Chapitre 6

Etats de la matière

6.1 Compressibilité

♢Soient V le volume d'un corps à la pression p et $V' = V + \Delta V$ le volume de ce même corps à la pression $p' = p + \Delta p$. Le volume diminue lorsque la pression augmente : ⋄

$$\Delta V = -\chi\, V \Delta p\,,$$

♢où χ est le coefficient de compressibilité. Unité : Pa^{-1}. ⋄

6.2 Dilatation thermique

♢Soient l la longueur d'un corps à la température T et $l' = l + \Delta l$ la longueur de ce même corps à la température $T' = T + \Delta T$. La longueur augmente si la température augmente : ⋄

$$\Delta l = \alpha\, l\, \Delta T\,,$$

♢où α est le coefficient de dilatation linéique du matériau. Unité : K^{-1}. ⋄
♢De manière similaire, la variation de volume d'un corps due à un changement de température s'écrit : ⋄

$$\Delta V = \gamma\, V\, \Delta T\,,$$

♢où γ est le coefficient de dilatation volumique du matériau. Unité : K^{-1}. ⋄

6.3 Premier principe de la thermodynamique

Energie interne U L'énergie interne U d'un système est définie dans le référentiel du CM par la somme des énergies cinétique et potentielle interne des constituants microscopiques du système.

Premier principe de la thermodynamique

$$\Delta U = W + Q\,.$$

L'accroissement ΔU d'énergie interne d'un système est égal au travail W fourni par l'extérieur à ce système plus la chaleur Q reçue par le système.

6.4 Chaleur spécifique

♢Lorsque l'on apporte de l'énergie par chaleur à un corps ($Q > 0$), la température de ce dernier augmente : ⋄

$$Q = C\Delta T\,,$$

♢où C est un coefficient caractéristique du corps appelé **chaleur spécifique**. Unité de C : $\mathrm{J\,K^{-1}}$. ⋄
♢Pour un corps homogène, la chaleur spécifique est proportionnelle à la masse ($C = c\,m$) et ⋄

$$Q = c\,m\,\Delta T\,,$$

♢où le coefficient c est une caractéristique du matériau et de son état appelée **chaleur massique**. Unité de c : $\mathrm{J\,kg^{-1}\,K^{-1}}$. ⋄

6.5 Transfert d'énergie par chaleur : conduction, convection, rayonnement

Conduction

♢Si deux parties d'un corps sont à des températures différentes, il y a un transfert de chaleur du chaud vers le froid par chocs entre molécules. ⋄
♢Plus la **conductivité thermique** du matériau est grande, plus le transfert de chaleur est important pour une différence de température donnée. ⋄

Convection

♢Lorsque l'on élève la température d'un fluide (liquide ou gaz), il se dilate et sa masse volumique $\rho = M/V$ diminue. D'autre part, deux fluides de masses volumiques différentes sont séparés dans un même récipient sous l'effet de leur poids respectifs : le plus dense en bas, le plus léger au dessus. ⋄
♢Ainsi, si l'on chauffe un fluide par en dessous, le fluide le plus proche de la source de chaleur s'échauffe d'abord et monte, formant des **courants de convection** transportant l'énergie dans tout le fluide. ♢

Rayonnement

♢Une onde électromagnétique transporte de l'énergie sous forme de "paquets" élémentaires. L'énergie d'un de ces paquets peut s'écrire ⋄

$$E = h\nu\,,$$

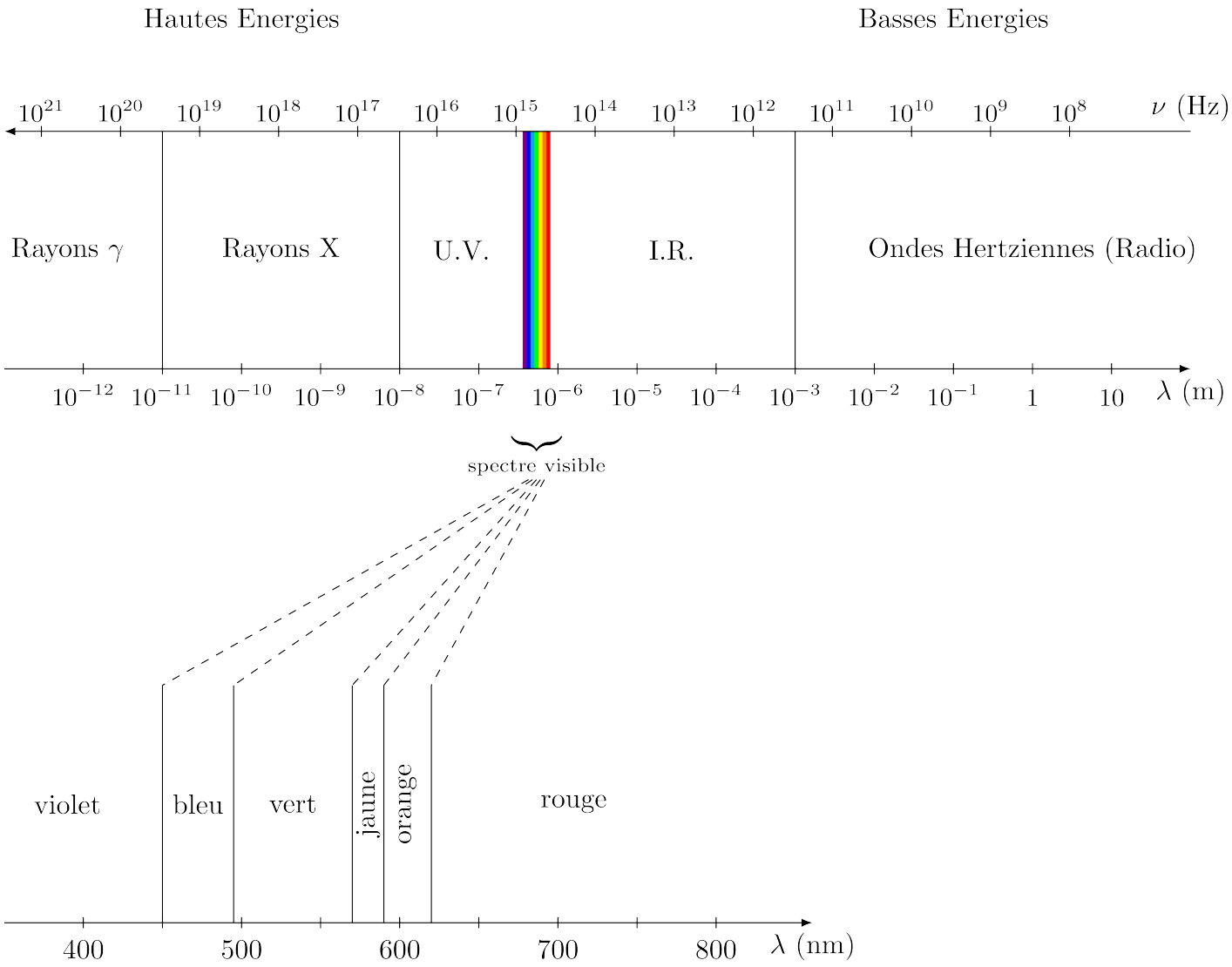
♢où $h = 6.625 \cdot 10^{-34}\,\mathrm{J\,s}$ est la constante de Planck et ν est la fréquence de l'onde. ⋄
♢En utilisant la relation entre la longueur d'onde λ et la fréquence ν, ⋄

$$c = \lambda\nu\,,$$

♢où $c \cong 3 \cdot 10^{8}\,\mathrm{m/s}$ est la vitesse de la lumière, l'énergie d'un paquet devient ⋄

$$E = \frac{hc}{\lambda}\,.$$

♢Le spectre des ondes électromagnétiques est divisé en différents domaines selon l'énergie (ou la fréquence, ou la longueur d'onde) du rayonnement considéré. ⋄



♢Si l'onde électromagnétique rencontre un corps, elle peut transmettre de l'énergie à ce dernier. ⋄
♢Tout corps rayonne et perd donc de l'énergie par rayonnement. ⋄

6.6 Changement d'état

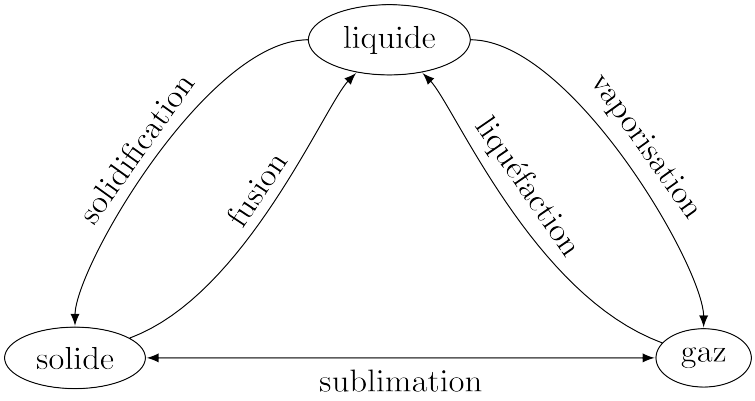
♢La chaleur à fournir pour changer l'état d'une masse m d'un certain matériau est proportionnelle à m : ⋄

$$Q = \pm\lambda m\,,$$

♢où le coefficient λ est une caractéristique du matériau appelée chaleur latente. Unité : $\mathrm{J\,kg^{-1}}$. ⋄
♢Dans la relation $Q = \pm\lambda m$, le signe $+$ traduit le fait que l'on apporte de l'énergie et le signe $-$ que l'on retire de l'énergie lors du changement d'état. ⋄

♢A chaque changement d'état correspond une chaleur latente pour un matériau donné : **chaleur latente de fusion** (ou **de solidification**) λ_f, **chaleur latente de vaporisation** (ou **de liquéfaction**) λ_v. ♢

Nomenclature des changements d'état



6.7 Pression de saturation

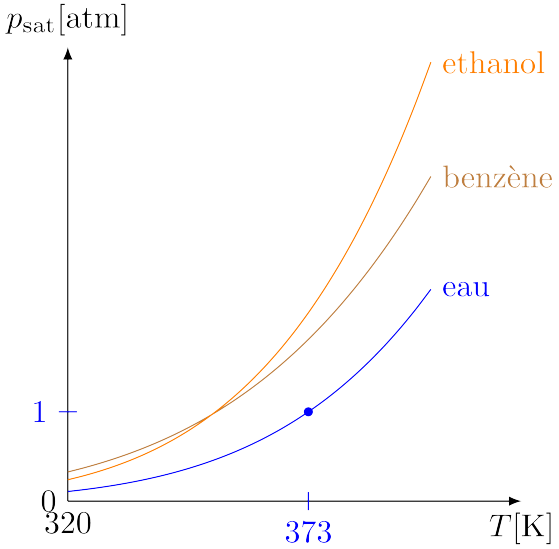
Définition et diagramme pression-volume

♢Pour un gaz réel, une diminution de volume engendre une augmentation de pression jusqu'à une pression maximale à laquelle le gaz se liquéfie. ♢

Pression de saturation Pression de vapeur maximale d'une substance à l'état gazeux.

$$p_{\text{sat}} = p_{\text{vap,max}} \,.$$

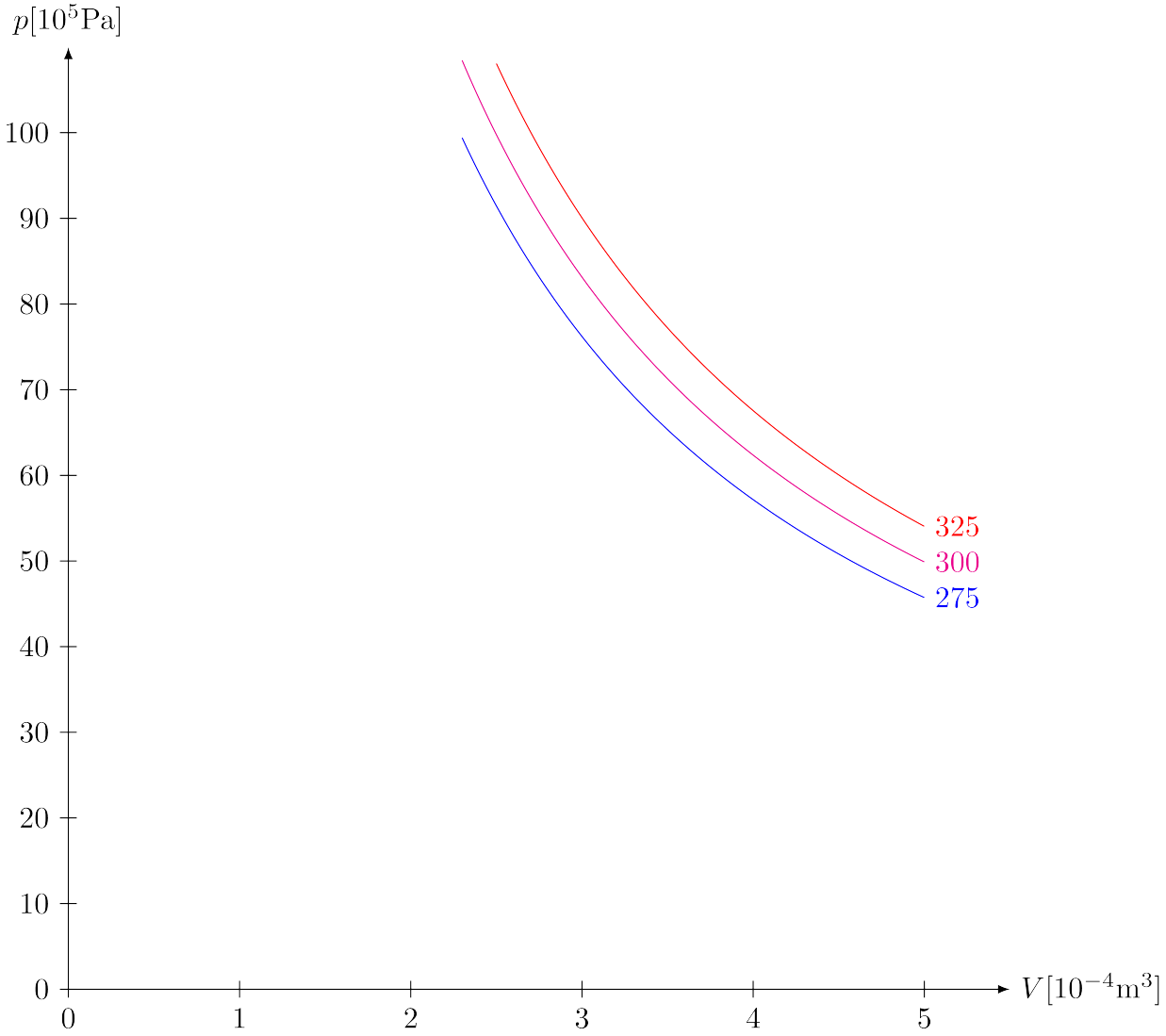
La **pression de saturation** (ou **pression de vapeur saturante**) ne dépend que de la substance et de la température : c'est une constante d'équilibre.



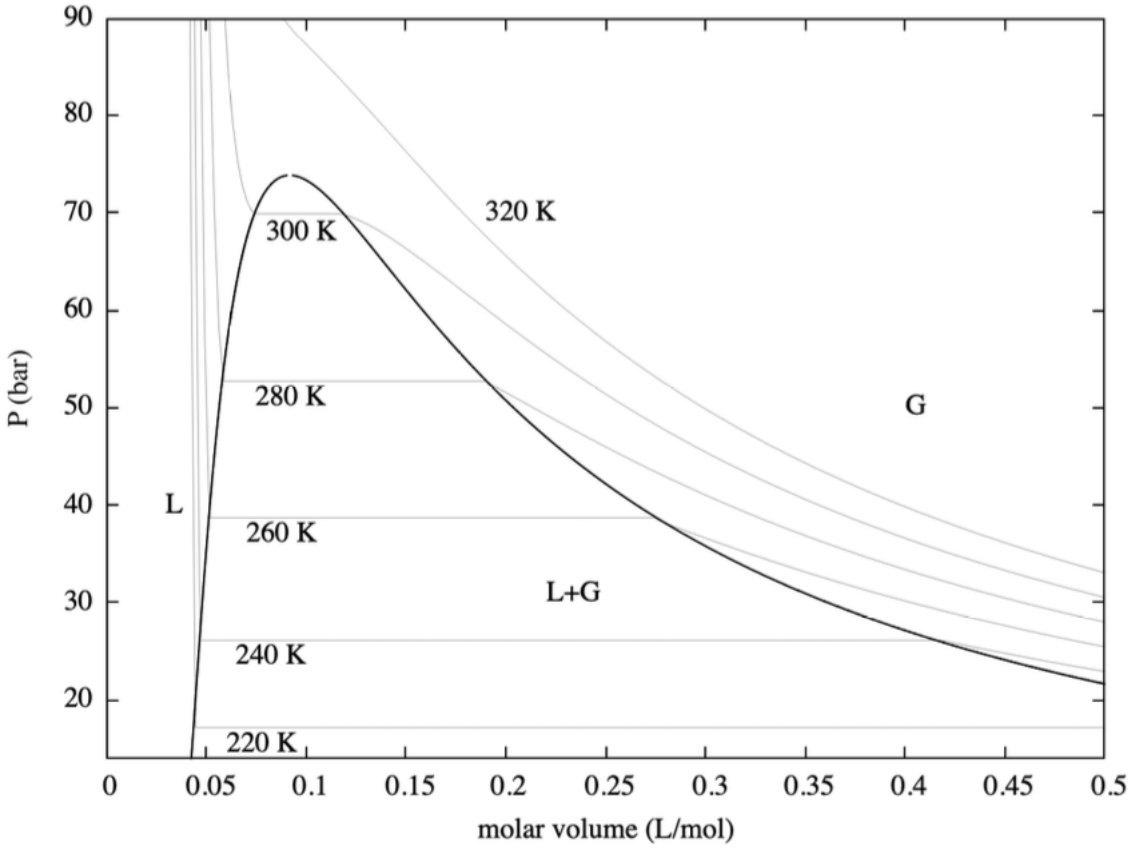
Exemple 6.1. A $100\,°\text{C} = 373.15\,\text{K}$, la pression de saturation de l'eau est de 1 atm. Si on essaie d'introduire d'avantage de vapeur d'eau dans le volume considéré, il y a condensation. ♢

Diagramme $p - V$ d'une substance

- **Cas du gaz parfait :** $pV = NkT$ (N fixé).
  Un point (V_0, p_0) dans le plan définit entièrement l'état du gaz.
  Une compression isotherme à $T_0 =$ cste donne une **hyperbole** $pV = NkT_0 =$ cste, appelée **isotherme**. Plus la température est élevée, plus l'isotherme est éloignée de l'origine.



  A toute température et à toute pression, l'état est gazeux (pas de liquéfaction).
- **Cas d'un gaz réel**
  Pendant une compression isotherme, le comportement du gaz varie selon la température.



— Haute température T_h : comportement similaire à celui du gaz parfait. Le gaz ne peut être liquéfié.
— Basse température T_b : le gaz va se liquéfier.

1. $A \rightarrow B$: la pression p_{vap} augmente (compression) pour atteindre sa valeur maximale p_{sat}.
2. $B \rightarrow D$: la pression p_{vap} est maximale ($p_{\text{vap}} = p_{\text{sat}}$). La compression fait donc apparaître la phase liquide et un palier de liquéfaction sur le diagramme $p-V$. Le point D est un état du tout-liquide.
3. $D \rightarrow E$: la compression du liquide provoque une forte augmentation de pression (liquides peu compressibles).

— Température critique T_c : température séparant les deux comportements (température la plus élevée à laquelle la phase liquide peut exister).

La pression de saturation p_{sat} est donc, à température donnée :
— la pression maximale pour la phase gazeuse,
— la pression minimale pour la phase liquide.
La transition de phase a lieu à cette pression.

Diagramme de phase d'un gaz réel, gaz de Van der Waals

♢Van der Waals a apporté des modifications à l'équation du gaz parfait, $p_{\text{gp}}V_{\text{gp}} = nRT$, l'indice gp faisant référence au gaz parfait. ⋄

- Correction à p_{gp}
  En raison des forces de cohésion attractives entre les molécules, la pression d'un gaz

réel est inférieure à p_{gp} :

$$p = p_{\text{gp}} - a\frac{n^2}{V^2}\,,$$

où a est un paramètre caractéristique du gaz.

- Correction à V_{gp}
  Le volume d'un gaz réel est supérieur à V_{gp}, à cause du volume propre des molécules :

$$V = V_{\text{gp}} + nb\,,$$

où b est un paramètre caractéristique du gaz.

♢Ainsi, l'équation d'état de Van der Waals s'écrit : ⋄

$$p_{\text{gp}}V_{\text{gp}} = \left(p + a\frac{n^2}{V^2}\right)(V - nb) = nRT\,,$$

♢où a et b sont des constantes propres au gaz. ⋄

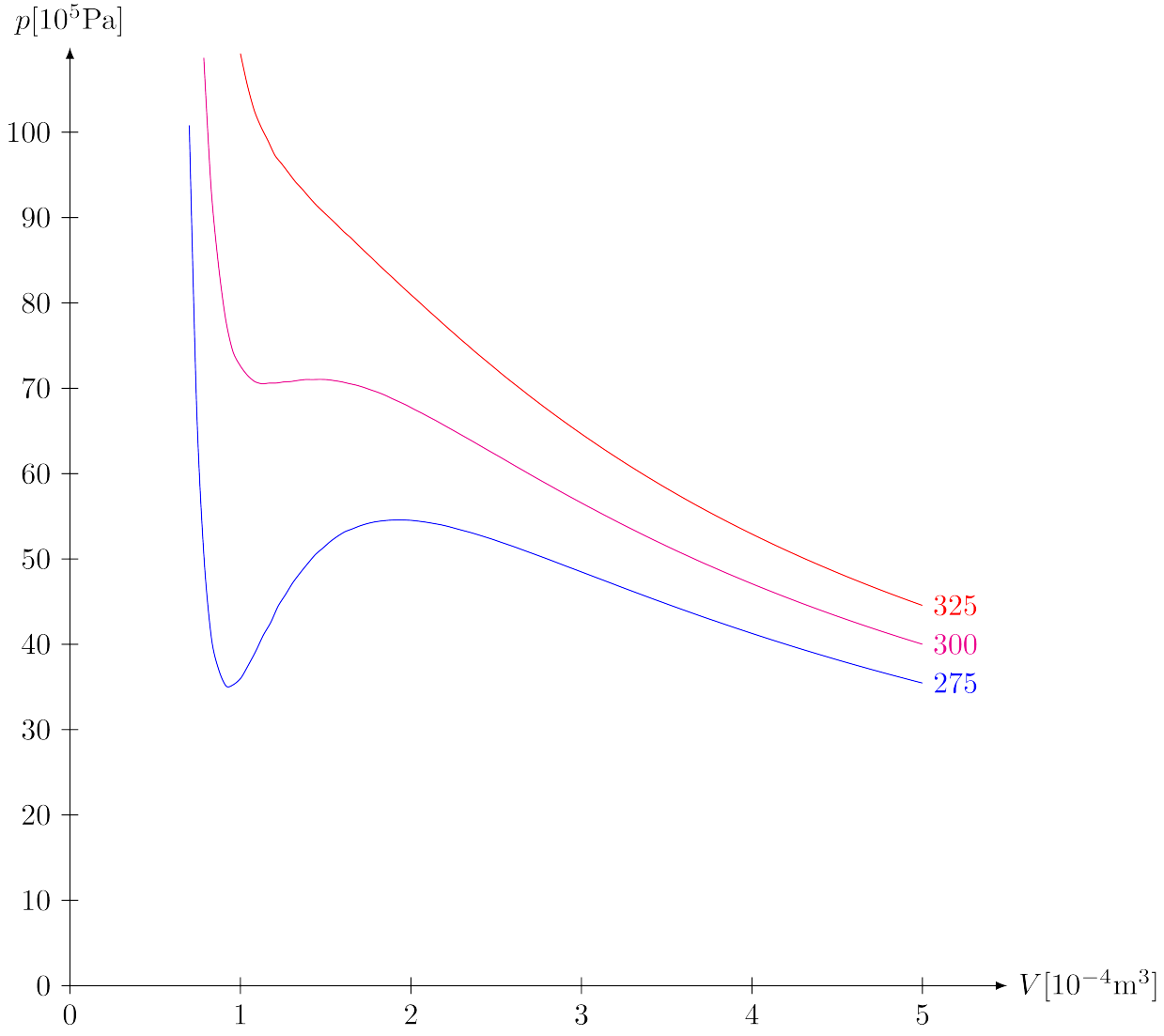
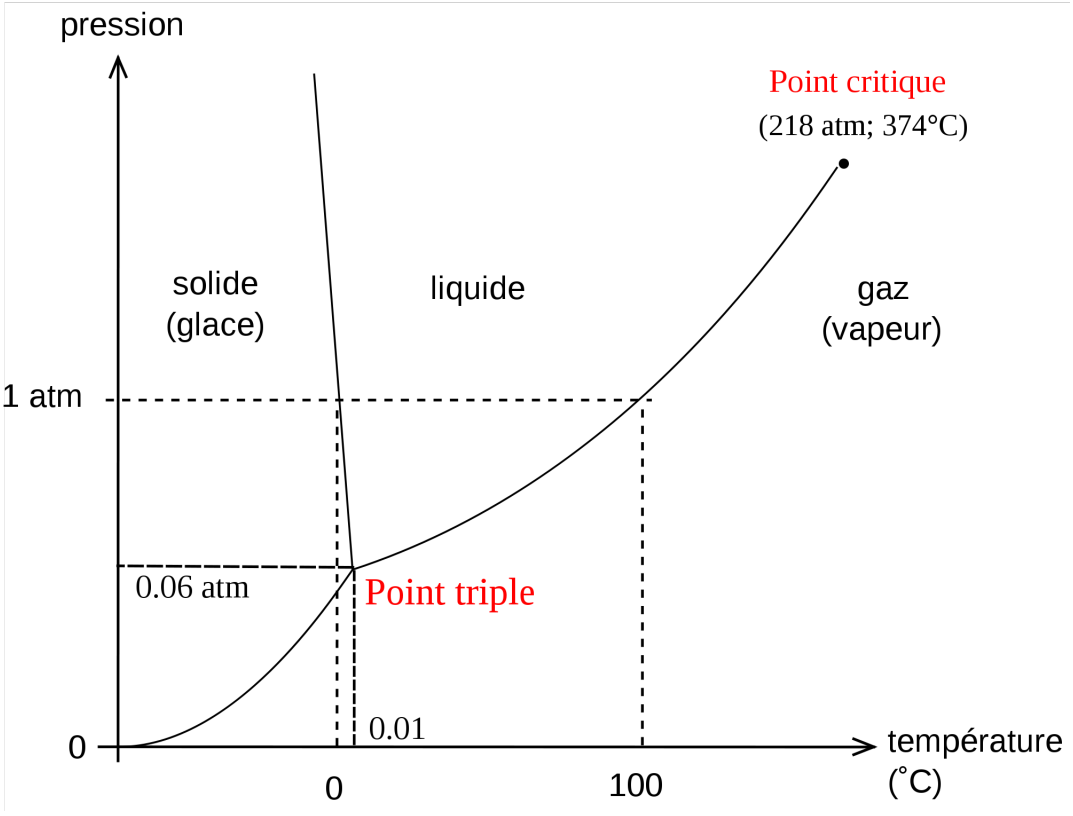


Diagramme 3D et diagramme pression-température

♢Il est possible de visualiser les trois états gaz-liquide-solide dans un même diagramme tridimensionnel. L'ensemble des états possibles est alors figuré par une surface dans l'espace $p - V - T$. ⋄



♢Une bonne visualisation des trois états peut également être obtenue dans un diagramme $p - T$. ⋄



Humidité

♢L'**humidité absolue** de l'air est la pression de vapeur d'eau p_{vap} : ⋄

$$0 < p_{\text{vap}} \leq p_{\text{sat}} \,.$$

♢L'**humidité relative** H de l'air est le rapport entre la pression de vapeur d'eau et la pression de vapeur d'eau maximale dans l'air : ⋄

$$H = \frac{p_{\text{vap}}}{p_{\text{sat}}} \quad \text{(sans unité)}\,, \quad 0 < H \leq 1 = 100\% \,.$$

Evaporation

♢L'évaporation d'une substance est une vaporisation ou une sublimation. Un liquide ou un solide s'évapore si la pression de vapeur est inférieure à la pression de saturation : ⋄

$$p_{\text{vap}} < p_{\text{sat}} \,.$$

Ebullition

♢L'ébullition d'une substance est un changement d'état violent accompagné d'une formation de bulles. Il s'agit d'une vaporisation qui se produit lorsque la pression de saturation est supérieure ou égale à la pression de l'air : ⋄

$$p_{\text{sat}} \geq p_{\text{air}} \,.$$

♢La température d'ébullition $T_{\text{ébullition}}$ pour une pression de l'air p_{air} est donc donnée par le cas limite ⋄

$$p_{\text{sat}}(T_{\text{ébullition}}) = p_{\text{air}} \,.$$