

## Changements d'état du corps pur

## QUESTIONS DE COURS

- ↪ Représenter le diagramme  $(P, T)$  d'un corps pur (faire apparaître le point triple et le point critique ainsi que les phases) et donner le nom des changements d'état possibles. Quelle est la particularité du diagramme de l'eau ?
- ↪ Représenter les isothermes d'Andrews sur le diagramme de Clapeyron ( $T = T_c$ ,  $T > T_c$ ,  $T < T_c$ ) et faire apparaître les courbes de rosée et d'ébullition, la phase liquide, la vapeur saturante et la vapeur sèche.
- ↪ Qu'est-ce que la pression de vapeur saturante ? Préciser la composition du mélange si  $P = P_{sat}$ ,  $P > P_{sat}$ ,  $P < P_{sat}$ .
- ↪ Définir le titre en vapeur et le titre en liquide et énoncer le théorème des moments qui permet de le calculer.
- ↪ Définir l'enthalpie et l'entropie massique de changement d'état. Quelle est la relation entre ces deux grandeurs ?

- ▷ capacité thermique massique de l'eau liquide :  $c_{eau} = 4,18 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- ▷ capacité thermique massique de la glace :  $c_{glace} = 2,06 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- ▷ enthalpies massiques à pression atmosphérique normale pour l'eau :  $\ell_{fus} = 334 \text{ kJ.kg}^{-1}$  et  $\ell_{vap} = 2660 \text{ kJ.kg}^{-1}$

## SAVOIR-FAIRE

Les AD 1 et 2 sont à savoir refaire sans problèmes ! Savoir lire un diagramme de phases est indispensable pour aborder sereinement des processus de changement d'état.

## Savoir-faire 1 - Utiliser le théorème des moments ↪ AD2

On considère une citerne d'argon pressurisé, composé d'argon liquide et d'argon sous forme gazeuse. Dans ces conditions de stockage, le mélange a une masse  $m = 180 \text{ kg}$  et un volume  $V = 100 \text{ m}^3$ .

Par ailleurs, dans ces conditions de stockage, l'argon liquide occupe un volume de  $0,7 \text{ L.kg}^{-1}$  et l'argon gazeux  $592 \text{ L.kg}^{-1}$ .

Exprimer la fraction massique  $w_l$  d'argon liquide et la fraction massique  $w_v$  de l'argon vapeur.

## Savoir-faire 2 - Imaginer un chemin fictif pour déterminer un état final ↪ AD3

Il commence à faire un peu 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 ( $-18^\circ\text{C}$ ) et de glaçons, mais en nombre restreints. Quelle masse de glaçons faut-il ajouter dans un verre de  $20 \text{ cL}$  pour que le jus d'orange soit à  $0^\circ\text{C}$  (entièrement liquide et sans reste de glace) ?

On supposera que la transformation est assez rapide pour négliger les échanges thermiques avec le milieu extérieur (hypothèse peut-être un peu forte, je le reconnais...).

## LES INCONTOURNABLES

Exercices à maîtriser pour pouvoir appréhender sereinement un sujet de changement d'état. Le SF2 comme les AD2 et 3 sont des exercices incontournables de ce chapitre !

## Exercice 1 : 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  $(T_0 S_{\text{créée}})_{\text{expérience 2}} = |W|_{\text{expérience 1}}$ .

On donne :

- $v_g = 1,67 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  le volume massique de l'eau sous forme de vapeur saturée à  $100^\circ\text{C}$  ;
- $v_l = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  le volume massique de l'eau sous forme de vapeur saturée à  $100^\circ\text{C}$ .

### POUR S'ENTRAÎNER

*On approfondit le savoir-faire 2 et on revient sur les machines thermiques.*

#### Exercice 2 : Mélange eau/glace

Dans une enceinte adiabatique déformable, on place une masse  $m_1 = 500 \text{ g}$  d'eau liquide à la température  $T_1 = 15,0^\circ\text{C}$  et une masse  $m_2 = 150 \text{ g}$  de glace à la température  $T_2 = -5,00^\circ\text{C}$ .

- 1/ Quels sont les états finaux possibles ?
- 2/ On suppose dans un premier temps que toute la glace a fondu. Calculer la température finale  $T_F$ . Conclure.
- 3/ Calculer le titre massique de glace dans le cas où il reste de l'eau sous forme de glace.
- 4/ Calculer la variation d'entropie  $\Delta S$  du système global.

### POUR ALLER PLUS LOIN

*Exercice à chercher car ce thème est au programme. En s'appuyant sur les notions du chapitre, il faut traiter la thématique du stockage des fluides.*

#### Exercice 3 : Application au 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  $31^\circ\text{C}$ , supérieure à la température ambiante qu'on prendra égale à  $17^\circ\text{C}$ .

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  $T = 17^\circ\text{C}$ ). Que valent le volume massique et la masse volumique du système ?
  - (b) On envisage une augmentation de température de  $20^\circ\text{C}$  (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  $17^\circ\text{C}$ , 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  $20^\circ\text{C}$ , 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  $17^\circ\text{C}$ , 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  $20^\circ\text{C}$ , 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  $T_C = -147^\circ\text{C}$ ,  $\text{H}_2$  où  $T_C = -240^\circ\text{C}$ , ...). Y a-t-il des précautions du même type que précédemment à prendre dans ce cas là ?

