

Série 11 : Clausius-Clapeyron et phénomènes de transport

Exercice 1 : Retour à Clausius-Clapeyron

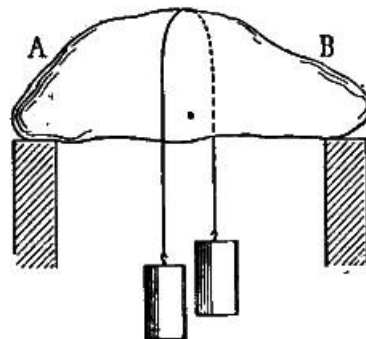
A partir de l'égalisation de l'enthalpie libre G pour les phases vapeur et liquide, nous avons démontré en cours que, lors de la liquéfaction, la pression du liquide p_L dépend de la température selon la loi de Clausius-Clapeyron :

$$\frac{dp_L}{dT} = \frac{mL}{T(V_V - V_L)}$$

où L est la chaleur latente de liquéfaction, V_V le volume de la phase vapeur et V_L le volume de la phase liquide. Retrouvez l'équation de Clausius-Clapeyron par une deuxième méthode, en partant de l'expression de la chaleur échangée sur le palier de liquéfaction en fonction de la variation d'entropie, et en utilisant les propriétés des dérivées des fonctions d'état S et F par rapport à leurs variables naturelles.

Exercice 2 : Vous reprendrez bien une tranche de cake... glacé ?

Un bloc de masse M est attaché par un fil d'acier, que l'on peut considérer de section carrée de 0.6 mm de côté et qui passe autour d'un cylindre de glace à -2°C . Le cylindre a un diamètre de 8 cm et on peut considérer que le fil d'acier appuie uniformément sur sa moitié supérieure. Calculez la valeur minimale de la masse M pour que le fil commence à descendre lentement en passant à travers la glace (comme nous l'avons vu lors d'une expérience en cours).



Indications : Négligez la chaleur transmise de l'environnement à la glace et celle qui lui est transmise par conduction à travers le fil. Chaleur latente de fusion de la glace $L_f = 333.6 \text{ kJ kg}^{-1}$, densité de l'eau $\rho = 1 \text{ g cm}^{-3}$. Souvenez-vous que 4/5 d'un glaçon à -2°C sont immergés lorsque le glaçon est placé dans l'eau.

Exercice 3 : L'oasis

Après une traversée du désert à dos de chameau, vous arrivez dans une oasis où un marchand vend du lait de noix de coco frais. Les parois en polystyrène (de conductivité thermique $k = 0.01 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$) de la glacière du marchand ont une épaisseur de 2.0 cm et une surface totale de 0.8 m^2 en incluant le couvercle. La glacière est remplie de glace, d'eau et de bouteilles de lait de noix de coco.

- a) Quel est le taux de conduction de la chaleur à travers les parois de la glacière, c'est-à-dire la quantité d'énergie thermique traversant les parois par seconde, si la température dans l'oasis est de 40°C (à l'ombre) ?

- b) Quelle masse de glace fond en une journée (12 heures), sachant que la chaleur latente de fusion de la glace vaut $L_f = 333.6 \text{ kJ/kg}$?

Exercice 4 : D'Seegfrörni⁽¹⁾

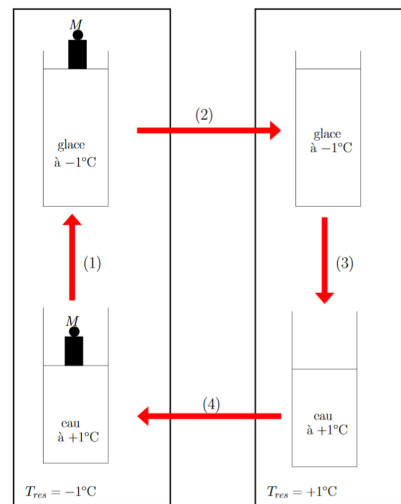
Pendant l'hiver 1962-63, la surface du lac de Zurich a complètement gelé sur une épaisseur de $D = 25 \text{ cm}$ en moyenne. Supposons que la température de l'air pendant le gel était constamment $T_{\text{air}} = -15^\circ\text{C}$ et celle de l'eau et de la glace formée à $T_{\text{eau}} = 0^\circ\text{C}$. La chaleur libérée par l'eau qui gèle à l'interface eau-glace est conduite à travers la couche de glace jusqu'à l'interface glace-air. Combien de temps t_D a-t-il fallu pour former cette couche de glace ?

Indications : Densité massique de la glace $\rho_{\text{glace}} = 917 \text{ kg m}^{-3}$, chaleur latente de fusion de la glace $L_f = 333.6 \text{ kJ kg}^{-1}$, conductibilité thermique de la glace $k = 2 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Exercice 5 : Un moteur d'eau et de glace

Un inventeur propose de construire un moteur thermique en utilisant de l'eau et de la glace, et en particulier le fait que l'eau augmente de volume quand elle gèle. Il pose un poids de masse M sur un piston qui appuie sur un cylindre de section S_0 contenant un volume V d'eau à $+1^\circ\text{C}$. Le cycle du moteur se décompose en 4 étapes :

1. Le système est placé en contact thermique avec un réservoir à -1°C , jusqu'à ce que toute l'eau gèle à cette température. L'augmentation de volume soulève le poids.
2. A température constante, le poids est enlevé (on est à la pression atmosphérique p_0), et le système est mis en contact avec un réservoir à $+1^\circ\text{C}$.
3. Au contact du réservoir chaud, la température augmente : la glace fond, l'eau redevient liquide et se réchauffe jusqu'à $+1^\circ\text{C}$.
4. A température constante, on remet le poids et on met le système en contact avec le réservoir froid (on revient au point de départ).



- a) Dans un diagramme $p - T$, dessinez le cycle décrit et représentez la variation de pression en fonction de la température à la transition de phase glace-eau.
- b) L'inventeur recommence son cycle avec un poids de masse $2M$ et prétend que le travail accompli par son moteur a doublé par rapport au cas précédent pour un "prix à payer" identique. L'inventeur conclut donc que son moteur peut accomplir une quantité illimitée de travail au prix d'une quantité limitée de chaleur échangée. Où est la faute dans sa conclusion ?
- c) Utilisez la relation de Clausius-Clapeyron pour démontrer que l'efficacité de ce moteur est donnée par la formule de Carnot : $\eta = 1 - T_L/T_H$ dans la limite où $T_H - T_L \rightarrow 0$, lorsque la masse est ajustée de telle sorte que $\Delta p/\Delta T \rightarrow dp/dT$.

1. Expression zurichoise exprimant le fait que la surface du lac a gelé.