

# TD – Corps pur sous plusieurs phases

**Remarque** : exercice avec  $\star$  : exercice particulièrement important, à maîtriser en priorité (de même que les exemples de questions de cours des “ce qu’il faut savoir faire”) [● ○ ○] : difficulté des exercices

## I Stockage des fluides \_\_\_\_\_ [● ○ ○]

Le principal danger du stockage des fluides est l’explosion. Nous étudions dans un premier temps le cas du dioxyde de carbone, dont on donne le diagramme de Clapeyron ci-dessous. La température du point critique du  $\text{CO}_2$  est  $T_c = 304 \text{ K}$ , soit  $31 \text{ }^\circ\text{C}$ , supérieure à la température ambiante qu’on prendra égale à  $17 \text{ }^\circ\text{C}$ .

La bouteille en acier contenant le fluide est indéformable. Elle peut résister à une pression de 90 bar.

1 - On envisage de le stocker **sous forme gaz**, sous 30 bar.

**a** - Placer le point qui représente l’état du système dans le diagramme de Clapeyron (on rappelle que  $T = 17 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Que valent le volume massique et la masse volumique du système ?

**b** - On envisage une augmentation de température de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  (exposition au Soleil par exemple).

La bouteille contenant le fluide étant indéformable, le volume massique  $v$  change-t-il ?

Tracer alors l’évolution du système dans le diagramme. Quelle est la pression finale ?

Il n’y a ainsi pas de problème d’augmentation trop importante de pression. Mais en revanche, la masse volumique n’est pas très importante et le stockage nécessite donc un volume très important.

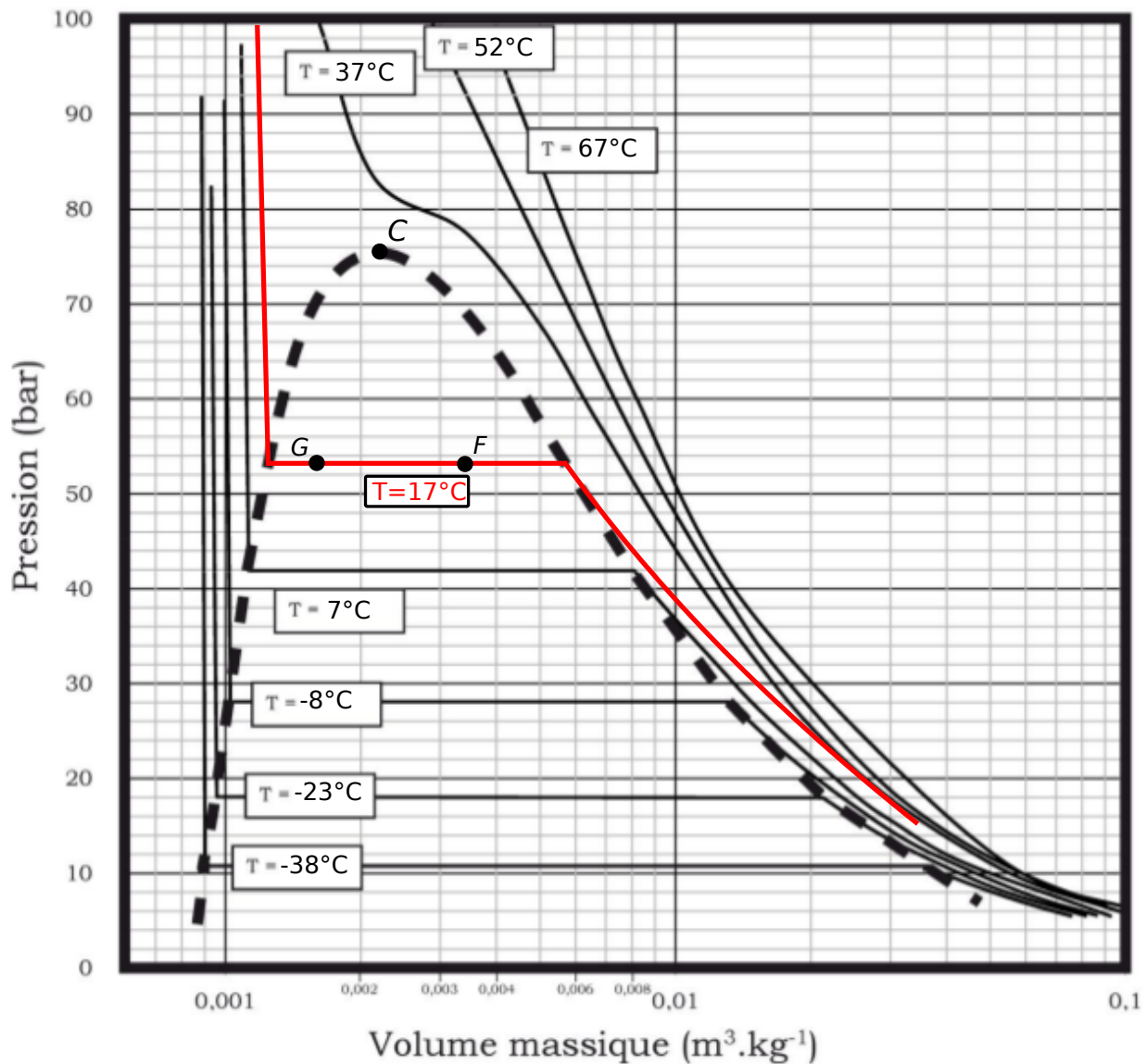
2 - Pour le stocker de façon compacte, on choisit une masse volumique plus importante, donc un volume massique plus faible. Toujours à  $17 \text{ }^\circ\text{C}$ , on envisage un stockage **sous forme liquide et vapeur à la fois**, représentée par le point  $F$  sur le diagramme.

**a** - Pour une augmentation de température de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , tracer l’évolution du système dans le diagramme. Quelle est la pression finale ?

**b** - Même question si on choisit une proportion de liquide initiale plus importante (point  $G$  sur le diagramme).

3 - Enfin, le plus efficace en terme de place est de le stocker **sous forme entièrement liquide**. À la température ambiante de  $17 \text{ }^\circ\text{C}$ , nous choisissons une pression de 60 bar.

- a - Placer le point qui représente l'état du système dans le diagramme de Clapeyron.
  - b - Pour une augmentation de température de  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , tracer l'évolution du système dans le diagramme. Quelle est la pression finale ?
- 4 - En conclusion, sous quelle forme est-il plus avantageux de stocker un fluide comme le  $\text{CO}_2$  pour lequel  $T_{\text{ambiante}} < T_{\text{critique}}$ , et dans quelle zone du diagramme faut-il se placer ?
- 5 - Il y a des cas où la température ambiante est supérieure à la température critique du fluide ( $\text{N}_2$  où  $T_C = -147\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{H}_2$  où  $T_C = -240\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ...). Y a-t-il des précautions du même type que précédemment à prendre dans ce cas là ?

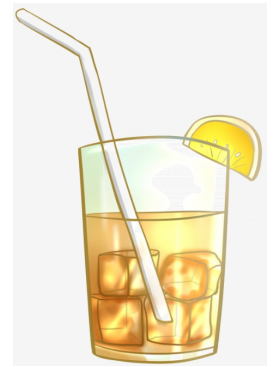


## II Boisson rafraîchissante



Il fait chaud ( $30^\circ\text{C}$ !) et on a malheureusement oublié de mettre la bouteille de jus d'orange au frais.

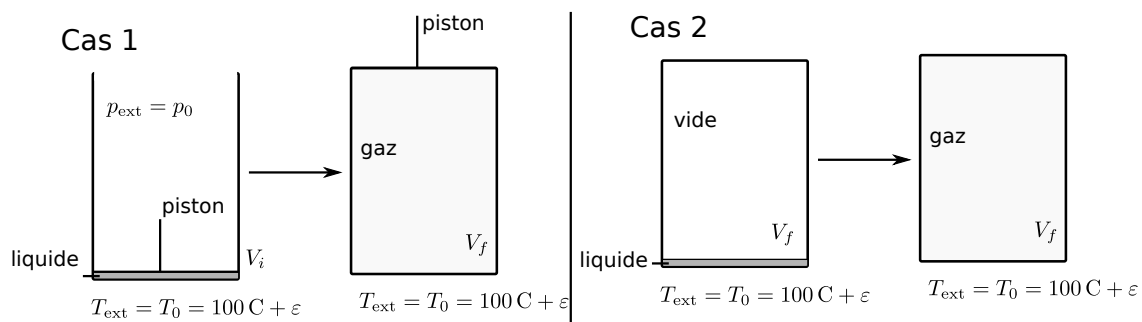
On dispose heureusement d'un congélateur ( $-15^\circ\text{C}$ ) et de glaçons, mais en nombre restreints. Quelle masse de glaçons faut-il ajouter dans un verre de 20 cl pour que le jus d'orange soit à  $0^\circ\text{C}$  (entièrement liquide et sans reste de glace) ?



On prendra  $c = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  pour l'eau liquide et  $c = 2,06 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  pour la glace. On donne également l'enthalpie massique de fusion de l'eau sous 1 bar  $l_{\text{fus}} = 330 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ , et l'enthalpie massique de vaporisation de l'eau sous 1 bar  $l_{\text{vap}} = 2265 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

**Indice :** Décomposer la transformation en étapes (glace+liquide  $\rightarrow$  glace+liquide tous à  $0^\circ\text{C}$   $\rightarrow$  liquide+liquide tous à  $0^\circ\text{C}$ ) et utiliser  $\Delta H$ . Supposer que la transformation est assez rapide pour négliger les échanges thermiques avec le milieu extérieur.

## III Vaporisation réversible ou irréversible



1 - Une masse  $m = 1.0 \text{ kg}$  d'eau liquide est contenue dans un récipient fermé par un piston à  $T = 100^\circ\text{C}$  sous une pression  $p_0 = 1,0 \text{ bar}$ . Le volume initial est tel que l'eau liquide prend tout l'espace.

L'ensemble est placé dans un thermostat à  $T_0 = 100^\circ\text{C} + \varepsilon$  avec  $\varepsilon > 0$  négligeable.

On laisse le piston libre de se déplacer sans frottement. On constate que l'eau se vaporise progressivement, ce qui entraîne une augmentation du volume et un déplacement lent du piston. On le bloque dès que la vaporisation de l'eau est complète.

Calculer les volumes initiaux et finaux, la variation d'enthalpie, le transfert thermique fourni par le thermostat, le travail échangé, les variations d'énergie interne et d'entropie, ainsi que l'entropie créée.

2 - On réalise une seconde expérience : on place directement la masse  $m$  d'eau liquide, prise à  $T = 100^\circ\text{C}$ , dans un récipient thermostaté à  $100^\circ\text{C}$  initialement vide, supposé indéformable, et de volume  $V_f$  identique au volume final atteint dans l'expérience 1. L'eau s'y vaporise instantanément.

Déterminer les mêmes grandeurs que pour la première expérience.

3 - Vérifier que  $(T_0 S_{\text{créée}})_{\text{expérience 2}} = |W|_{\text{expérience 1}}$ .

**Données :**  $v_g = 1.67 \text{ m}^3/\text{kg}$  pour le volume massique de l'eau sous forme de vapeur saturée à  $100^\circ\text{C}$ ,  $v_l = 1,0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$  pour celui de l'eau liquide, et  $\Delta h_{\text{vap}} = 2.25 \text{ MJ/kg}$  pour l'enthalpie massique de vaporisation de l'eau sous  $100^\circ\text{C}$ .

## IV Jean Perrin [●●○]

Dans son livre "Les atomes", Jean Perrin (prix Nobel de physique 1926) explique que "si on fond de la glace en refroidissant du mercure de  $100^\circ\text{C}$  à  $0^\circ\text{C}$ , on trouve toujours 42 g de glace fondue par kilogramme de mercure employé, que l'on opère par contact ou par rayonnement ou de toute autre manière."

Il est sous-entendu que l'expérience est réalisée dans une enceinte calorifugée, sous pression  $p_0 = 1.0 \text{ bar}$  constante.

Vérifier par un calcul que Jean Perrin a bien raison.

**Données :**

- Capacités thermiques massiques de la glace :  $c_{\text{gl}} = 2.06 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ , de l'eau liquide :  $c_{\text{liq}} = 4.18 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ , du mercure liquide :  $c_{\text{Hg}} = 0.139 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ .
- Enthalpies massiques de fusion et de vaporisation de l'eau :  $\Delta h_{\text{fus}}(0^\circ\text{C}) = 334 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $\Delta h_{\text{vap}}(100^\circ\text{C}) = 2265 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ .