

# Épreuve de physique II

Jeudi 06 mars : 9h - 13h

## Instructions générales :

Le candidat attachera la plus grande importance à la clarté, à la précision et à la concision de la rédaction. Si un candidat est amené à repérer ce qui peut lui sembler être une erreur d'énoncé, il le signalera sur sa copie et devra poursuivre sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.

**L'usage de la calculatrice est autorisé.**

## Barème approximatif :

Partie I : 50%  
Partie II : 50 %

Première partie

# Température dans le tunnel de Fréjus

À l'exception de  $i$  tel que  $i^2 = -1$ , les grandeurs complexes sont soulignées :  $z \in \mathbb{C}$ . La notation  $\bar{z}$  désigne le nombre complexe conjugué de  $z$ .

Les vecteurs sont surmontés d'un chapeau s'ils sont unitaires  $\hat{u}_x$  ou d'une flèche dans le cas général  $\vec{v}$ .

Pour les applications numériques on utilisera 3 chiffres significatifs.

Le tunnel routier du Fréjus relie la vallée de l'Arc, en France, au val de Suse, en Italie. Long d'environ 13 km, le tunnel passe sous le col du Fréjus dans les Alpes cottiennes. La pointe Fréjus culmine à une altitude de 2934 m.

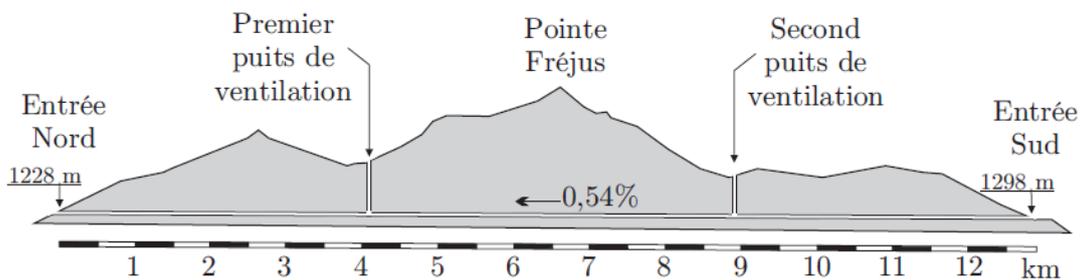


FIGURE 1 - Tunnel de Fréjus

La roche environnante dans le tunnel a une température constante tout au long de l'année d'environ  $30^\circ$  C. Dans un premier temps nous étudierons les évolutions saisonnières de la température dans le sol. Puis nous tenterons d'expliquer cette température élevée par un modèle géophysique.

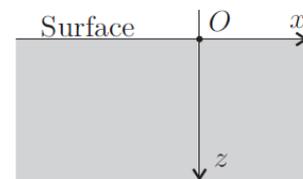


FIGURE 2 - Sol

## I. – Évolutions saisonnières de la température dans le sol

On se place au sommet de la pointe Fréjus à une altitude de 2934 m. On assimile la roche à un milieu semi-infini de conductivité thermique  $\kappa$ , de masse volumique  $\rho_s$  et de capacité thermique massique  $c_s$ . Sa surface est plane et horizontale et est soumise à la variation de température extérieure

$$T(z = 0, t) = \theta_0 + T_0 \cos(\omega t)$$

avec  $\theta_0 = 0^\circ\text{C}$ . (Voir figure 2) .

- Q1.** Calculer la moyenne temporelle de la température extérieure en  $z = 0$ . Calculer la température maximale et minimale. Proposer une valeur numérique pour  $T_0$  pour les évolutions annuelles de température.
- Q2.** Le flux thermique élémentaire, défini comme la quantité d'énergie traversant une surface élémentaire  $dS$  pendant  $dt$ , est noté  $d\phi_Q$ . Rappeler la définition du vecteur  $\vec{j}_Q$ , densité de flux thermique. Quelle est sa dimension ?
- Q3.** Rappeler la loi de Fourier, ainsi que ses conditions d'application. En déduire les dimensions de la conductivité thermique  $\kappa$ .

- Q4.** On étudie une tranche mésoscopique de sol comprise entre  $z$  et  $z + dz$  de surface  $S$ . Quelle est l'énergie thermique  $\delta Q$  reçue par cette tranche entre  $t$  et  $t + dt$  ?
- Q5.** Pourquoi étudie-t-on une tranche « mésoscopique » ?
- Q6.** Établir l'expression de sa variation d'énergie interne  $dU$  en fonction de  $\frac{\partial j_Q}{\partial z}$  et  $S$  puis en fonction de  $\rho_s, c_s, S$  et  $\frac{\partial T}{\partial t}$ .
- Q7.** En déduire l'équation de la chaleur à une dimension

$$\frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 T(z, t)}{\partial z^2}$$

dans laquelle on précisera l'expression et la dimension du coefficient  $D$  de diffusion thermique.

On cherche des solutions de la forme

$$\underline{T}(z, t) = \theta_0 + T_0 e^{i(\omega t - kz)}$$

vérifiant la condition aux limites  $T(z = 0, t) = \theta_0 + T_0 \cos(\omega t)$ .

- Q8.** Interpréter cette forme de solution. Déterminer la relation de dispersion correspondante. En déduire l'expression de  $\underline{k}$  qu'on mettra sous la forme  $\underline{k} = k' + ik''$  avec  $k' > 0$ . Quelle est la signification physique de  $k'$  et  $k''$  ? Déterminer l'expression correspondante de la solution réelle  $T(z, t)$ .
- Q9.** Calculer la profondeur  $z_e$  à partir de laquelle les oscillations annuelles de température ne s'écartent pas de  $\theta_0$  de plus de 1%. Que peut-on dire de la température dans le tunnel routier de Fréjus ? Pour les roches granitiques constituant le Fréjus on donne  $\rho_s = 2,65 \times 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$ ,  $c_s = 8,50 \times 10^3 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$  et  $\kappa = 3,00 \text{ SI}$ .
- Q10.** Que peut-on dire des variations quotidiennes de la température à la profondeur  $z_e$  ? En terme de filtrage fréquentiel, comment se comporte le sol ?

## II. – Température d'origine géophysique

La température moyenne de  $30^\circ\text{C}$  relevée dans le tunnel de Fréjus peut être expliquée par un modèle géothermique simple de la croûte terrestre. On considère qu'au niveau des Alpes, l'épaisseur de la croûte terrestre continentale est  $L_c = 45,0 \text{ km}$ . Les roches granitiques qui constituent une partie des Alpes contiennent des éléments radioactifs comme l'uranium, le thorium et le potassium. La chaleur produite par ces éléments radioactifs est directement proportionnelle à leur concentration.

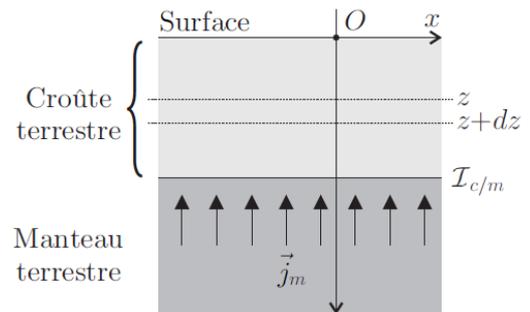


FIGURE 3 - Modèle géophysique

Dans les modèles couramment utilisés cette concentration décroît exponentiellement avec la profondeur, de sorte que la puissance volumique dégagée peut s'écrire  $\mathcal{P} = \mathcal{P}_0 e^{-z/H}$  avec  $H = 10,0 \text{ km}$ . On prendra  $\mathcal{P}_0 = 2,50 \mu\text{W.m}^{-3}$ . La croûte terrestre repose sur le manteau terrestre, à la fois plus dense et plus chaud que la croûte. On admet enfin qu'au niveau de l'interface  $\mathcal{I}_{c/m}$  entre la croûte et le manteau ce dernier génère un flux surfacique constant  $\vec{j}_m = -j_m \hat{e}_z$  avec  $j_m = 35,0 \text{ mW.m}^{-2}$ .

- Q11.** Effectuer, en régime stationnaire, le bilan thermique dans une tranche de croûte terrestre de surface  $S$ , comprise entre  $z$  et  $z + dz$ .
- Q12.** En déduire la température  $T(z)$  en fonction de :  $H, L_c, \mathcal{P}, j_m, \kappa$  et  $\theta_0 = 0^\circ\text{C}$  la température moyenne de surface en  $z = 0$ .

- Q13.** Exprimer le flux thermique total  $\vec{j}_s = j_s \hat{e}_z$  au niveau de la surface en  $z = 0$ .
- Q14.** Comparer les deux termes proportionnels à  $z$  et simplifier l'expression de  $T(z)$ . Calculer la température au centre du tunnel de Fréjus ( $z = 1,70$  km) puis  $j_s$ .

### III. – Prise en compte du relief

On suppose maintenant que la température à la surface plane  $z = 0$  possède une dépendance spatiale en  $x$  que l'on modélise par la relation  $T(x, z = 0) = T_s + T_1 \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right)$ . Pour étudier l'effet du relief sur la température dans le tunnel de Fréjus on prendra  $\lambda = 10,0$  km.

- Q15.** On suppose pour cette question qu'il n'y a pas de source d'énergie thermique dans la roche. Donner sans démonstration l'équation différentielle satisfaite par  $T(x, z)$  en régime stationnaire. En utilisant la méthode de séparation des variables, déterminer la solution  $T(x, z)$  qui respecte la condition aux limites  $T(x, z = 0)$  et qui demeure finie lorsque  $z \rightarrow +\infty$ . Justifier la prise en compte des effets de la variation spatiale de la température.
- Q16.** Toujours pour une surface plane d'équation  $z = 0$ , en utilisant la linéarité de l'équation satisfaite par la température, déterminer  $T(x, z)$  en considérant les sources internes d'énergie thermique.
- Q17.** On considère ici que la topographie de la surface peut être représentée par l'équation  $h(x) = h_0 \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right)$ . La température de la surface  $T_s = T(x, z = h)$  sera prise égale à celle de l'air ambiant et sera modélisée par  $T_s = \theta_0 + \beta z$ . En effectuant un développement limité en  $z$  à l'ordre 1, exprimer la température  $T(x, z = 0)$  en fonction de  $h, T(x, z = h)$  et  $\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{z=0}$ . Déterminer  $\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{z=0}$  en fonction notamment du flux d'énergie thermique à la surface  $j_s$ . En déduire que que l'on peut écrire

$$T(x, z) = \theta_0 + c_1 z + c_2(1 - e^{-z/H}) + c_3 h_0 \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) e^{-z/\delta}$$

où l'on précisera l'expression des constantes  $c_1, c_2, c_3$  et  $\delta$  en fonction des données du problème.

## Deuxième partie

## Autour des champs électromagnétiques

## Données

Célérité de la lumière dans le vide :  $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

$$\cos(a) + \cos(b) = 2 \cos\left(\frac{a+b}{2}\right) \cos\left(\frac{a-b}{2}\right)$$

$$\cos(a) - \cos(b) = -2 \sin\left(\frac{a+b}{2}\right) \sin\left(\frac{a-b}{2}\right)$$

Laplacien d'un champ de vecteurs :  $\Delta \vec{A} = \overrightarrow{\text{grad}} (\text{div } \vec{A}) - \overrightarrow{\text{rot}} (\overrightarrow{\text{rot}} \vec{A})$

En repère cartésien :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} = \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z}\right) \vec{e}_x + \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x}\right) \vec{e}_y + \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y}\right) \vec{e}_z$$

$$\begin{cases} \Delta \vec{A} = \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial z^2} \\ \Delta \vec{A} = \Delta A_x \vec{e}_x + \Delta A_y \vec{e}_y + \Delta A_z \vec{e}_z \end{cases}$$

En repère cylindrique :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} = \left(\frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial \theta} - \frac{\partial A_\theta}{\partial z}\right) \vec{e}_r + \left(\frac{\partial A_r}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial r}\right) \vec{e}_\theta + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r A_\theta)}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial A_r}{\partial \theta}\right) \vec{e}_z$$

$$\Delta f = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial f}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 f}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$$

$$\Delta \vec{A} = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 A_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 A_r}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 A_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_r}{\partial r} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial A_\theta}{\partial \theta} - \frac{A_r}{r^2} \\ \frac{\partial^2 A_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 A_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 A_\theta}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_\theta}{\partial r} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial A_r}{\partial \theta} - \frac{A_\theta}{r^2} \\ \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 A_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial r} \end{pmatrix} \begin{matrix} \vec{e}_r \\ \vec{e}_\theta \\ \vec{e}_z \end{matrix}$$

## I. – Un miroir pour les ondes électromagnétiques

En astronomie, les sursauts radio rapides (fast radio burst) sont de brèves émissions radio intenses, d'une durée allant d'une fraction de milliseconde à 3 secondes, dont l'origine est encore mal comprise. Ils sont étudiés à l'aide de radiotélescopes, comme celui de Parkes en Australie. En 2010, 16 sursauts atypiques ont été découverts, dont on a essayé de comprendre l'origine. Ils ont été appelés perytons (perytions), du nom de l'animal imaginaire maléfique, mi-oiseau et mi-cerf, au plumage bleu ou vert. On s'intéresse dans cette partie à la structure d'un miroir de radiotélescope.

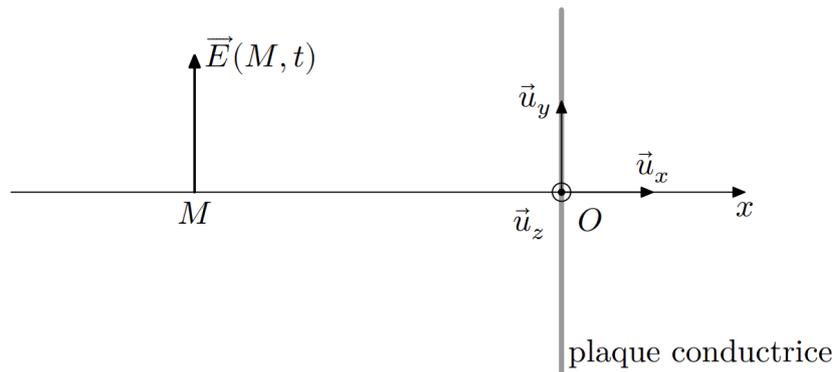
- Q1.** Énoncer les équations de Maxwell. Que deviennent-elles dans une région vide de charges et de courants ? On se placera par la suite dans cette situation.
- Q2.** En déduire l'équation de propagation vérifiée par le champ électrique (équation de d'Alembert).

On considère une onde électromagnétique dans le demi-espace  $x < 0$ , dont le champ électrique est de la forme :

$$\vec{E}_i(M, t) = E_0 \cos(\omega t - kx) \vec{u}_y$$

- Q3.** Préciser la direction et le sens de propagation de cette onde ainsi que son état de polarisation. Établir la relation, dite relation de dispersion, entre  $k$  et  $\omega$ .

Cette onde rencontre une plaque métallique plane, constituée d'un conducteur parfait, dont la surface est située en  $x = 0$  (figure 1).



**Figure 1** Onde électromagnétique rencontrant un conducteur parfait

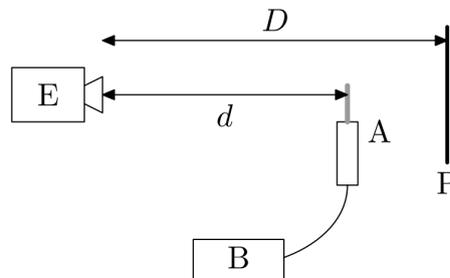
Dans un conducteur parfait le champ électrique  $\vec{E}$  est nul en tout point.

- Q4.** Dans cette configuration, il y a continuité du champ électrique en  $x = 0$ . Le champ électrique de l'onde décrite précédemment vérifie-t-il cette continuité ?

Dans le demi-espace  $x < 0$ , règne aussi une onde de la forme  $\vec{E}_r(M, t) = \vec{E}_{0r} \cos(\omega' t + k' x)$ . En utilisant la continuité du champ électrique, déterminer  $\vec{E}_{0r}$ ,  $\omega'$  et  $k'$ . Préciser la direction et le sens de propagation de cette onde ainsi que son état de polarisation.

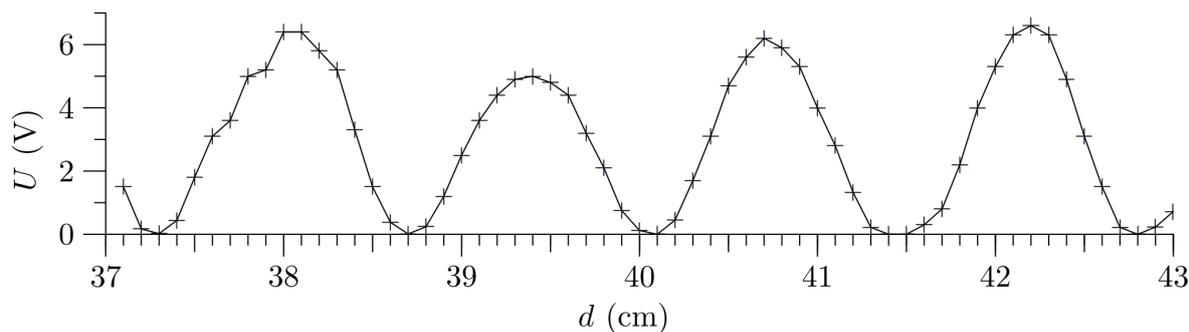
- Q5.** Dans le milieu  $x < 0$ , établir l'expression des champs électrique  $\vec{E}(M, t)$  et magnétique  $\vec{B}(M, t)$  résultants. Comment qualifier l'onde correspondante ?

On dispose au laboratoire d'un équipement permettant d'étudier des ondes électromagnétiques dites centimétriques. On réalise l'expérience décrite figure 2, où  $E$  est un émetteur d'ondes centimétriques,  $P$  une plaque métallique,  $A$  une antenne reliée à un boîtier électronique  $B$  délivrant une tension continue, proportionnelle à la moyenne temporelle  $\langle \vec{E}^2 \rangle$  du champ électromagnétique au niveau de l'antenne  $A$ .



**Figure 2** Dispositif expérimental à ondes centimétriques

On place la plaque  $P$  à une distance  $D$  d'environ 46 cm de l'émetteur et on relève la tension  $U$ , délivrée par le boîtier pour diverses valeurs de la distance  $d$  entre l'émetteur et l'antenne. Les mesures obtenues sont présentées en figure 3.



**Figure 3** Tension  $U$  en fonction de la distance  $d$  entre l'antenne et l'émetteur

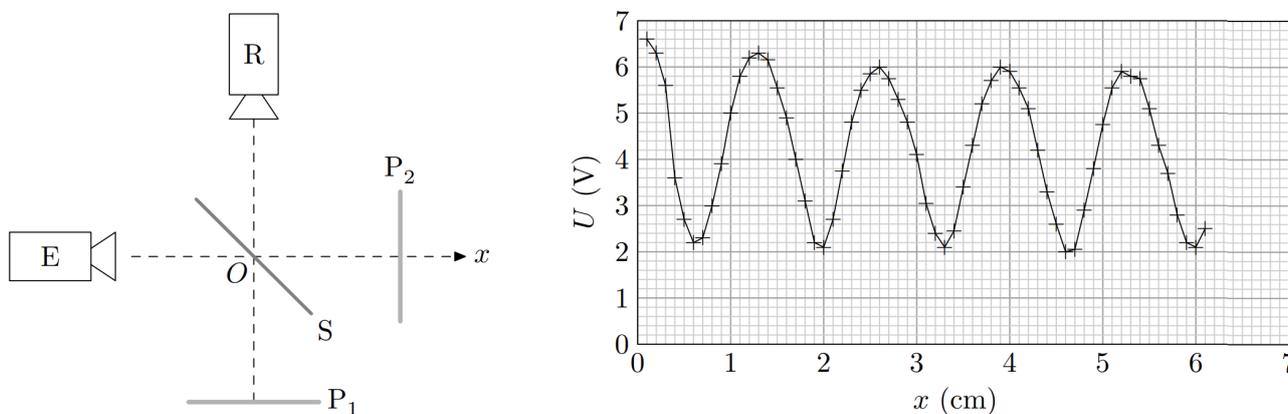
**Q6.** Déduire de l'enregistrement de la figure 3 la fréquence  $f$  des ondes utilisées.

Le constructeur annonce une fréquence  $f_{cons} = 11,0 \pm 1,1$  GHz, soit une incertitude-type  $u_{cons} = \frac{1,1}{11,0} = 0,1$ .

**Q7.** Estimer l'incertitude-type sur la fréquence déterminée expérimentalement et discuter de l'acceptabilité de la mesure par rapport aux données constructeur par un calcul d'écart normalisé.

La figure 4 présente une deuxième expérience.  $E$  et  $R$  sont respectivement un émetteur et un récepteur d'ondes centimétriques,  $P_1$  et  $P_2$  sont deux plaques métalliques et  $S$  est une plaque de bois aggloméré. Le récepteur  $R$  fonctionne comme l'antenne et le boîtier électronique utilisés lors de l'expérience précédente.

Les deux plaques  $P_1$  et  $P_2$  étant perpendiculaires entre elles, on déplace la plaque  $P_2$  selon l'axe  $Ox$  et on mesure la tension  $U$ , délivrée par le récepteur, la position  $x$  de la plaque étant relevée par rapport à une origine arbitraire.



**Figure 4** Expérience en ondes centimétriques

**Q8.** Expliquer le rôle des éléments  $P_1$ ,  $P_2$  et  $S$ . À quel autre montage rencontré en travaux pratiques ce montage est-il analogue ?

**Q9.** Établir l'expression de la tension  $U(x)$  en introduisant les grandeurs utiles. Déduire des mesures une estimation de la fréquence des ondes.

**Q10.** Estimer le contraste associé à la courbe expérimentale et proposer une explication à sa valeur.

## II. – De la difficulté de blinder efficacement

Au moment de l'explosion d'une bombe nucléaire dans la haute atmosphère, les produits de la désintégration des noyaux d'uranium se trouvent dans un état excité. Ils se désexcitent en quelques nanosecondes en

émettant des photons  $\gamma$  d'énergie supérieure à 1 MeV, qui vont fortement ioniser l'atmosphère en engendrant un courant électrique très intense. L'impulsion d'ondes électromagnétiques de durée courte, quelques dizaines de nanosecondes, qui en résulte, peut détruire les dispositifs électroniques même situés à grande distance du lieu de l'explosion.

À la distance  $D = 10^3$  km du centre de l'explosion, on estime que la densité volumique d'énergie électromagnétique engendrée par le flux de rayons  $\gamma$  est de l'ordre de  $0,2 \text{ mJ/m}^3$ .

**Q11.** Rappeler l'expression de la densité volumique d'énergie électromagnétique associée à un champ électrique  $\vec{E}$ .

**Q12.** On donne la valeur de la permittivité du vide  $\epsilon_0 = 8,84 \cdot 10^{-12}$  SI. En déduire un ordre de grandeur grossier pour la norme du champ électrique. Commenter.

*Le problème du blindage - c'est-à-dire de la protection - des appareils sensibles est dans ce contexte une question de survie.*

*D'une manière générale, l'appareil à protéger est disposé à l'intérieur d'une enceinte métallique fermée qui empêche le champ électromagnétique extérieur de pénétrer. Le blindage est efficace si la cavité où se trouve le détecteur est fermée. Mais en pratique, l'appareil considéré dépend presque toujours de l'extérieur pour fonctionner et communiquer. On peut dire, par exemple, que le câble d'alimentation ou l'antenne sont autant de défauts à la cuirasse. Cette partie porte sur un mécanisme possible de transfert d'énergie électromagnétique à travers les ouvertures mêmes petites du blindage.*

Considérons la situation simple suivante. Deux résistances  $R_1$  et  $R_2$  sont reliées par deux fils.  $R_1$  est placée dans un boîtier métallique fermé tandis que  $R_2$  est à l'extérieur. Un des fils de liaison de rayon  $d_1$  traverse le boîtier métallique à travers une ouverture cylindrique de rayon  $d_2$  pratiquée dans la paroi métallique. Les autres bornes des conducteurs ohmiques sont reliées directement au boîtier.

## II. – A – Étude électrocinétique

L'impulsion électromagnétique entraîne une force électromotrice induite du type  $e(t)$  telle que  $e(t) = 0$  pour  $t < 0$  et pour  $t > T$ ,  $e(t) = e_{max}$  si  $0 < t < T$ . Comme le fil isolé est proche de la paroi métallique, il existe un effet capacitif, que nous supposons localisé au niveau du passage cylindrique à travers le boîtier de blindage.

Le schéma ci-contre traduit un modèle électrocinétique de la situation considérée.

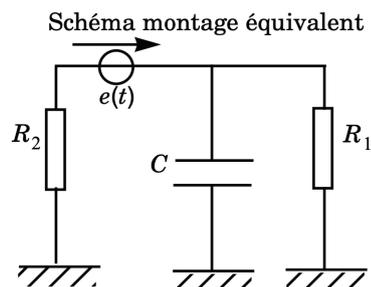


Figure 7

**Q13.** Établir l'équation différentielle vérifiée par la tension aux bornes du condensateur  $u_C(t)$ .

**Q14.** En déduire  $u_C(t)$  pour  $0 < t < T$ .

**Q15.** Montrer que l'intensité du courant circulant dans la résistance  $R_1$  durant l'impulsion se met sous la forme :

$$i(t) = I_M \left( 1 - \exp \left( -\frac{t}{\tau} \right) \right)$$

Cette modélisation électrocinétique montre que l'onde électromagnétique générée par l'explosion nucléaire peut pénétrer dans l'enceinte à protéger en dépit de la présence du blindage. Ceci est lié au fait que la cavité

n'est pas totalement fermée. Afin de comprendre ce processus, il faut déterminer le champ magnétique et le champ électrique au niveau du passage du fil à travers le boîtier.

## II. – B – Champ magnétique créé par le fil parcouru par $i$

Le fil de liaison de rayon  $d_1$  est assimilé à un fil rectiligne infini, d'axe  $Oz$  parcouru par un courant d'intensité  $i$ .

- Q16.** Donner l'expression de la densité volumique de courant  $\vec{j}$  supposée uniforme lorsque le fil de rayon  $d_1$  est parcouru par un courant d'intensité  $i$ .
- Q17.** Indiquer les caractéristiques géométriques du champ magnétique créé par ce courant.
- Q18.** Calculer la norme du champ magnétique en un point situé à la distance  $r$  de l'axe de révolution du fil. On distinguera les deux cas :  $0 < r < d_1$  et  $r > d_1$ .

## II. – C – Champ électrostatique dans l'ouverture

On cherche à estimer le champ électrique régnant dans l'espace entre le fil et le blindage. Le boîtier de blindage est porté au potentiel constant  $V_0 = 0$ , tandis que le fil de rayon  $d_1$  est au potentiel  $V_1$  lui aussi constant.

Le rayon de l'ouverture vaut  $d_2$  ( $d_2 > d_1$ ) et l'épaisseur de la paroi de blindage est notée  $h$ . On considérera les conducteurs comme parfaits.

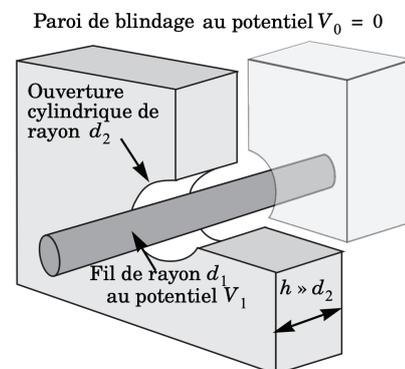


Figure 8

- Q19.** On néglige les effets de bords en supposant que le potentiel  $V(M)$  ne dépend que de la variable  $r$  de position en coordonnées cylindriques d'axe  $Oz$  suivant l'axe du fil. Rappeler l'équation qui régit  $V$  potentiel électrostatique dans une région vide de charges. Montrer que  $V(r) = \alpha \ln(r) + \beta$  est solution du problème.
- Q20.** Expliciter les constantes  $\alpha$  et  $\beta$  en fonction des données.
- Q21.** Calculer le champ électrostatique  $\vec{E}_0(r)$  régnant dans l'espace séparant le fil de la boîte de blindage.

## II. – D – Champ électrique dans le fil parcouru par un courant

- Q22.** Indiquer les caractéristiques du champ électrique noté  $\vec{E}_{cond}$  existant dans le fil de cuivre de rayon  $d_1 = 0,5 \text{ mm}$  parcouru par un courant d'intensité  $i = 10 \text{ mA}$  sachant que la conductivité du cuivre vaut  $\gamma_{Cu} = 5,88 \cdot 10^7 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ .
- Q23.** Comparer ce champ électrique à  $\vec{E}_0(r)$  pour  $d_1 < r < d_2$  avec  $d_2 = 1,0 \text{ mm}$  et  $V_1 = 10 \text{ V}$ .

Ce calcul montre que la distribution de charges électriques est en pratique indépendante de l'intensité du courant parcourant le fil.

## II. – E – Champ électrique dans l'espace inter-armatures en régime variable

On se place dans l'espace inter-armatures, donc pour  $d_1 < r < d_2$ . Lors de la charge du condensateur, un courant d'intensité variable  $i(t) = I_M \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right)$  passe dans le fil.

On peut montrer qu'en régime variable le champ électrique diffère du champ électrostatique  $\vec{E}_0$  et présente une composante supplémentaire axiale  $\vec{E}_1(r, t) = E_1(r, t)\vec{u}_z$ .  
De plus, il y a continuité de cette composante axiale en  $d_1$ .

**Q24.** En utilisant l'équation de Maxwell-Faraday, expliciter le champ  $\vec{E}_1(r, t)$ .

Montrer que, dans les conditions étudiées, on peut négliger  $\|\vec{E}_1(r, t)\|$  devant  $\|\vec{E}_0(r, t)\|$ . On pourra prendre  $I_M = 10 \text{ mA}$  pour l'application numérique.

## II. – F – Transfert d'énergie électromagnétique

**Q25.** Vecteur de Poynting

- Rappeler l'expression du vecteur de Poynting  $\vec{\Pi}$ . Quelle est la signification physique de ce vecteur ?
- Montrer que le flux de  $\vec{\Pi}$  à travers une section droite perpendiculaire à l'axe du fil est nul, donc pour  $0 < r < d_1$ .
- En utilisant les questions précédentes, calculer le flux de  $\vec{\Pi}$  à travers une section droite de l'espace inter-armatures pour  $d_1 < r < d_2$ .

**Q26.** Transfert énergétique

- Calculer l'énergie électromagnétique entrée dans le boîtier de blindage.
- Peut-on dire que « ...L'avantage va actuellement à l'épée par rapport à la cuirasse... » ?

**\*\*\* FIN DE L'ÉNONCÉ \*\*\***