

TD 21 – CHANGEMENT D'ÉTAT

1.

Évaporation de l'eau

Dans une pièce hermétiquement fermée, de volume $V = 40 \text{ m}^3$, on place un récipient contenant un volume $V_0 = 200 \text{ mL}$ d'eau liquide.

L'air de la pièce est à la pression $P_0 = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ et à la température $T_0 = 20^\circ\text{C} = 293 \text{ K}$. Son degré d'hygrométrie est $H = 60\%$. H est le rapport de la pression partielle de l'eau divisée par la pression de vapeur saturante de l'eau, valant dans ces conditions $P_{sat}(20^\circ\text{C}) = 2,3 \text{ kPa}$. On assimile l'eau à un gaz parfait de masse molaire $M = 18 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

1. Calculer la quantité d'eau initialement contenue dans l'atmosphère de la pièce.
2. Montrer que toute l'eau contenue dans le verre s'évapore. Quel est le degré d'hygrométrie final de l'air de la pièce ?
3. Quel volume d'eau liquide faut-il évaporer pour saturer la pièce en eau ?

2. Cognac hors d'âge

Il ne reste plus qu'un fond dans une bouteille de cognac hors d'âge : un dixième du volume.

Sa teneur en alcool initiale est de 45% (il s'agit d'un titre volumique : à partir d'1 L de boisson, on extrait par distillation totale 450 mL d'éthanol pur).

Ne voulant pas terminer bouteille, son propriétaire se contente d'en ôter le bouchon régulièrement pour apprécier le parfum du cognac, puis la rebouche.

Combien de fois peut-il procéder ainsi avant que son très cher cognac ait perdu tout son alcool ?

Données : Caractéristiques de l'éthanol

Formule brute $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ($M_0 = 46 \text{ g/mol}$) - Masse volumique $\rho = 0,79 \text{ kg/L}$ - Pression de vapeur saturante $P^* = 58 \text{ hPa}$ à la température ambiante (20°C).

L'atmosphère ne joue pas de rôle ici et on supposera pour simplifier que l'évaporation de l'alcool ne change plus le volume du liquide dans la bouteille. (Est-ce que cela change beaucoup la conclusion ?).

Les vapeurs d'alcool sont assimilables à un gaz parfait et leur départ du liquide est lent.

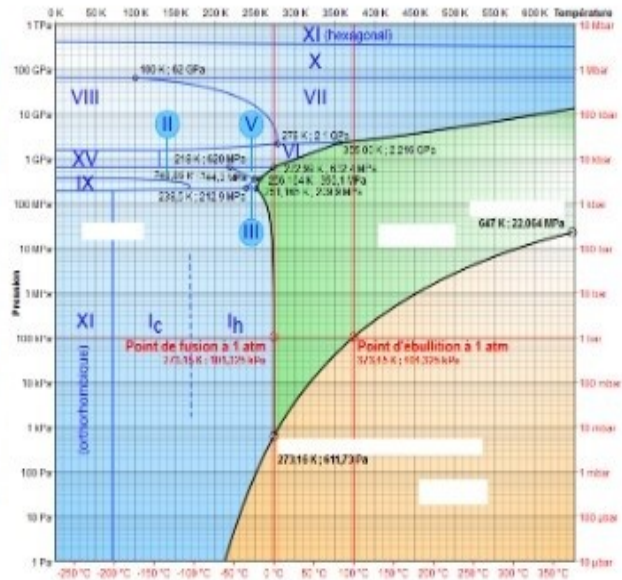
3. Équilibre dans une chaudière

On modélise une chaudière par un cylindre vertical de section S et de hauteur L contenant de l'eau de masse molaire M sous forme de vapeur et sous forme liquide supposée incompressible et indilatable, de masse volumique $\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$. Initialement, l'ensemble est à l'équilibre à 100°C et le liquide atteint alors la hauteur h . On porte l'ensemble à la température 200°C et la hauteur du liquide baisse de x . On donne $L = 1,0 \text{ m}$.

1. Diagramme de phases, diagramme de Clapeyron

1.1 Rappelez les noms de six transformations entre les différents états de la matière. Identifiez sur le diagramme de phases de l'eau les domaines d'existence de l'eau sous forme solide, liquide et sous forme de vapeur. À votre avis, à quoi correspondent les zones numérotées en chiffres romains ?

1.2 Définissez la pression de vapeur saturante et précisez de quels paramètres elle dépend. En vous intéressant plus particulièrement au passage du liquide à la vapeur, représentez le diagramme donnant la pression en fonction du volume pour la transformation correspondante en faisant figurer les courbes de rosée et d'ébullition et en précisant la nature des différents domaines.



2. Étude d'une chaudière

Pour $100^\circ\text{C} \leq T \leq 200^\circ\text{C}$, la pression de vapeur saturante de l'eau en bars est donnée par la formule empirique approximative de Duperray :

$$P_{\text{sat}} = \left(\frac{T(^{\circ}\text{C})}{100} \right)^4$$

2.1 Réalisez un schéma de la chaudière à 100°C et à 200°C . Calculez les pressions de vapeur saturante de l'eau à ces deux températures P_1 et P_2 .

2.2 Le niveau initial de liquide est $h = 10 \text{ cm}$. On porte la chaudière à la température de 200°C . En supposant qu'il reste du liquide, calculez la baisse x du niveau d'eau.

2.3 Déterminez complètement l'état final de l'eau lorsque le niveau initial de liquide est $h = 5,0 \text{ mm}$. Reste-t-il de l'eau à l'état liquide ? Commentez le résultat obtenu sachant que la pression maximale dans une chaudière du commerce est $P_{\text{max}} = 0,6 \text{ MPa}$.

4. Équilibre diphasé

Un récipient contient des volumes égaux d'eau liquide et de vapeur d'eau pure, à la pression de 1 atmosphère.

En modélisant l'eau vapeur comme un gaz parfait, déterminer les titres massiques en liquide et en vapeur.

Étude de l'air humide d'après CCP PC

L'air humide est un mélange d'air sec et de vapeur d'eau, les caractéristiques de l'air humide étant liées aux proportions de chacun des constituants. Dans ce problème, on étudie l'air humide sous la pression atmosphérique $P = 1,013 \cdot 10^5$ Pa en supposant que l'air sec et la vapeur d'eau se comportent comme des gaz parfaits. On donne la masse molaire de l'air sec $M_a = 29 \text{ g.mol}^{-1}$, celle de l'eau $M_v = 18 \text{ g.mol}^{-1}$, la capacité thermique massique de l'air sec $c_{pa} = 1006 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$, celle de l'eau sous forme de gaz $c_{pv} = 1923 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$, la chaleur latente massique de vaporisation de l'eau $l = 2500 \text{ kJ.kg}^{-1}$ et les pressions de vapeur saturante de l'eau en fonction de la température :

| | | | | | | | | | |
|----------------------------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| $\theta(^{\circ}\text{C})$ | 0,0 | 5,0 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 45 |
| P_{vs} (Pa) | 610 | 880 | 1227 | 1706 | 2337 | 3173 | 4247 | 7477 | 9715 |

On définit la pression partielle P_a de l'air sec dans un volume V d'air humide à la température T comme la pression de l'air sec dans le même volume et à la même température. On fait de même pour la pression partielle de la vapeur d'eau P_v . Compte tenu de l'hypothèse que les deux sont assimilés à des gaz parfaits, la pression P de l'air humide vérifie $P = P_a + P_v$.

1. Soit m_a la masse d'air sec contenue dans le volume V d'air humide à la température T . Montrer qu'on peut écrire $P_a V = m_a R_a T$ où R_a est une constante à exprimer en fonction de R et M_a . Donner sa valeur numérique.

2. Montrer qu'il en est de même pour la vapeur d'eau.

3. On définit l'humidité spécifique ω de l'air humide à la température T comme le rapport de la masse de vapeur d'eau contenue dans le volume V d'air humide à la masse d'air sec contenue dans ce même volume. Établir qu'elle s'exprime sous la forme $\omega = A \frac{P_v}{P - P_v}$ en donnant l'expression et la valeur numérique de la constante A .

4. La sensation de se trouver dans un air sec ou humide est liée au degré hygrométrique ou humidité relative $\varepsilon = \frac{P_v}{P_{vs}}$. Calculer les masses m_a d'air sec et m_v de vapeur d'eau d'un mètre cube d'air humide à 15°C et de degré hygrométrique 0,85.

5. Un air humide tel que $\varepsilon = 1$ ne peut plus accepter d'eau sous forme vapeur. L'eau supplémentaire se présente alors sous forme de gouttelettes d'eau suffisamment fines pour rester en suspension formant ainsi un brouillard. Tracer précisément la courbe représentative de l'air humide saturé dans le diagramme de Carrier donnant ω en fonction la température θ . Indiquer, en la justifiant, la zone de brouillard sur ce diagramme.

6. La température de rosée est la température de l'air humide saturé en humidité. On peut la mesurer par un hygromètre à condensation : on place dans l'air humide une petite surface dont on fait varier la température jusqu'à l'apparition sur celle-ci de condensat (rosée ou buée), la température de la surface est alors celle du point de rosée. Calculer le degré hygrométrique d'un air humide à une température de 30°C dont la température de rosée est égale à 10°C .