\text{sat}} = 13,7 - \frac{5120}{T}$$

Pour $T = 70^\circ\text{C}$, on trouve alors $p_{\text{sat}} = 0,30 \text{ bar}$

ce qui correspond à peu près à la pression en haut de l'Everest (cf. modèle de l'atmosphère isotherme).

2. Posons m la masse d'eau dans la casserole. Pour augmenter la température de l'eau de $T_0 = 20^\circ\text{C}$ jusqu'à $T_{\text{éb}} = 100^\circ\text{C}$, il faut fournir une énergie $\mathcal{E}_{\text{éb}} = m c_{\text{eau}} \Delta T$. Pour vaporiser entièrement la même masse d'eau une fois $T_{\text{éb}}$ atteint, il faut fournir une énergie $\mathcal{E}_{\text{vap}} = m \ell_{\text{vap}}$. Comme le transfert se fait vraisemblablement à puissance constante (cas des plaques de cuisson), le rapport des énergies donne le rapport des temps :

$$\frac{\tau_{\text{vap}}}{\tau_{\text{éb}}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{vap}}}{\mathcal{E}_{\text{éb}}} = \frac{\ell_{\text{vap}}}{c_{\text{eau}} \Delta T}$$

Avec $c_{\text{eau}} = 4,18 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $\ell_{\text{vap}} = 2257 \text{ kJ.kg}^{-1}$, on trouve

$$\tau_{\text{vap}} = \frac{\ell_{\text{vap}}}{c_{\text{eau}} \Delta T} \tau_{\text{éb}} = 34 \text{ min}$$

4. Isothermes expérimentales de SF_6 <https://youtu.be/sPgyXsnDf9I>

1. Par lecture sur le côté droit du graphique, on trouve que pour $V = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$, le gaz est à la pression $P = 1,6 \cdot 10^6 \text{ Pa}$, soit

$$n = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \quad \text{soit} \quad m = n M_{\text{SF}_6} = 0,21 \text{ g}$$

2.

$$\nu_{\text{vap,sat}} = \frac{V_{\text{vap,sat}}}{m} = 6,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$$

3.

$$x(1 \text{ cm}^3) = \frac{1 - 0,3}{1,3 - 0,3} = 0,7$$

4.

$$V(x = 0,4) = 0,7 \text{ cm}^3$$

5. Pièce humide <https://youtu.be/9FAIlrM3D4s>

6. Séchoir* <https://youtu.be/9FAIlrM3D4s>

7. QCM Humidité* None available

8. Interpolations linéaires None available

9. Marmite sous pression* <https://youtu.be/jLh4GAivJ9M>

10. Ébullition de l'eau, aspects quantitatifs* None available

11. Titre en vapeur pour équilibre éventuel* None available

12. Pression au fond de l'océan** <https://youtu.be/2PKyVu6PabA>

13. Sprinklers : analyse document technique** None available

14. Transformations isothermes de la vapeur d'eau*

1. (a) Ces conditions correspondent à un volume massique

$$\nu = \frac{V}{m} = 0,0200 \text{ m}^3/\text{kg}$$

La ligne donnant les valeurs saturantes à 12 MPa indique qu'on n'est probablement pas en présence d'un mélange liquide/vapeur car le volume massique de la vapeur saturante à cette pression est plus faible que celui trouvé ici. Il faut donc regarder du côté de la table « Superheated vapor » pour l'eau. On ne trouve que des informations pour $P_1 = 12,0 \text{ MPa}$ et $P_2 = 15,0 \text{ MPa}$. Il faudra donc interpoler les résultats entre ces deux pressions avec un coefficient α tel que

$$P = \alpha P_1 + (1 - \alpha) P_2 \quad \text{soit} \quad \alpha = \frac{P - P_2}{P_1 - P_2} = 0,833$$

Regardons déjà l'interpolation qui donne le volume massique $\nu(400^\circ\text{C}, P)$ car c'est la plus petite valeur commune en température fournie. On a

$$\nu(400^\circ\text{C}, P) = \alpha \nu(400^\circ\text{C}, P_1) + (1 - \alpha) \nu(400^\circ\text{C}, P_2) = 0,0202 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Coup de chance, cela tombe presque juste. On peut inférer que la vraie température est très légèrement inférieure à 400°C .

- (b) En restant à 400°C , mais en se ramenant à 25 bar (c'est-à-dire pile à la moyenne des valeurs à 2 et 3 MPa), on calcule un volume massique de

$$\nu(400^\circ\text{C}, 25 \text{ bar}) = \frac{0,1512 + 0,09936}{2} = 0,125 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Le nouveau volume occupé vaut donc

$$V = m \times \nu(400^\circ\text{C}, 25 \text{ bar}) = 94,0 \text{ L}$$

- (c) Pour un gaz parfait, diviser par 5 la pression de manière isotherme revient à multiplier le volume par 5, soit obtenir 75,0 L, ce qui fait une erreur relative de 20% sur la détermination du volume.

2. (a) À 10 bar = 1 MPa et 250°C , le volume massique vaut $\nu = 0,2327 \text{ m}^3/\text{kg}$. Ainsi,

$$m = \frac{V}{\nu} = 430 \text{ g}$$

(b) Lorsque le volume n'est plus que de 37 L, le volume massique vaut

$$v' = 0,0861 \text{ m}^3/\text{kg}$$

La pression est donc située entre $P_1 = 2,00 \text{ MPa}$ (où $v_1 = 0,1114 \text{ m}^3/\text{kg}$ à 250°C) et $P_2 = 3,00 \text{ MPa}$ (où $v_2 = 0,7058 \cdot 10^{-1} \text{ m}^3/\text{kg}$ à 250°C). Il faut donc trouver la pondération α telle que

$$v' = \alpha v_1 + (1 - \alpha) v_2 \quad \text{soit} \quad \alpha = \frac{v' - v_2}{v_1 - v_2} = 0,380$$

pour en déduire

$$P = \alpha P_1 + (1 - \alpha) P_2 = 26,2 \text{ bar}$$

15. Transformations successives d'un gaz réel** <https://youtu.be/8q0sHgazEvw>

16. Lecture des isothermes d'Andrews* None available

17. Hygrométrie : lecture d'un abaque* <https://youtu.be/wz7yKmFVvCc>

18. Masse de vapeur* <https://youtu.be/Feqtfl1dAuc>

19. Richtig oder Falsch?* None available

20. Détecteur d'incendie**

1. Le volume massique est l'inverse de la masse volumique. C'est-à-dire que si une masse m d'eau occupe un volume V , alors l'eau possède dans ces conditions un volume massique $v = V/m$. Comme la masse est une grandeur ne dépendant pas de la pression en multipliant et divisant par elle dans les définitions de α et χ_T , il vient

$$\alpha = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P = \frac{1}{V/m} \left(\frac{\partial V/m}{\partial T} \right)_P = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P \quad \text{et de même} \quad \chi_T = -\frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial P} \right)_T$$

En supposant que v varie peu avec T et P , on peut prendre les valeurs de α et χ_T en $v = v_0$ et écrire que

$$\text{On a} \quad dv = \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P dT + \left(\frac{\partial v}{\partial P} \right)_T dP = v_0 \alpha dT - v_0 \chi_T dP$$

$$\text{soit} \quad v - v_0 = \Delta v = v_0 (\alpha \Delta T - \chi_T \Delta P)$$

$$\text{d'où} \quad v(T, P) = v_0 [1 + \alpha (T - T_0) - \chi_T (P - P_0)] \quad \text{et} \quad v(T_0, P_1) = 9,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

2. Le volume occupé par l'eau étant constant, il en va de même du volume massique, d'où la relation

$$\alpha (T_2 - T_0) = \chi_T (P_2 - P_0)$$

$$\text{d'où l'on tire} \quad P_2 = P_0 + \frac{\alpha}{\chi_T} (T_2 - T_0) = 1,8 \cdot 10^8 \text{ Pa} = 1,8 \cdot 10^3 \text{ bar}$$

Si on avait pris un gaz à la place d'un liquide, la pression aurait tout juste été 2 plus forte que P_0 (via la loi des gaz parfaits), soit 900 fois plus faible que ce que l'eau liquide apporte!

3. L'éthanol est un peu plus compressible mais beaucoup plus dilatable que l'eau (penser aux thermomètres à alcool). Ainsi, la pression augmente plus vite et le déclenchement du dispositif sera plus précis.

21. Thermomètre de Galilée** https://youtu.be/z_LwetUgJ6M

22. Extincteur à CO₂** None available

23. Équation de Van der Waals***

1. Par définition,

$$\chi_T = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T = -\frac{1}{nv} \left(\frac{\partial (nv)}{\partial P} \right)_T = -\frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial P} \right)_T$$

2. Comme on peut facilement isoler P de l'équation de Van der Waals, on calcule $\left(\frac{\partial P}{\partial v} \right)_T = \left(\frac{\partial v}{\partial P} \right)_T^{-1}$

On a

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2}$$

d'où

$$\left(\frac{\partial P}{\partial v} \right)_T = -\frac{RT}{(v-b)^2} + \frac{2a}{v^3} = \frac{-RTv^3 + 2a(v-b)^2}{v^3(v-b)^2}$$

On obtient bien

$$\chi_T = -\frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial P} \right)_T^{-1} = \frac{v^2(v-b)^2}{RTv^3 - 2a(v-b)^2}$$

3. Le fluide est stable à condition qu'une compression (augmentation de pression) soit accompagnée d'une diminution de volume, c'est-à-dire

$$\chi_T > 0$$

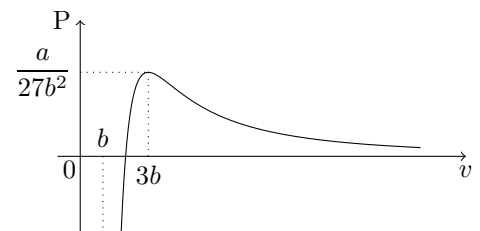
4. La spinodale est définie par $\chi_T^{-1} = 0$, c'est-à-dire

$$RTv^3 = 2a(v-b)^2$$

5. L'expression de P obtenue à l'aide de l'équation de Van der Waals fait intervenir le produit RT que l'on peut alors remplacer pour obtenir l'équation de la spinodale en coordonnées (v, P),

$$P = \frac{2a(v-b)}{v^3} - \frac{a}{v^2}$$

6. Le fluide est stable à condition que $\chi_T > 0$, c'est-à-dire $RTv^3 > 2a(v-b)^2$, ce que l'on peut obtenir à v constant en faisant tendre la pression vers l'infini. C'est donc la zone au-dessus de la spinodale qui constitue les états stables alors que les zones sous la spinodale sont instables (en particulier la plupart des zones à P < 0).



7. Le sommet C de la spinodale est tel que la dérivée de la courbe $P = f(v)$ s'annule, c'est-à-dire

$$0 = \frac{2av_C^3 - 2a(v_C - b) \times 3v_C^2}{v_C^6} + \frac{2a}{v_C^3}$$

$\Leftrightarrow$

$$0 = \frac{2av_C - 6av_C + 6ab + 2av_C}{v_C^4}$$

$\Leftrightarrow$

$$0 = \frac{2a}{v_C^4} (v_C - 3b)$$

$\Leftrightarrow$

$$v_C = 3b$$

En remplaçant dans l'expression de $P = f(v)$ puis dans l'équation de Van der Waals, on trouve sans peine

$$P_C = \frac{a}{27b^2} \quad \text{et} \quad T_C = \frac{1}{R} \frac{8a}{27b}$$

8. En calculant,

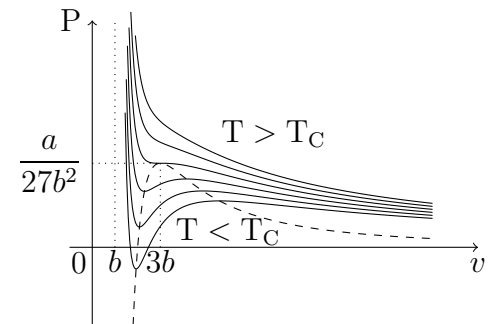
$$\frac{P_C v_C}{RT_C} = \frac{a}{27b^2} \times 3b \times \frac{27b}{8a} = \frac{3}{8} = 0,375$$

Pour l'eau,

$$\frac{P_C v_C}{RT_C} = \frac{P_C}{RT_C} \times \frac{M_{H_2O}}{\rho_C} = 0,229$$

valeur qui n'est pas vraiment proche de la prédiction de Van der Waals avec la précision des valeurs fournies, mais qui en garde tout de même l'ordre de grandeur.

9. Le graphe des isothermes est représenté ci-contre.



24. Cylindre et piston*** https://youtu.be/sH6bH_oRWMo

