

CONCOURS ESIM Entrepreneur Industrie - Session 2001

Filière PC

EPREUVE DE PHYSIQUE I

Durée : 4 heures
Calculatrices autorisées

OBTENTION D'EAU DOUCE PAR DISTILLATION DE L'EAU DE MER

Irriguer les déserts ou fournir de l'eau potable à des villes de plus en plus peuplées, un vieux rêve de l'humanité...l'eau est toujours d'actualité .

De 18 millions de m^3 /jour en 1993, la capacité mondiale de dessalement (eau de mer ou eau saumâtre) devrait atteindre plus de 25 millions m^3 /jour en 2004 ; déjà 12500 usines de dessalement fonctionnent dans plus de 120 pays. Mais même s'ils ont tendance à baisser, les coûts restent 3 à 4 fois plus élevés que l'approvisionnement en ressources naturelles . Plusieurs Instituts de recherche et entreprises travaillent au développement de procédés particulièrement prometteurs et des solutions nouvelles font espérer que cette technique jouera un rôle de plus en plus important dans l'avenir .

On s'intéresse dans ce problème, au dessalement utilisant la vaporisation et la condensation.

La distillation est effectuée dans une enceinte calorifugée (fig 1) . Le chauffage de l'eau de mer (partie basse, bouilleur) permet son ébullition (à T_e) . La vapeur d'eau est liquéfiée dans la partie haute sur des tubes parcourus par l'eau de mer entrant en A, provenant de l'extérieur, (condenseur), l'eau douce est ensuite pompée vers l'extérieur (en S) . L'air a été chassé de l'enceinte et le seul gaz présent est la vapeur d'eau créée par le bouilleur (à T_e, P_e) . L'eau de mer contenue dans l'enceinte sera assimilée à de l'eau douce (même capacité thermique massique c (indépendante de T), etc....) .

On ne s'intéresse qu'au régime permanent .

LE CONDENSEUR .

Débit de masse d'eau de mer D_m , débit de masse d'eau douce D_e .

Température de l'eau de mer en A : T_A , à la sortie du condenseur en B : T_B .

1 - Préciser la température de l'eau douce condensée et sa température à la sortie du condenseur en S.

2 - Exprimer la variation d'enthalpie pour l'eau de mer du tube AB pendant une durée dt , en fonction de D_m, c, T_A et T_B .

Déterminer de même la variation d'enthalpie de l'eau qui se condense pendant dt , en fonction de D_e et $L(T_e)$ (enthalpie massique de vaporisation de l'eau de à T_e) .

En déduire la relation $T_B = T_A + (D_e \cdot L(T_e)) / (D_m \cdot c)$.

3 - On modélise le condenseur par un tube cylindrique en acier de rayon a , de longueur d et d'épaisseur $e \ll a$.

Soit $\vec{j} = -\lambda \overline{\text{grad}} T$ le vecteur densité de courant thermique (loi de Fourier).

Montrer qu'en régime permanent, conservatif, \vec{j} est à flux conservatif.

Justifier : $\vec{j} = j(r) \cdot \vec{u}_r$ et $T = T(r)$ dans la paroi du tube (r : distance entre l'axe du tube et le point considéré).

Soit p la puissance linéique transférée de la face interne (rayon a) vers la face externe (rayon $a+e$).

Etablir l'expression de \vec{j} en fonction de p .

En déduire l'équation différentielle vérifiée par $T(r)$, puis la relation entre p , $T(a)$ et $T(a+e)$.

En déduire la résistance thermique linéique R_0 qu'on écrira sous la forme $\alpha \cdot e/a$.

4 - Il faut tenir compte du flux thermique à l'interface eau douce (température T_e) / acier ($T(a+e)$) : la puissance surfacique est donnée par $p' = h \cdot (T_e - T(a+e))$ (loi de Newton).

Préciser pour $p' > 0$ le sens du transfert thermique.

Montrer qu'on peut associer à ce transfert à l'interface la résistance thermique linéique R_{cc} .

En déduire la résistance thermique linéique R_t du tube d'acier.

A.N. : $\lambda = 15 \text{ SI}$, $h = 10 \text{ SI}$. Justifier qu'on peut négliger R_0 , donner alors l'expression de R_t .

5 - On désigne par x la distance parcourue par l'eau de mer dans le tube depuis l'entrée en A.

Sa température est alors $T(x)$ (la même en tous les points d'une section droite).

Effectuer un bilan enthalpique pour une tranche dx du tube. On précisera soigneusement la méthode utilisée.

En déduire l'équation différentielle vérifiée par $\theta = (T(x) - T_e)$ puis l'expression de $T(x)$. On posera $\delta = D_m \cdot c \cdot R_t$.

En déduire la longueur d du tube et la puissance totale P_m échangée par l'eau de mer en fonction de T_A , et des paramètres du système.

6 - Vérifier l'expression de P_m en effectuant un bilan enthalpique pour le tube de longueur d .

7 - A.N. : la pression dans l'enceinte est la pression atmosphérique $P_e = P_a$.

$T_A = 283 \text{ K}$, $c = 4,2 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$, $h(v)$ (enthalpie massique de vapeur d'eau saturante) = $2676 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

$h(l)$ (enthalpie massique de l'eau liquide saturante) = $419 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ sous la pression atmosphérique.

On veut obtenir $D_m / D_e = 10$. Calculer T_B .

LA CELLULE COMPLETE (fig 1)

8 - Déterminer le débit massique D_s de la saumure (eau salée dans le bouilleur) extraite pour que la masse d'eau reste constante dans la cellule. Préciser sa température à la sortie de la cellule.

9 - Effectuer un bilan enthalpique pour la cellule complète et en déduire la puissance de chauffage P_f en fonction de D_m , c , T_e et T_A .

10 - A.N. : Calculer l'énergie W consommée par kg d'eau douce fournie.

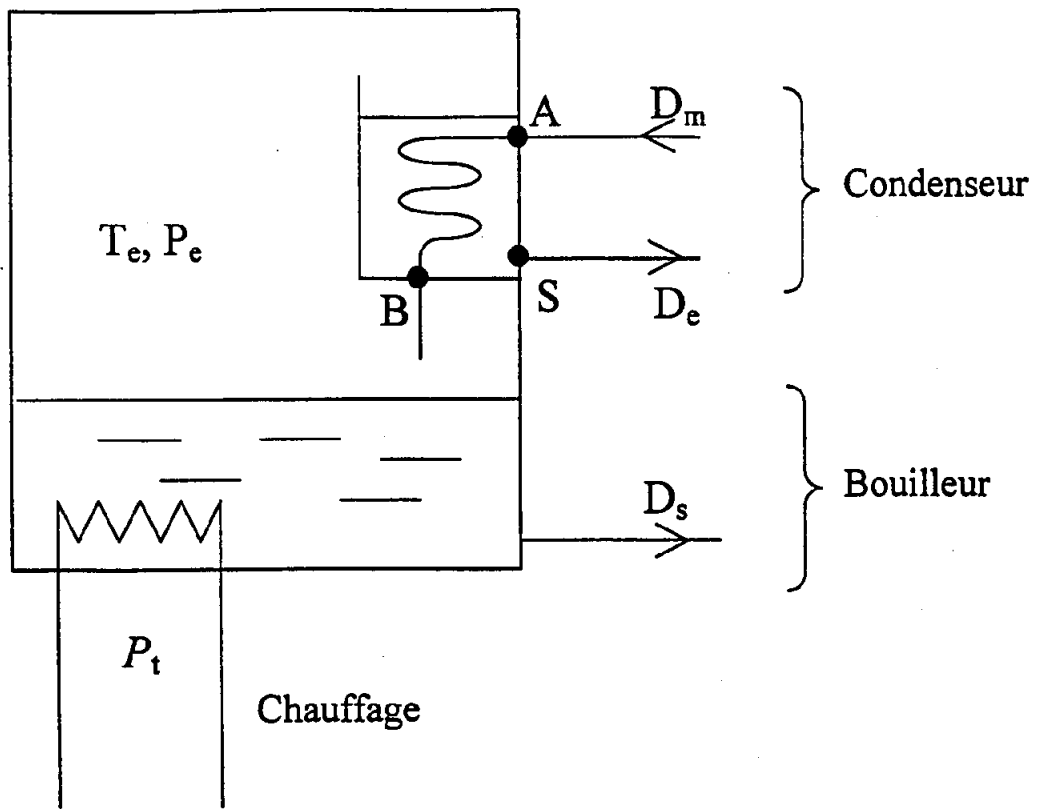


FIGURE 1

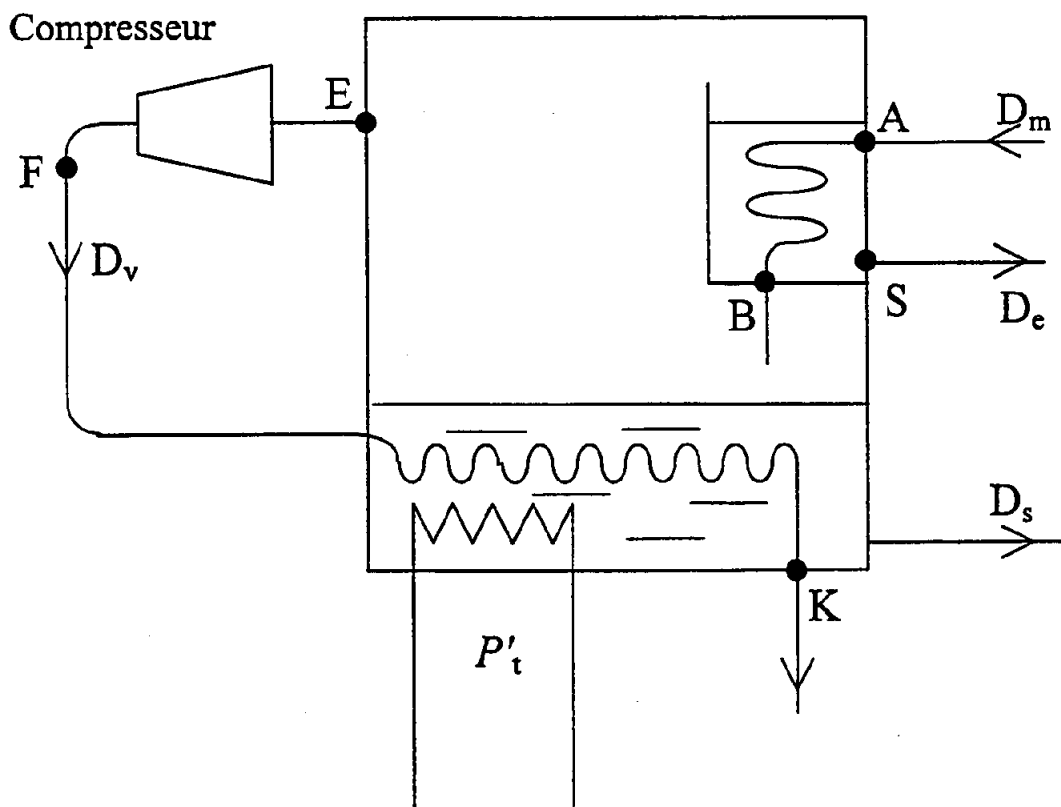


FIGURE 2

POMPAGE DE L'EAU DE MER .

11 - L'entrée A est à l'altitude h . Déterminer la puissance minimale de la pompe en fonction de D_m et h et des autres paramètres du système .

12 - Quel système de pompe faut-il envisager suivant les valeurs de h ?

VAPORISATION SOUS PRESSION REDUITE

On abaisse la pression dans l'enceinte jusqu'à $P_1 = 0,25$ bar . On donne la loi de Dupré-Bertrand :

$$\ln(P_s/P_o) = 56,6 - 7,18 \cdot 10^3/T - 6,3 \cdot \ln(T) ;$$

$P_o = 1$ bar, P_s : pression de vapeur saturante, T en Kelvin ($273K < T < 473K$) .

13 - Tracer la courbe $\ln(P_s/P_o)$ en fonction de T .

Déterminer graphiquement la température T_1 de la vapeur d'eau dans l'enceinte .

Etablir la relation de Clapeyron donnant l'enthalpie massique de vaporisation $L(T)$.

En déduire $L(T)$ en fonction de T (en assimilant la vapeur d'eau au Gaz Parfait) sous la forme

$$L(T) = a - b \cdot T \text{ et calculer sa valeur à } T_1 .$$

Comparer la courbe $\ln(P_s/P_o)$ obtenue en considérant L constante = $L(373K) = 2,25 \cdot 10^3 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ avec la courbe de Dupré-Bertrand . Conclusion .

Dans les mêmes conditions par ailleurs ($T_A = 283K$, même valeur de D_m/D_e), calculer T_B .

LE COMPRESSEUR

On s'intéresse maintenant au système qui maintient la pression P_1 dans l'enceinte .

($T_1 = 337K$ et $P_s = P_1 = 0,25$ bar) (fig. 2) .

On aspire la vapeur d'eau à l'aide d'un compresseur qui élève sa pression . Cette vapeur est ensuite réintroduite dans la cellule où elle se liquéfie totalement au contact de l'eau salée .

Le compresseur a un taux de compression $\tau = P_F/P_E$, il fonctionne de façon adiabatique (on négligera toujours l'énergie cinétique) .

14 - Etablir la relation entre le débit de masse D_v de la vapeur aspirée, h_E et h_F , les enthalpies massiques de la vapeur à l'entrée E et à la sortie F et la puissance P_c fournie à la vapeur par le compresseur .

15 - La vapeur d'eau est assimilée au Gaz Parfait et la compression est considérée comme réversible.

Déterminer la relation entre T_1 , T_F et τ (on posera $\gamma = c_p / c_v$) .

16 - A.N. : $c_p = 1,9 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\tau = 1,4$, $\gamma = 1,3$.

Calculer la puissance P_c en fonction de D_v . Vérifier que l'eau est sous forme vapeur en F .

17 - On abandonne l'hypothèse du Gaz Parfait pour le modèle d'un gaz de sphères dures .

L'enthalpie libre massique s'écrit :

$$g = h_0 - T_0 s_0 + c_p(T - T_0) - c_p T \cdot \ln(T/T_0) + (R/M)T \cdot \ln(P/P_0) + b(P - P_0) \quad b < 10^{-3} \text{ m}^3 \text{kg}^{-1}$$

Déterminer l'entropie $s(T,P)$ et l'enthalpie $h(T,P)$ massiques ainsi que l'équation d'état .

Quel est le paramètre pris en compte par rapport au modèle du G.P. ?

Etablir la relation $c_p - c_v = -T \cdot (\partial s / \partial P)_T \cdot (\partial P / \partial T)_v$. En déduire $c_p - c_v$.

Déterminer la relation entre T_1 , T_F et τ . Calculer T_F .

Déterminer et calculer la puissance P_c en fonction de D_v . Conclusion .

18 - Le compresseur a un rendement $\eta = 0,9$. Calculer l'énergie w' consommée par kg d'eau douce formée.

19 - L'eau douce obtenue sort en K à la température de l'enceinte, à la pression P_F . Déterminer la variation d'enthalpie massique Δh_d pour l'eau qui évolue de F (vapeur, T_F, P_F) en K (liquide, T_1, P_F), en fonction de $L(T_1), T_1, c_p, \tau$ et γ . Calculer Δh_d .

20 - Calculer la masse m' d'eau de mer vaporisée par le passage d'1kg d'eau douce.

LA CELLULE COMPLETE (fig 2).

21 - Effectuer un bilan enthalpique pour la cellule complète. En déduire la nouvelle valeur P_i' de la puissance de chauffage en fonction de D_m et D_v .

22 - Pour éviter une augmentation trop importante de la concentration en chlorure de sodium dans le bouilleur, on envisage un débit de saumure $D_s = 0,4 \cdot D_m$ (la masse d'eau étant ainsi maintenue constante à l'intérieur de la cellule). Déterminer D_v et le débit total D_t d'eau douce en fonction de D_m .

23 - Déterminer et calculer l'énergie W_e consommée par kg d'eau douce formée.

24 - Représenter le schéma de l'installation en indiquant les températures et débits (en fonction de D_m) aux différents points.

25 - On envisage d'utiliser l'eau douce fournie pour réchauffer l'eau de mer dans un échangeur, avant son entrée en A.

A quelle température maximale T_A' pourrait-on porter l'eau de mer ?

Quelles seraient les conséquences d'une augmentation de T_A sur le fonctionnement ?

Fin de l'énoncé