



Concours Physique-Chimie  
Epreuve de Physique

Date : Jeudi 05 Juin 2014      Heure : 8 H00      Durée : 4 H      Nbre pages : 07

Barème :      Problème 1 : 13 pts      ;      Problème 2 : 07 pts

*L'usage d'une calculatrice non programmable est autorisé.*

*L'épreuve comporte deux problèmes indépendants, le candidat peut les résoudre dans l'ordre qui lui convient, en respectant néanmoins la numérotation des questions.*

*Un candidat peut toujours se servir d'un résultat fourni par l'énoncé pour continuer sa composition.*

**PROBLEME N°1**

Données :

- ♦ Vitesse de la lumière dans le vide :  $c = 3.10^8 \text{ m s}^{-1}$ .
- ♦ Constante universelle de la gravitation :  $G = 6,67.10^{11} \text{ SI}$ .
- ♦ Masse du Soleil :  $M_s = 1,99.10^{30} \text{ kg}$ .
- ♦ Rayon de la trajectoire circulaire décrite par la Terre autour du Soleil :  $d_{ST} = 1,50.10^{11} \text{ m}$ .
- ♦ Champ de gravitation du Soleil supposé sphérique :  $\vec{G}_s = -\frac{G M_s}{r^3} \vec{r}$ ,  $\vec{r} = \overrightarrow{ST}$  : vecteur position séparant les centres du Soleil S et de la Terre T.
- ♦  $\sin(p) + \sin(q) = 2 \sin\left(\frac{p+q}{2}\right) \cos\left(\frac{p-q}{2}\right)$

L'espace est rapporté au repère orthonormé direct (Oxyz) de base  $(\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$ . Le vide est caractérisé par sa permittivité électrique  $\epsilon_0$  et sa perméabilité magnétique  $\mu_0$ .

**I- Préliminaires**

- 1- Ecrire les équations de Maxwell qui régissent les champs électrique  $\vec{E}(M,t)$  et magnétique  $\vec{B}(M,t)$  dans le vide, en présence de charges de densité volumique  $\rho(M,t)$  et de courants de densité volumique  $\vec{j}(M,t)$ , en précisant brièvement leur signification physique.
- 2- Citer les caractéristiques d'un conducteur parfait.
- 3- Rappeler les relations de passage des champs électrique et magnétique à l'interface séparant un milieu conducteur parfait du vide.
- 4- Donner la structure d'une onde électromagnétique plane, progressive, monochromatique dans le vide.

## II- Réflexion sur un conducteur parfait et pression de radiation

On considère un conducteur parfait occupant la région de l'espace  $x > 0$ . Sa surface plane  $x = 0$  est en contact avec l'air qu'on assimile au vide.

On envisage la réflexion d'une onde électromagnétique plane progressive monochromatique de pulsation  $\omega$ . Cette onde arrive sur l'interface plane vide-conducteur parfait (plan  $x = 0$ ) sous l'angle d'incidence  $\theta_i$  (Figure 1). En notation complexe, le champ électrique correspondant s'écrit :

$$\vec{E}_i(M, t) = E_0 \vec{e}_z \exp(i(\omega t - \vec{k}_i \cdot \vec{r})), \text{ où } E_0 \text{ est une constante réelle positive.}$$

5- On s'intéresse à l'onde incidente.

5-1- Donner l'expression du vecteur d'onde  $\vec{k}_i$ .

5-2- Dédurre, en représentation complexe, le champ magnétique  $\vec{B}_i$  de l'onde incidente. Représenter, à un instant donné, les vecteurs  $\vec{k}_i$ ,  $\vec{E}_i$  et  $\vec{B}_i$ .

5-3- Calculer les valeurs moyennes temporelles de la densité d'énergie électromagnétique  $\langle u_{em}(M, t) \rangle$  de l'onde incidente et de son vecteur de Poynting  $\langle \vec{R}_i(M, t) \rangle$ . Donner la relation entre ces deux grandeurs. Commenter.

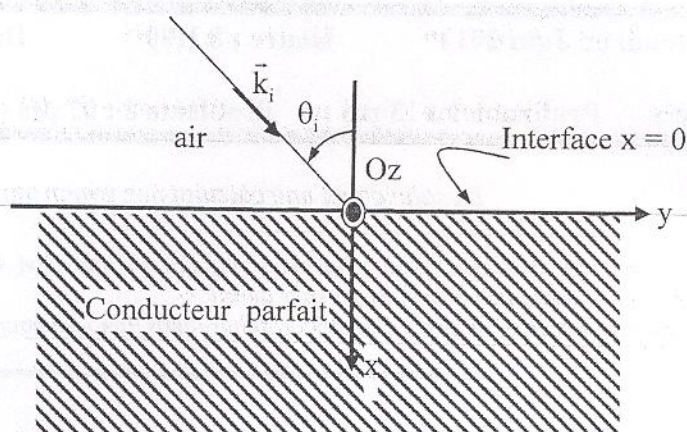


Figure 1

6- On s'intéresse à l'onde réfléchie.

6-1- Justifier l'existence d'une onde réfléchie. Préciser sa pulsation et son vecteur d'onde  $\vec{k}_r$ .

6-2- Ecrire les expressions des champs  $\vec{E}_r(M, t)$  et  $\vec{B}_r(M, t)$ .

7- Déterminer le champ électrique  $\vec{E}(M, t)$  résultant de la superposition des ondes incidente et réfléchie. Commenter sa structure.

8- Déterminer les densités surfaciques de charge  $\sigma(P, t)$  et de courant  $\vec{j}_s(P, t)$  qui apparaissent en tout point P de la surface du conducteur parfait.

9- La force électromagnétique élémentaire  $d\vec{F}_{em}(P, t)$  s'exerçant sur un élément de surface  $dS$  de ce conducteur parfait s'écrit :

$$d\vec{F}_{em}(P, t) = \frac{1}{2} \sigma \vec{E}(x=0, y, t) dS + \frac{1}{2} \vec{j}_s \wedge \vec{B}(x=0, y, t) dS.$$

9-1- Justifier la présence du facteur  $\frac{1}{2}$ .

9-2- Déterminer l'expression de  $d\vec{F}_{em}(P, t)$ .

10- En déduire la pression de radiation électromagnétique donnée dans ce cas par

$$p_{em} = \left\langle \left\| \frac{d\vec{F}_{em}(P, t)}{dS} \right\| \right\rangle, \text{ en fonction de } E_0 \text{ et de } \theta_i. \text{ Justifier cette appellation.}$$

11- La Terre décrit autour du Soleil, de centre S, une trajectoire supposée circulaire de rayon  $d_{ST} = 1,50 \cdot 10^{11} \text{ m}$ . Elle reçoit une puissance de rayonnement solaire par unité de surface  $\|\vec{R}_s\| = 0,15 \cdot 10^4 \text{ W m}^{-2}$ . On suppose que l'émission solaire se fait d'une manière isotrope et on néglige l'absorption du rayonnement solaire lors de la propagation.

11-1- Calculer littéralement puis numériquement la puissance totale  $\mathcal{P}_s$  du rayonnement électromagnétique solaire à travers une sphère de rayon  $r = d_{ST}$  et de centre S.

11-2- Montrer que la pression de radiation solaire  $p_{em}$  à laquelle est soumis un récepteur de petites dimensions, parfaitement réfléchissant et recevant le rayonnement solaire sous l'angle d'incidence  $\theta_i$ ,

s'écrit :  $p_{em} = \left\| \left\langle \frac{d\vec{F}_{em}}{dS} \right\rangle \right\| = \frac{\mathcal{P}_s}{2\pi c r^2} \cos^2 \theta_i$ . Préciser les approximations adoptées.

## 12- Application : Déviation de la queue de certaines comètes

On considère un récepteur constitué d'une particule sphérique de centre C et de rayon a, de masse volumique  $\rho$ , se trouvant à la distance  $r = d_{ST}$  du Soleil tel que  $d_{ST} \gg a$  (Figure 2). La particule est supposée parfaitement réfléchissante.

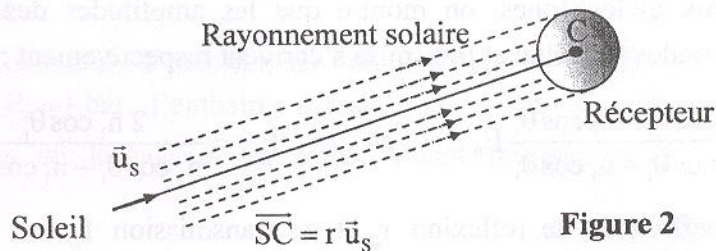


Figure 2

12-1- Montrer que la valeur moyenne de la force  $\vec{F}_R$  due au rayonnement solaire que subit la particule peut s'écrire sous la forme :  $\vec{F}_R = \frac{\mathcal{P}_s a^2}{4 c r^2} \vec{u}_s$ .

12-2- Déterminer la force de gravitation  $\vec{F}_G$  qu'exerce le Soleil sur la particule.

12-3- A partir de quelle valeur  $a_0$  du rayon de la particule a-t-on  $\|\vec{F}_R\| \geq \|\vec{F}_G\|$  ?

Application numérique : Calculer  $a_0$  pour  $\rho = 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ .

12-4- L'observation astronomique de la queue de certaines comètes a mis en évidence leur répulsion par le Soleil. Justifier, à partir du résultat précédent, la déviation de la queue d'une comète formée par des poussières et des gaz.

## III- Réflexion sur un milieu diélectrique

Une onde électromagnétique plane progressive monochromatique de pulsation  $\omega$ , polarisée dans le plan d'incidence (Oxy) arrive sous un angle d'incidence  $\theta_i$  sur le dioptré plan (Oyz). Cette interface sépare deux milieux diélectriques linéaires, homogènes, isotropes et transparents d'indices réels respectifs  $n_1$  et  $n_2$  ( $n_2 > n_1$ ). Elle donne naissance à une onde réfléchie et une onde transmise se propageant respectivement suivant les directions des vecteurs unitaires  $\vec{e}_r$  et  $\vec{e}_t$ . On note  $\theta_r$  et  $\theta_t$  les angles de réflexion et de réfraction des ondes électromagnétiques (Figure 3).

En notation complexe, le champ électrique associé à l'onde incidente s'écrit :

$$\vec{E}_i(M, t) = \vec{E}_0 \exp i(\omega t - \vec{k}_i \cdot \vec{r}), \text{ où } \vec{E}_0 = E_0 (-\sin \theta_i \vec{e}_x + \cos \theta_i \vec{e}_y).$$

On note  $\vec{E}_r(M, t) = \vec{E}_{0r} \exp i(\omega t - \vec{k}_r \cdot \vec{r})$  et  $\vec{E}_t(M, t) = \vec{E}_{0t} \exp i(\omega t - \vec{k}_t \cdot \vec{r})$  les champs électriques des ondes réfléchi et transmise.

On admettra que la surface de séparation  $x = 0$  est dépourvue de charge et de courant libres.

13- Rappeler les lois de Descartes relatives à la réflexion et à la transmission à l'interface  $x = 0$ .

14- Donner les expressions des vecteurs d'ondes des ondes incidente, réfléchi et transmise respectivement  $\vec{k}_i$ ,  $\vec{k}_r$  et  $\vec{k}_t$ .

15- Ecrire l'expression du champ électrique  $\vec{E}_i(M, t)$  de l'onde incidente dans la base  $(\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$ . En déduire le champ magnétique  $\vec{B}_i(M, t)$  correspondant.

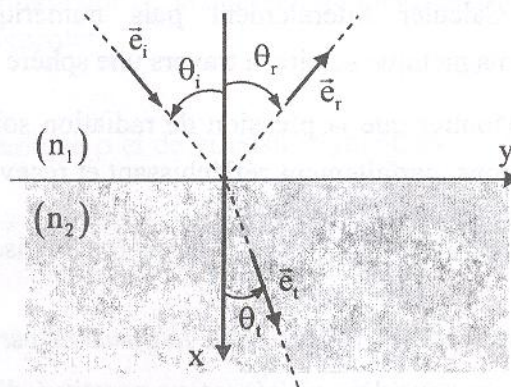


Figure 3

16- En utilisant les relations de continuité des champs électriques et magnétiques à l'interface  $x = 0$  séparant les deux milieux diélectriques, on montre que les amplitudes des champs électriques  $\vec{E}_r(M, t)$  et  $\vec{E}_t(M, t)$  des ondes réfléchi et transmise s'écrivent respectivement :

$$E_{0r} = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} E_0 \quad \text{et} \quad E_{0t} = \frac{2 n_1 \cos \theta_i}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} E_0$$

16-1- Déterminer les coefficients de réflexion  $r_{//}$  et de transmission  $t_{//}$  en amplitude du champ électrique polarisé parallèlement au plan d'incidence.

16-2- Déduire les expressions des composantes des champs électriques  $\vec{E}_r$  et  $\vec{E}_t$  et magnétiques  $\vec{B}_r$  et  $\vec{B}_t$ .

17- Déterminer les vecteurs densités de flux d'énergie  $\vec{R}_i$ ,  $\vec{R}_r$  et  $\vec{R}_t$  associés respectivement aux ondes incidente, réfléchi et transmise à l'interface  $x = 0$ . Quelles sont les expressions des facteurs de réflexion  $R_{//}$  et de transmission  $T_{//}$  en énergie. Montrer que :  $R_{//} + T_{//} = 1$ . Interpréter cette relation.

18- Montrer qu'il existe un angle d'incidence particulier, appelé angle de Brewster  $\theta_B$  tel que l'onde réfléchi n'existe pas et donner son expression en fonction des indices de réfraction  $n_1$  et  $n_2$ .

19- Pour interpréter physiquement la polarisation lors de la réflexion vitreuse sous l'angle d'incidence de Brewster  $\theta_B$ , on adopte le modèle suivant : l'onde électromagnétique incidente pénètre dans le milieu (2) en se réfractant ; elle y excite des dipôles oscillants dont le rayonnement crée l'onde réfléchi. En cherchant une condition pour que ces dipôles ne rayonnent pas dans la direction de l'onde réfléchi, retrouver l'expression de l'angle d'incidence de Brewster  $\theta_B$ .

20- Calculer l'angle  $\theta_B$  pour l'interface air - verre. On donne :  $n_{\text{air}} = 1$  et  $n_{\text{verre}} = 1,54$ .

21- Sachant que, pour  $\theta_i = \theta_B$ , le coefficient de réflexion en énergie  $R_{\perp}$  relatif à une onde électromagnétique polarisée perpendiculairement au plan d'incidence (Oxy) n'est pas nul, sa valeur,

pour un angle d'incidence  $\theta_i$  quelconque, est donnée par :  $R_{\perp} = \left( \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right)^2$ .

Pour une onde électromagnétique non polarisée ou naturelle, quel est l'intérêt pratique de ce dispositif ?

## PROBLEME N°2

*Données numériques :*

Pression atmosphérique :  $P_0 = 1 \text{ bar}$ .

Masse volumique de l'eau liquide :  $\rho_0 = 1000 \text{ kg m}^{-3}$ .

Viscosité dynamique de l'eau :  $\eta = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ poiseuille (Pl)}$ .

Champ de pesanteur terrestre :  $g = 9,8 \text{ m s}^{-2}$ .

### **I- Changement d'état solide-liquide :**

On s'intéresse aux deux états liquide et solide d'un corps pur. Les variables d'état sont la pression  $P$ , la température absolue  $T$  et le volume massique  $v$ .

1- Tracer l'allure du diagramme d'état ( $T, P$ ) d'un corps pur quelconque. Que représentent les courbes décrivant ce diagramme, les domaines qu'elles délimitent, les points remarquables ? Dans le cas de l'eau, la pente de la courbe de l'équilibre solide-liquide est négative. Commenter

2- Préciser le potentiel thermodynamique permettant de décrire l'évolution de changement de phase d'un corps pur. Quelle est la condition thermodynamique d'équilibre entre deux phases (a) et (b) à pression et température données ? Établir l'équation de Clapeyron relative à la courbe traduisant l'équilibre solide-liquide.

3- On s'intéresse à l'influence de la pression sur l'équilibre solide-liquide de l'eau. A une température  $0^\circ\text{C}$ , sous la pression  $P_0 = 1 \text{ bar}$ , l'enthalpie massique de fusion vaut  $\Delta h_F = L_F = 3,33 \cdot 10^5 \text{ J kg}^{-1}$ , et les volumes massiques du liquide et du solide valent respectivement  $v_L = 1,00 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  et  $v_S = 1,09 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ .

3-1- Calculer la pente de la courbe d'équilibre solide-liquide au point considéré.

3-2- Estimer la température de fusion de la glace au fond d'une fosse océanique, à une pression de l'ordre de 1000 bars. Commenter.

Dans la suite, on étudie le champ de pression de l'eau liquide située dans un champ de pesanteur uniforme et en contact avec l'atmosphère à la pression  $P_0$ . La température de l'eau est supposée uniforme.

On désigne par Oz l'axe vertical orienté vers le haut, avec l'origine à la surface libre du liquide.

4- Rappeler sans démonstration l'équation locale de la statique des fluides en équilibre hydrostatique dans le champ de pesanteur.

En déduire l'expression du champ de pression  $P(z)$  dans l'océan en précisant les hypothèses faites.

5- Application numérique : justifier qu'une hauteur de 10 mètres d'eau est équivalent à une augmentation de pression égale à la pression atmosphérique.

Le champ de pesanteur à la surface de la Terre est :  $g = 9,8 \text{ m s}^{-2}$ .

6- Le coefficient de compressibilité isotherme  $\chi_T = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T$  de l'eau liquide à la température ambiante est :  $\chi_T = 5 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ . Estimer la diminution relative du volume massique de l'eau à 40 m de profondeur. Commenter la valeur obtenue.

*Proche de la côte méditerranéenne, en pleine mer, se manifeste une source d'eau douce, issue d'un tuyau branché à 36 m plus bas. Il n'y a ni système de pompe ni forage : l'eau douce, moins dense que l'eau de mer, remonte naturellement à la surface.*

Pour expliquer ce phénomène naturel, on s'intéresse à la circulation de l'eau, en régime permanent, dans un tuyau cylindrique vertical rigide de section circulaire uniforme, de rayon  $R$ . L'axe du cylindre est confondu avec l'axe vertical  $Oz$ .

On se place dans le cas où la loi de Poiseuille est vérifiée.

7- Représenter l'allure du module de la vitesse de l'eau en fonction de la distance  $r$  à l'axe du cylindre, selon que l'on considère ce fluide est réel ou parfait. Commenter.

On expliquera qualitativement la notion de viscosité.

8- On s'intéresse à l'écoulement du fluide de masse volumique  $\rho$  et de viscosité dynamique  $\eta$  dans la conduite cylindrique de longueur  $L$ .

Rappeler la loi de Poiseuille reliant le débit volumique  $D_v$  à la différence de pression  $\Delta P$  entre le bas et le haut du cylindre :  $\Delta P = P(z) - P(z + L)$ . Préciser les conditions de validité de cette loi.

9-1- Commenter le cas où la différence de pression  $\Delta P$  est égale à :  $\Delta P = \rho g L$ .

9-2- Calculer la quantité  $\Delta P - \rho g L$  nécessaire pour que l'eau douce puisse jaillir à la surface libre de la mer à partir d'une source sous-marine située à une profondeur de 30 mètres sous la surface libre de la mer et dont le débit est :  $D_v = 0,10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

On donne : rayon de la conduite  $R = 25 \text{ cm}$  et la viscosité dynamique moyenne de l'eau de mer :  $\eta = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ Pl}$ .

9-3- Calculer la vitesse moyenne de cet écoulement d'eau douce ainsi que le nombre de Reynolds correspondant. Conclure.

## II- Changement d'état liquide-gaz

Données numériques :

Capacité thermique massique de l'eau liquide  $c_{\text{liq}} = 4180 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

Enthalpie massique de vaporisation de l'eau ( $100^\circ\text{C}, 1 \text{ bar}$ ),  $L_{\text{vap}} = 2,24 \cdot 10^6 \text{ J kg}^{-1}$ .

Masse molaire de l'eau  $M = 18 \text{ g mol}^{-1}$ .

|                                        | eau                 | propane             |
|----------------------------------------|---------------------|---------------------|
| $T_c$                                  | $374^\circ\text{C}$ | $98^\circ\text{C}$  |
| $T_v$ sous 1 bar                       | $100^\circ\text{C}$ | $-42^\circ\text{C}$ |
| $P_{\text{sat}}$ à $20^\circ\text{C}$  |                     | 7 bars              |
| $\rho_{\text{liq}} (\text{kg m}^{-3})$ |                     | 515                 |

Où  $T_c$  et  $T_v$  sont respectivement la température critique et la température de vaporisation du corps pur considéré.  $P_{\text{sat}}$  est la pression de sa vapeur saturante et  $\rho_{\text{liq}}$  est la masse volumique du corps pur à l'état liquide, supposée indépendante de la température et de la pression.

On s'intéresse aux deux états liquide et gaz d'un corps pur. Les variables d'état sont la pression  $P$ , la température absolue  $T$  et le volume massique  $v$ . On note  $(P_c, T_c, v_c)$  les coordonnées du point critique du corps pur.

10- Représenter dans le diagramme de Clapeyron  $(P, v)$  les transformations isothermes d'un fluide, en illustrant et en expliquant rapidement les notions suivantes : mélange diphasé, palier de changement d'état, courbe de rosée, courbe d'ébullition et point critique.

11- Exprimer les variations d'enthalpie massique  $\Delta h$  et d'entropie massique  $\Delta s$  associées à une transition liquide-vapeur. Effectuer et commenter les applications numériques dans le cas de l'eau pour une température de  $100^\circ\text{C}$ .

12- Quelle est l'entropie massique créée lors de la vaporisation de l'eau, initialement à l'état liquide, en contact avec un thermostat à la température  $100^\circ\text{C}$  sous la pression 1 bar ?

### III- Stockage des fluides

13- On se place à une température  $20^\circ\text{C}$ . Une bouteille ordinaire de propane est approximativement cylindrique de hauteur 35 cm et de diamètre 30 cm. Lorsque la bouteille est pleine, la masse du propane contenue dans cette bouteille est égale à 5 kg. On rappelle que la formule chimique du propane est  $\text{C}_3\text{H}_8$  et que les masses atomiques de carbone C et d'hydrogène H sont :  $M_C = 12 \text{ g mol}^{-1}$  et  $M_H = 1 \text{ g mol}^{-1}$ .

13-1- Déterminer la masse volumique  $\rho_{\text{vap}}$  du propane, considéré comme un gaz parfait, lorsqu'il est à la température  $20^\circ\text{C}$  sous sa pression de vapeur saturante (voir tableau).

13-2- Dédire alors de la comparaison entre les trois valeurs  $\rho_{\text{liq}}$ ,  $\rho_{\text{vap}}$  et  $\rho_{\text{moy}}$ , masse volumique moyenne du corps pur existant dans la bouteille, l'état physique dans lequel se trouve ce corps pur. Déterminer alors la pression dans la bouteille de propane. On rappelle que :  $R = 8,314 \text{ J K}^{-1}\text{mol}^{-1}$ .

14- Expliquer la présence d'un détendeur ramenant le gaz à la pression atmosphérique dans les installations utilisant le propane gazeux.

15- On constate qu'un débit prolongé du gaz peut entraîner la formation de givre au voisinage du détendeur. En admettant qu'à la sortie de la bouteille, le propane, assimilé à un gaz parfait, subit une évolution adiabatique et réversible. Montrer qualitativement qu'il se produit un refroidissement au niveau du détendeur.

On note  $\gamma = \frac{C_p}{C_v} > 1$ , supposé constant, le rapport entre les capacités thermiques à pression constante et à volume constant du gaz.

**Fin de l'épreuve**