

Tube de NATTERER

AVERTISSEMENT : les pages 3 et 4 sont indisponibles. Contacter l'auteur.

Fonction

➤ Didactique. Mise en évidence de la **température critique** d'un corps, au-dessus de laquelle les états liquide et gazeux sont confondus.

NATTERER Johann Augustus (1821-1901) : médecin et physicien autrichien qui étudia surtout la compressibilité des gaz.

Description

➤ C'est un **tube de verre**, scellé à la lampe et rempli, à demi à la température ordinaire, d'anhydride carbonique liquide.

Quelques éléments de physique

Pour bien comprendre les phénomènes observables dans le tube de NATTERER, il est nécessaire d'étudier les isothermes d'ANDREWS.

Rappel de quelques définitions

Lorsque la **vaporisation** d'un liquide, c'est-à-dire le passage de l'état liquide à l'état gazeux, se fait au sein du liquide, on est en présence de l'**ébullition**. Si la vaporisation se fait uniquement par la surface de séparation du liquide et de l'air ambiant, on assiste à l'évaporation.

Lorsque, dans une enceinte fermée, le liquide est au contact de sa vapeur, cette vapeur est dite **saturante**. On montre expérimentalement que sa pression est la plus grande qu'elle puisse supporter : c'est la **pression maximale** de vapeur, caractéristique du corps pur et fixe pour une température déterminée. Si on essaie par exemple, à température constante, de diminuer le volume occupé par une certaine masse de vapeur saturante, la pression n'augmente pas parce que de la vapeur se liquéfie. Par contre, la pression maximale augmente quand la température s'élève.

Les isothermes d'ANDREWS

➤ Si l'on représente les variations de la pression P d'une certaine quantité de gaz carbonique, un gramme par exemple, en fonction de son volume V , c'est-à-dire en coordonnées (V,P) de CLAPEYRON, à différentes températures constantes, on obtient un réseau d'isothermes d'ANDREWS*.

**ANDREWS Thomas (1813-1885) : physicien irlandais qui a découvert l'existence de la température critique et reconnu la continuité des états liquide et gazeux.*

On trouve sur la **Figure 1** ci-dessous six isothermes tracées aux températures $t_1 = 10^\circ C$ ou $T_1 = 283^\circ K$, $t_2 = 20^\circ C$ ou $T_2 = 293^\circ K$, ... $t_6 = 100^\circ C$ ou $T_6 = 373^\circ K$.

Les trois premières se composent de trois parties telles que :

- AB pour les faibles pressions, qui s'écarte plus ou moins de l'arc d'hyperbole équilatère qui correspondrait à la loi de MARIOTTE : $P.V = constante$, satisfaite par les gaz parfaits;
- BD , un palier horizontal ;
- DE pour les fortes pressions, une portion de courbe rapidement ascendante.

Le point anguleux B correspond au commencement de la liquéfaction ; le fluide y est pratiquement tout entier à l'état de gaz en équilibre avec une goutte de liquide. Il est donc dans l'état de vapeur saturante à la température T_l .

BD correspond à la liquéfaction à température constante et, conformément à ce qui a été rappelé plus haut, la pression reste constante et égale à la pression maximale de vapeur $P_s(T_l)$, tandis que le volume diminue à mesure que la proportion de gaz diminue et que la proportion de liquide augmente.

Le point D définit l'état du liquide en équilibre avec sa vapeur et DE correspond au liquide beaucoup moins compressible que le gaz.

Enfin, la masse de gaz retenue pour les mesures étant égale à l'unité, les abscisses de B et D représentent les volumes massiques $u_v(T)$ et $u_l(T)$ de la vapeur saturante et du liquide à la température T_l .

➤ **Parts respectives des masses de liquide et de gaz dans les états représentés par les points du palier** : il est possible de calculer les masses de gaz et de liquide en chaque point du palier en fonction de sa position géométrique.

Au point intermédiaire F , soit m_l la masse de liquide, m_v la masse de vapeur et $u(T)$ le volume total qui est aussi un volume massique. On peut écrire les relations suivantes :

$$\begin{aligned} m_l + m_v &= 1 \\ u(T) &= u_v(T).m_v + u_l(T).m_l. && \text{D'où :} \\ u(T) &= u_v(T).m_v + u_l(T).(1 - m_v) = u_l(T) + m_v[u_v(T) - u_l(T)]. \end{aligned}$$

On trouve ainsi :

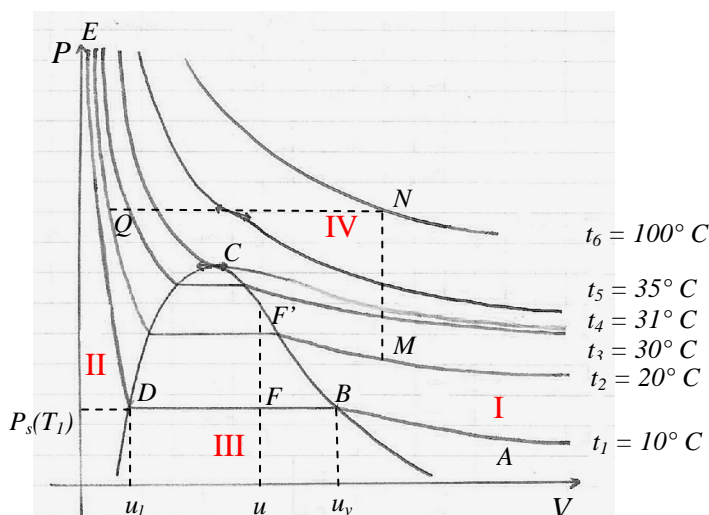


Figure 1 : Les isothermes (approximatives) du gaz carbonique en coordonnées de CLAPEYRON (V,P), dites d'ANREWS.

Considérons une masse m de gaz carbonique enfermée dans un tube de verre de volume V . Son volume massique est $v = \frac{V}{m}$.

Si la masse m est bien choisie, à une température constante T inférieure à la température critique T_c , le point figuratif F de l'état du fluide est un point du palier BD de l'isotherme correspondant (**Figure 1**).

Le fluide se scinde en deux parties, l'une liquide, l'autre gazeuse, séparées par un ménisque facilement observable.

Conformément à ce qui a été établi pour les points du palier, si F est, par exemple en F_1 sur la **Figure 2**, la masse m_{l1} du liquide égale à $m_{l1} = \frac{BF_1}{BD}$ est supérieure à celle de la vapeur

saturante $m_{v1} = \frac{DF_1}{DB}$: c'est ce que l'on observe

dans le tube **1**. Si au contraire, F est en F_3 sur la **Figure 2**, la masse de la vapeur saturante est supérieure à celle du liquide, ce que l'on observe dans le tube **3**.

Les volumes respectifs du liquide et de la vapeur dans le tube **1** sont égaux à :

$$V_{l1} = m_{l1} \cdot u_l(T) = \frac{BF_1}{BD} \cdot u_l(T) \quad \text{et} \quad V_{v1} = m_{v1} \cdot u_v(T) = \frac{DF_1}{DB} \cdot u_v(T).$$

Pour les tubes **2** et **3**, les expressions sont semblables avec l'indice 1 remplacé par les indices 2 et 3.

Si nous chauffons les tubes **1** et **3** dont les volumes V et v restent constants, les points figuratifs décrivent les droites verticales $F_1F'_1$ et $F_3F'_3$ et DF_1 , tout comme BF_3 , tendent vers 0. Aux points F'_1 et F'_3 de la courbe de saturation, le fluide est tout entier dans le même état, liquide dans le premier cas, gazeux dans le second. Pour le tube **1**, l'échauffement fait monter le ménisque, pour le tube **3**, il le fait descendre. Les températures de disparition des ménisques sont celles des isothermes passant par F'_1 et F'_3 et ne peuvent qu'être inférieures à la température critique.

Expérience

Le tube de NATTERER dont nous disposons, objet de cette étude, est symbolisé sur la **Figure 2**, par le tube **2**.

Le volume massique de l'état représenté par F_2 , correspond au volume massique critique. Au cours de l'échauffement, le point figuratif décrit la droite F_2C jusqu'au point critique C .

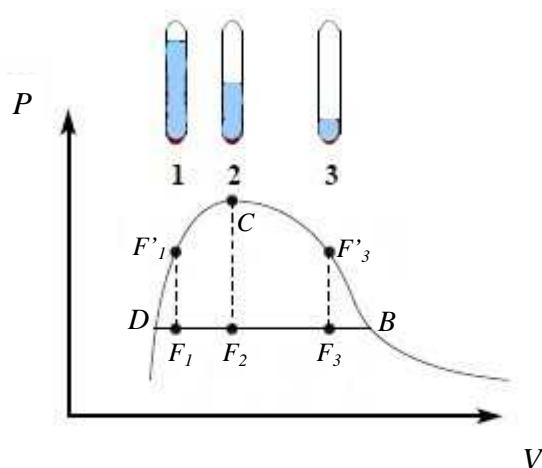
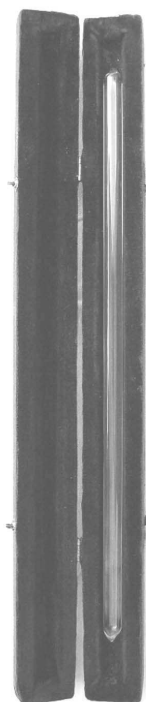


Figure 2 : Les tubes de NATTERER correspondant aux états représentés par F_1 , F_2 et F_3 .



Tube de NATTERER dans son étui

Or, au voisinage du point critique, $u_l(T)$ et $u_v(T)$ tendent vers une valeur commune tout comme BF_2 et DF_2 . F_2 restant également loin des deux branches de la courbe de saturation, ces deux segments demeurent approximativement égaux avant de s'annuler, c'est-à-dire que les volumes et les masses du liquide et de la vapeur demeurent voisins : $V_{l2} \approx V_{v2}$ et $m_{l2} \approx m_{v2}$, avant d'atteindre une limite commune. Le ménisque reste au milieu du tube et disparaît sur place. Mais auparavant, les densités du liquide et de la vapeur devenant presque égales, il se forme toujours une zone contenant un mélange et le ménisque cesse d'être net. L'expérience montre qu'il se produit en même temps dans cette zone une opalescence dite **opalescence critique** qui disparaît lorsque la température critique est atteinte.

Ce phénomène d'opalescence est la conséquence de fluctuations géantes de la densité du fluide au voisinage du point critique C : la matière "hésite" entre l'état liquide et l'état gazeux et en chaque point du fluide elle change sans cesse d'état. Aussi, la phase liquide et la phase gazeuse ayant, avant d'atteindre C , des indices optiques différents, la lumière qui traverse ce fluide peut-elle être fortement diffusée par les fluctuations de la taille de la longueur d'onde de la lumière visible.

Au-delà, le fluide est dans l'état supercritique.

L'ensemble peut être observé en se rendant sur le site d'adresse :

<https://www.youtube.com/watch?v=FL3aSJCcvg8>

Phénomène physique mis en jeu

➤ **Le point critique. L'état critique** d'un corps correspond à des conditions de température (température critique) et de pression (pression critique) telles que les états liquide et gazeux sont confondus.

BIBLIOGRAPHIE

BRUHAT G., *Thermodynamique*, Masson & Cie, Paris, 1962.