Zéro Absolue

Département de Physique, Université de Fribourg

Romain De Groote

21 novembre 2025

1 Introduction

Le zéro absolu est la température la plus basse possible pour un système thermodynamique selon la théorie de Lord Kelvin. En effet, selon la théorie cinétique des gaz, la température d'un gaz est proportionnelle à l'énergie cinétique moyenne des particules qui le composent. À mesure que la température diminue, l'énergie cinétique des particules diminue également, ce qui entraîne une diminution de la pression exercée par le gaz. En extrapolant cette relation linéaire entre la pression et la température, on peut déterminer la température à laquelle la pression devient nulle, ce qui correspond au zéro absolu. Cette température est de -273.15 degrés Celsius ou 0 Kelvin. Cependant, il a été démontré en pratique qu'il était possible d'atteindre des températures *inférieures* au zéro absolu en utilisant des systèmes quantiques particuliers, tels que des gaz atomiques refroidis par laser. Ces systèmes présentent des propriétés thermodynamiques inhabituelles, où la population des états d'énergie peut être inversée, conduisant à des températures négatives sur l'échelle Kelvin. Cependant, ces températures négatives ne signifient pas que le système est plus froid que le zéro absolu, mais plutôt qu'il possède une distribution d'énergie particulière qui diffère de celle des systèmes thermodynamiques classiques.

2 But de l'expérience

L'objectif de cette expérience est de déterminer la température T_0. Pour ce faire, on mesurera la pression d'un gaz idéal à différentes températures et extrapolera les résultats pour trouver la température à laquelle la pression devient nulle. De plus, la température d'ébullition du diazote T_{N_2} sera également déterminée à partir des données collectées. Cette expérience permettra de mieux comprendre les propriétés thermodynamiques des gaz idéaux et de valider la théorie cinétique des gaz.

3 Contexte théorique

Selon la loi des gaz parfaits, la pression P en bar, le volume V en L, la température du laboratoire T_R, la température du zéro absolu T_0 en °C et le nombre de moles $n = n' + n''$ d'un gaz idéal sont liés par les équations suivantes :

$$p_r V = n k_B (T_R - T_0) \tag{3.1}$$

$$\tag{3.2}$$

et où $k_B = 1.3806 \times 10^{-23} \mathrm{J\,K^{-1}}$ est la constante de Boltzmann.

3.1 Détermination du coefficient de volume non-immergé ρ

Le coefficient de volume non-immergé ρ est définit comme :

$$\rho \pm \delta\rho \equiv \frac{V'}{V} \pm \sqrt{\left(\frac{\delta V'}{V}\right)^2 + \left(\frac{V' \delta V}{V^2}\right)^2} \tag{3.3}$$

où V' est le volume non-immergé et V le volume total du gaz idéal.

3.2 Détermination de la température du zéro absolu T_0

On détermine la température du Zéro Absolu T_0 grâce à la relation linéaire entre la pression p_m et la température T :

$$T_0 \pm \delta T_0 = \frac{T_m(1+\rho(1-\lambda)) - \lambda T_R(1+3\alpha(T_m-T_R))}{(1-\lambda)(1+\rho) - 3\alpha\lambda(T_m-T_R)} \pm \sqrt{\sum_{k\in\{T_m,T_R,\lambda,\rho\}} \left(\frac{\partial T_0}{\partial k}\right)^2}\,[T_0] = {}^\circ\mathrm{C} \quad (3.4)$$

avec $\lambda = \frac{p_R}{p_m}$ le rapport entre la pression initiale p_R et la pression mesurée p_m, $\alpha = \frac{1}{T}$ le coefficient de dilatation thermique du gaz idéal, T_R la température du laboratoire, T_m la température mesurée et :

$$\begin{aligned}
\frac{\partial T_0}{\partial T_m} =& \frac{1}{1-\lambda}\delta T_m \\
\frac{\partial T_0}{\partial T_R} =& \frac{-\lambda}{1-\lambda}\delta T_R \\
\frac{\partial T_0}{\partial \lambda} =& \Bigg(- \frac{(-1-3\alpha(T_m-T_R)-\rho)(-\lambda T_R(1+3\alpha(T_m-T_R))\lambda T_m(1+3\alpha(T_m-T_R)) + \rho T_m(1+(1-\lambda)))}{(-3\alpha\lambda(T_m-T_R)+(1-\lambda)(1+\rho))^2} \\
& + \frac{-T_R(1+3\alpha(T_m-T_R)) - \rho T_m}{-3\lambda\alpha(T_m-T_R)+(1-\lambda)(1+\rho)}\Bigg)\delta\lambda \\
\frac{\partial T_0}{\partial \rho} =& \frac{-\lambda(T_m-T_R)}{(-3\alpha\lambda(T_m-T_R)+(1-\lambda)(1+\rho))^2}\delta\rho
\end{aligned}$$

3.3 Détermination de la température d'ébullition T_{N_2} du diazote

La température d'ébullition T_{N_2} du diazote est déterminée à partir de la relation :

$$T_{N_2} \pm \delta T_{N_2} = \frac{T_0(1-\lambda)(1+\rho) + \lambda T_R[1-3\alpha(T_R-T_0)]}{1+\rho(1-\lambda)-3\alpha\lambda(T_R-T_0)} \pm \sqrt{\sum_{k\in\{T_0,T_R,\lambda,\rho\}} \left(\frac{\partial T_0}{\partial k}\right)^2}\,[T_{N_2}] = {}^\circ\mathrm{C} \quad (3.5)$$

avec les mêmes notations que précédemment. De plus, $\frac{\partial T_{N_2}}{\partial T_0}$, $\frac{\partial T_{N_2}}{\partial T_R}$ et $\frac{\partial T_{N_2}}{\partial \lambda}$ sont les dérivées partielles de T_{N_2} où [1] :

$$\begin{aligned}
\frac{\partial T_{N_2}}{\partial T_0} =& \frac{(1-\lambda)(1+\rho)}{1+\rho(1-\lambda)-3\alpha\lambda(T_R-T_0)}\delta T_0 \\
\frac{\partial T_{N_2}}{\partial T_R} =& \frac{\lambda(1+3\alpha(T_R-T_0))}{1+\rho(1-\lambda)-3\alpha\lambda(T_R-T_0)}\delta T_R \\
\frac{\partial T_{N_2}}{\partial \lambda} =& \Bigg(\frac{(-1-\rho+3\alpha(T_R-T_0))(\lambda T_R(1-3\alpha(T_R-T_0)) + T_0(1-\lambda)(1+\rho))}{(1+\rho(1-\lambda)-3\alpha\lambda(T_R-T_0))^2} \\
& + \frac{-T_0(1+\rho)+T_R(1-3\alpha(T_R-T_0))}{1+\rho(1-\lambda)-3\alpha\lambda(T_R-T_0)}\Bigg)\delta\lambda \\
\frac{\partial T_{N_2}}{\partial \rho} =& \frac{-\lambda(T_0-T_R)}{(1+\rho(1-\lambda)-3\alpha\lambda(T_R-T_0))^2}\delta\rho
\end{aligned}$$

1. Les dérivées partielles ont été générées par Github copilot, bien qu'elles aient été vérifiées manuellement par la suite.

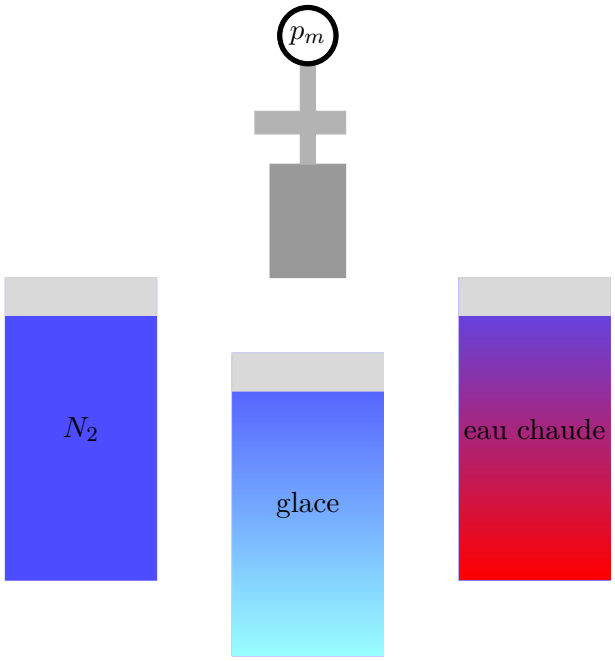


FIGURE 4.1 – Schéma du dispositif expérimental utilisé pour déterminer la température du zéro absolu T_0 et la température d'ébullition du diazote T_{N_2}. La chambre contenant le gaz idéal peut être immergée dans différents dewars pour atteindre les températures souhaitées. Le manomètre à colonne permet de mesurer la pression du gaz idéal à différentes températures.

Du point de vue théorique, la température d'ébullition du diazote peut être calculée grâce à la relation :

$$T_{N_2,\text{theo}} = -195.80\,^\circ\text{C} + 0.008266(p_{atm} - 1013.25\,\text{mbar})^\circ\text{C}\,\text{mbar}^{-1} \tag{3.6}$$

4 Déroulement de l'expérience

Afin de réaliser cette expérience, trois dewars sont utilisés, un contenant de l'azote liquide (N_2), un autre un mélange d'eau et de glace, et le dernier de l'eau bouillante. Le gaz idéal est contenu dans une chambre qu'il est possible de lever et de descendre afin de l'insérer dans les différents dewars. Un manomètre à colonne est placé sur la chambre afin de mesurer la pression du gaz idéal.

4.1 Estimation de ρ

Afin d'estimer la correction de volume ρ, le volume de gaz $V' = 4687\,\text{mm}^3$ est mesuré dans la tuyauterie qui ne sera pas immergée lors des mesures et le volume immergé est de $492\,651\,\text{mm}^3$.

4.2 Collecte des couples de valeurs p_m et T_m

Dans un premier temps, les mesures initiales du manomètre à colonne sont relevées comme ce dernier est extrêment sensible aux variations de pression. Ensuite, des couples de valeur (T_m, p_m) sont mesurés. Une en plaçant la chambre dans le mélange eau-glace et à d'autres températures : ces dernières sont atteintes en plaçant la chambre dans le dewars d'eau bouillante et en rajoutant progressivement de l'eau à température ambiente. Enfin, le système est séché et placé dans le dewar d'azote liquide. Les

pression et températures sont relévées. Cette étape est ensuite répétée une seconde fois an augmentant la quantité de gaz n dans la chambre. Enfin, le système est laissé se stabiliser à la température ambiente et les mesures finales du manomètre sont relevées. L'expérience est réalisée pour de l'air avec comme condition initiale une température de la pièce de $T_R = (22.3 \pm 0.1)\,°\text{C}$, une pression atmosphérique de $p_{atm} = (94.17 \pm 0.01)\,\text{kPa}$, une pression du system de $p_R = (4.259 \pm 0.001)\,\text{bar}$ et des mesures effectuées aux températures de 0.1 °C, 64.8 °C, 69.1 °C, 75.0 °C, 79.9 °C, 85.2 °C ; et pour de l'hélium He avec comme condition initiale une température de la pièce de $T_R = (23.6 \pm 0.1)\,°\text{C}$, une pression atmosphérique de $p_{atm} = (95.15 \pm 0.01)\,\text{kPa}$, une pression du system de $p_R = (9.232 \pm 0.001)\,\text{bar}$ et des mesures effectuées aux températures de 0.1 °C, 63.1 °C, 69.9 °C, 74.6 °C, 79.7 °C, 85.5 °C.

4.3 Vérification de la linéarité de la relation entre p et T

On vérifie la linéarité de la relation entre T et p en plotant le graphique dans un outil de régression linéaire. Cela nous permet également de trouver la valeur du zéro absolu T_0 en extrapolant la droite jusqu'à l'axe des abscisses ou en utilisant 3.5.

4.4 Détermination de la température d'ébullition du N_2

Grâce aux données collectées en 4.2, on peut déterminer la température d'ébullition du diazote T_{N_2} pour les pressions mesurées aussi bien pour l'air $p_m = 1.182\,\text{bar}$ que pour l'hélium $p_m = 2.486\,\text{bar}$ et on peut alors la comparer à la valeur théorique.

5 Résultats

5.1 Approximation de ρ

Grâce à l'équation 3.3, on détermine la valeur de la correction de volume ρ :

$$\rho = 0.0095 \tag{5.1}$$

5.2 Détermination de la température du zéro absolu T_0

En utilisant l'équation 3.4, on détermine la valeur de la température du zéro absolu T_0 en prenant la moyenne des valeurs obtenues pour l'air puis pour l'hélium :

$$T_{0,\text{air}} = (-283.557 \pm 12.276)\,°\text{C} \qquad T_{0,\text{He}} = (-276.772 \pm 3.195)\,°\text{C} \tag{5.2}$$

5.3 Vérification de la linéarité de la relation entre p et T

En effectuant les regressions linéaire pour les mesures effectuées avec de l'air et avec de l'hélium, la relation de linéarité entre la pression p et la température T est vérifiée. De plus, il est possible d'extraire les valeurs de T_0 à partir des intersections avec l'axe des abscisses :

$$T_{0,\text{air}} = -298.704\,°\text{C} \qquad T_{0,\text{He}} = -286.727\,°\text{C} \tag{5.3}$$

5.4 Détermination de la température d'ébullition du diazote T_{N_2}

En utilisant l'équation 3.5, on détermine la valeur de la température d'ébullition du diazote T_{N_2} pour la mesure effectuée avec de l'air et pour celle effectuée avec de l'hélium :

$$T_{N_2,\text{air}} = (-200.000 \pm 8.997)\,°\text{C} \qquad T_{N_2,\text{He}} = (-197.351 \pm 2.382)\,°\text{C} \tag{5.4}$$

Du point de vue théorique (3.6), la température d'ébullition du diazote aurait dû être de :

$$T_{N_2,\text{air,theo}} = -195.59\,^\circ\text{C} \qquad T_{N_2,\text{He,theo}} = -195.51\,^\circ\text{C} \tag{5.5}$$

6 Discussion

De façon générale, les résultats obtenus pour la globalité de l'expérience sont cohérentes avec les valeurs de la litérature. En effet, L'erreur relative entre la valeur théorique du zéro absolu et celle de l'air est de 3%, et pour l'hélium de 1%. De plus, les valeurs obtenues par régression linéaire ont des erreurs relative de 9% pour l'air et 5% pour l'hélium. Il possible de remarquer que les valeurs obtenues avec l'hélium sont plus précises que celles obtenues avec l'air. Cela peut être dû au fait que l'hélium est un gaz noble, ce qui le rend plus proche du modèle de gaz idéal utilisé dans les calculs. En ce qui concerne la température d'ébullition du diazote, en comparant les valeurs obtenues expérimentalement, l'erreur relative pour l'air est de 2% et celle de l'hélium de 0.9%. Encore une fois, la valeur obtenue avec l'hélium est plus précise que celle obtenue avec l'air, ce qui renforce l'idée que les gaz nobles sont plus adaptés pour ce type d'expérience.

7 Conclusion

En conclusion, cette expérience a permis de déterminer la température du zéro absolu T_0 et la température d'ébullition du diazote T_{N_2} en utilisant des mesures de pression et de température d'un gaz idéal. Les résultats obtenus sont cohérents avec les valeurs théoriques. Comme il a été possible d'observer que les gaz nobles, comme l'hélium, fournissent des résultats plus précis, il serait intéressant de répéter l'expérience avec d'autres gaz nobles pour confirmer cette observation. Dans la globalité, cette expérience a été un franc succès.

8 Annexes

- Absolute Zero
- Graphique 1 : Air ambiant
- Graphique 2 : Hélium