

Durée : 4h

- l'usage de la calculatrice est autorisé
- les exercices sont indépendants
- les résultats devront être encadrés

Exercice n°1 : Tuyau sonore**ENAC 2020**

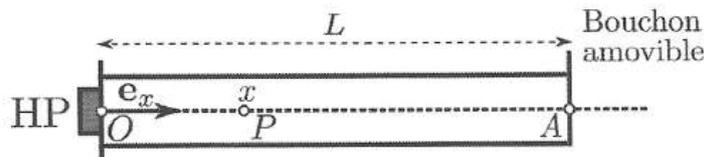
Cet exercice se présente sous la forme d'un QCM.

Chaque question comporte **au plus deux réponses exactes**. Pour chaque question, notez son numéro dans votre copie, et indiquez uniquement, **sans justification** :

- les deux lettres correspondant aux réponses justes si vous pensez qu'il y en a deux ;
- la lettre correspondant à la réponse juste si vous pensez qu'il n'y en a qu'une ;
- la lettre E si vous pensez qu'aucune des réponses A, B, C ou D n'est correcte.

Une réponse n'est comptée comme juste que si la bonne lettre est choisie, ou les deux bonnes lettres le cas échéant. **Aucun point ne sera retiré en cas de réponse fausse.**

L'air contenu dans un tuyau cylindrique, de longueur $L = OA = 2 \text{ m}$, est excité par un haut-parleur (HP) émettant des ondes acoustiques sinusoïdales de fréquence f . Un bouchon situé en A ferme l'extrémité droite du tuyau. On note $\Psi_f(x, t)$ la fonction d'onde de l'onde acoustique dans le tuyau, x étant l'abscisse d'un point P situé à l'intérieur du tube sur l'axe (O, e_x) et t , le temps. La vitesse du son dans le tuyau vaut $c_s = 340 \text{ m.s}^{-1}$ (Fig. ci-après).



Aucune connaissance spécifique sur les ondes acoustiques n'est nécessaire pour aborder cette partie.

On observe que les ondes dans le tuyau se superposent pour former une onde stationnaire d'amplitude ψ_m . En présence du bouchon, elle vérifie les conditions aux limites, ainsi que la condition initiale suivantes :

$$\Psi_f(0, t) = 0 \quad , \quad \Psi_f(L, t) = 0 \quad \text{et} \quad \Psi_f(x, 0) = 0$$

1. En introduisant une constante spatiale et temporelle k_f , indiquer l'expression correcte de cette onde stationnaire :

A) $\Psi_f(x, t) = \psi_m \sin(2\pi ft - k_f x)$ C) $\Psi_f(x, t) = \psi_m \sin(2\pi ft) \sin(k_f x)$
 B) $\Psi_f(x, t) = \psi_m \cos(2\pi ft) \sin(k_f x)$ D) $\Psi_f(x, t) = \psi_m \cos(2\pi ft) \cos(k_f x)$

2. Calculer numériquement la fréquence $f_{1,f}$ de l'harmonique fondamentale.

A) $f_{1,f} \approx 6 \text{ mHz}$ B) $f_{1,f} \approx 12 \text{ mHz}$ C) $f_{1,f} = 42,5 \text{ Hz}$ D) $f_{1,f} = 85 \text{ Hz}$

3. En introduisant l'entier $n > 0$, déterminer l'expression des longueurs d'ondes λ_n des ondes stationnaires qui peuvent exister dans le tuyau :

A) $\lambda_n = \frac{L}{n}$ B) $\lambda_n = \frac{2L}{n}$ C) $\lambda_n = nL$ D) $\lambda_n = 2nL$

4. Le bouchon est désormais retiré. On observe alors une nouvelle onde stationnaire dans le tuyau, notée $\Psi_o(x, t)$, de même amplitude ψ_m . L'ouverture du tuyau modifie les conditions aux limites, la condition initiale restant la même :

$$\Psi_o(0, t) = 0 \quad , \quad \Psi_o(L, t) = \psi_m \quad \text{et} \quad \Psi_o(x, 0) = 0$$

En introduisant une nouvelle constante spatiale et temporelle k_o , déterminer l'expression de $\Psi_o(x, t)$:

A) $\Psi_o(x, t) = \psi_m \sin(2\pi ft + k_o x)$ C) $\Psi_o(x, t) = \psi_m \sin(2\pi ft) \sin(k_o x)$
 B) $\Psi_o(x, t) = \psi_m \cos(2\pi ft) \sin(k_o x)$ D) $\Psi_o(x, t) = \psi_m \sin(2\pi ft) \cos(k_o x)$

5. Calculer numériquement la fréquence $f_{1,o}$ de l'harmonique fondamentale.

A) $f_{1,o} \approx 6 \text{ mHz}$ B) $f_{1,o} \approx 12 \text{ mHz}$ C) $f_{1,o} = 42,5 \text{ Hz}$ D) $f_{1,o} = 85 \text{ Hz}$

6. En introduisant l'entier $m > 0$, déterminer l'expression des longueurs d'ondes λ_m des ondes stationnaires qui peuvent exister dans le tuyau :

A) $\lambda_m = \frac{L}{2m}$ B) $\lambda_m = \frac{L}{m}$ C) $\lambda_m = \frac{L}{m/2 + 1/4}$ D) $\lambda_m = \frac{L}{m + 1/2}$

Préambule

L'électrosphère est une couche atmosphérique ionisée. L'électrosphère et la Terre, de rayon $R = 6\,370\text{ km}$, forment un gigantesque condensateur terrestre (figure 1), où le champ électrique par beau temps est dirigé de l'électrosphère vers la Terre et atteint environ $100\text{ à }120\text{ V.m}^{-1}$.

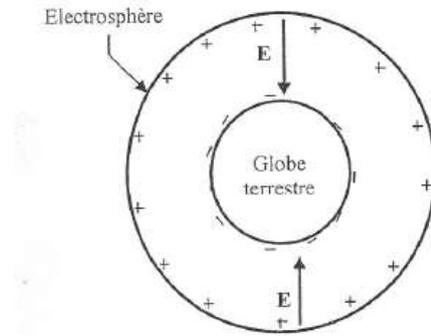


Figure 1 - Terre et électrosphère

Les armatures de ce condensateur sont l'électrosphère et le globe terrestre, entre lesquelles il y a la troposphère et la stratosphère qui constituent le diélectrique, dont l'épaisseur est d'environ 80 km .

L'air comprend en permanence des charges électriques, positives et négatives, créées par les rayonnements cosmiques ou la radioactivité de la Terre. Par beau temps, il en résulte un courant atmosphérique de densité volumique \vec{J} tendant à décharger le condensateur.

Suite aux perturbations atmosphériques et sous certaines conditions, il se forme des nuages orageux en général du type cumulo-nimbus (figure 2) de couleur sombre. Ils constituent une gigantesque machine thermique dont la base et le sommet sont respectivement à environ 2 km et 15 km d'altitude. Sa constitution est rendue possible par l'élévation d'air chaud par des courants ascendants dont la vitesse est de quelques mètres par seconde. Lors de son ascension, cette masse d'air se charge en humidité jusqu'à devenir un nuage. La partie supérieure, où il fait froid, est occupée par les particules de glace, tandis que les gouttes d'eau s'établissent dans la partie inférieure.

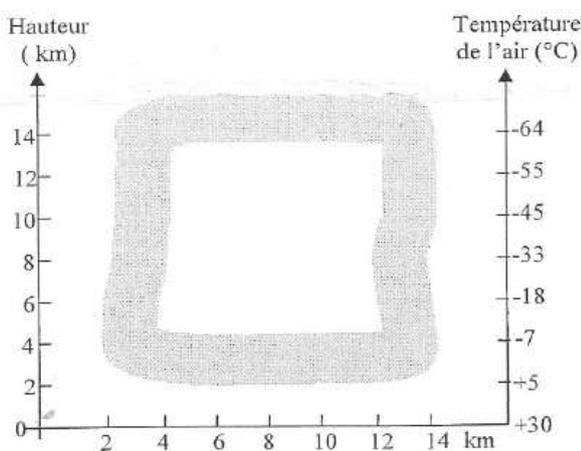


Figure 2 - Cumulo-nimbus

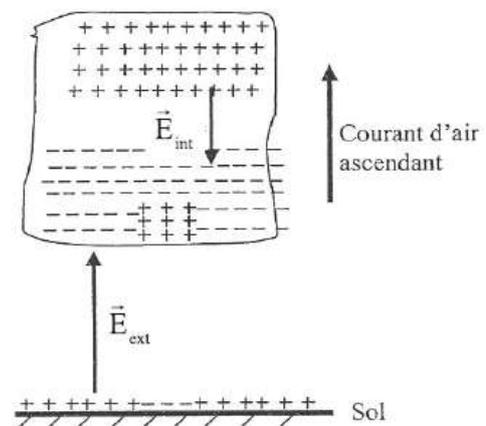


Figure 3 - Dipôles électriques

Les violents courants ascendants provoquent des collisions entre les gouttes d'eau et les micro-particules de glace, ce qui produit la création de charges électriques par frottement. Ces micro-particules de glace, plus légères et chargées positivement, sont emportées vers le haut par le courant d'air ascendant et occupent ainsi la partie supérieure du nuage qui forme le pôle positif. Tandis que les gouttes d'eau chargées négativement s'établissent dans la partie inférieure et créent le pôle négatif. Cependant, une petite quantité de charges positives demeurent à la base du nuage.

Le nuage fait apparaître sur la Terre, par influence électrique, une charge de signe opposé et crée ainsi deux véritables dipôles électriques (figure 3) :

- un dipôle interne, généré entre les pôles positif et négatif du nuage. Si le champ électrique interne \vec{E}_{int} devient suffisamment grand, il provoque un claquage interne dans le nuage ;
- un dipôle externe, généré entre la base du nuage et la surface de la Terre. Si le champ électrique externe \vec{E}_{ext} atteint des conditions critiques de l'ordre de 20 kV.m^{-1} , il finit par provoquer une grande décharge entre le nuage et la Terre.

B - La foudre

B.1 - Etude d'un condensateur sphérique

Un condensateur sphérique à air (figure 5), dont la permittivité diélectrique est assimilable à celle du vide ϵ_0 , est formé de deux armatures concentriques, de rayon R_1 et R_2 , avec $R_1 < R_2$.

L'armature intérieure de rayon R_1 porte une charge totale Q uniformément répartie. L'armature extérieure porte la charge totale $-Q$ uniformément répartie.

On travaillera ici dans la base classique des coordonnées sphériques $(\vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_\varphi)$ et dans l'approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS).

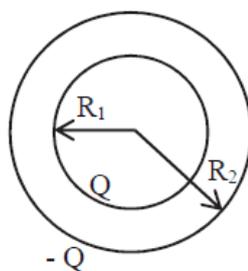


Figure 5 - Condensateur sphérique

- 13) Par des arguments clairs et précis d'invariance et de symétrie, justifier qu'entre les armatures, le champ électrique est de la forme : $\vec{E} = E(r) \vec{e}_r$.
- 14) a) Déterminer l'expression du champ électrique $\vec{E}(r)$ entre les armatures, en fonction de r , Q et ϵ_0 .

- b) En déduire la différence de potentiel $V_1 - V_2$ entre les deux armatures en fonction de Q , R_1 , R_2 et ϵ_0 .
- c) En déduire l'expression de la capacité de ce condensateur sphérique en fonction de R_1 , R_2 et ϵ_0 .

15) Le diélectrique n'est pas parfait. Il possède une résistivité électrique certes grande mais finie. Il circule alors un courant de densité volumique \vec{j}_v dans tout l'espace inter-conducteur. Faire un dessin montrant l'allure et le sens des lignes de courant dans le cas où $Q > 0$.

B.2 - Analyse du préambule

En vous appuyant sur le texte fourni en préambule, répondre aux six questions suivantes :

- 16) Donner une valeur approchée de la capacité du condensateur délimité par l'électrosphère et le globe terrestre.
- 17) Quel est l'ordre de grandeur de l'énergie électrique stockée en permanence et par beau temps dans l'électrosphère ?
- 18) Le champ électrique qui règne à la surface de la Terre est-il, en général, dans le même sens ou en sens opposé suivant que le temps est clément ou orageux ?
- 19) a) Lequel de l'éclair ou de la foudre correspond à un claquage diélectrique interne au nuage ?
b) La foudre est-elle toujours descendante ou non ?
- 20) Quel est l'ordre de grandeur de la différence de potentiel entre la Terre et le nuage juste avant l'arrivée de la foudre ?
- 21) Quel est l'ordre de grandeur de l'énergie véhiculée par un coup de foudre de courant $I = 50\ 000\ \text{A}$ et d'une durée de $10\ \text{ms}$? Dans le cadre des énergies renouvelables, vous paraît-il judicieux de vouloir récupérer cette énergie ou non ? Une argumentation de quelques mots est attendue.

B.3 - Coup de foudre sur une ligne électrique

L'impact direct de la foudre (figure 6) sur une ligne électrique ou une ligne téléphonique, génère une onde qui se propage dans les deux sens. Le courant de foudre I peut atteindre $50\ 000\ \text{A}$ et générer une onde de tension supérieure à $10^6\ \text{V}$.

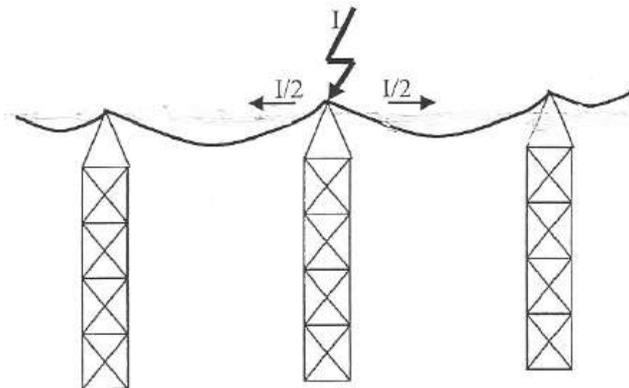


Figure 6 - Impact direct sur une ligne électrique

Aspect dynamique

On modélise pour cet aspect dynamique, une portion de ligne électrique, de longueur dx , par la cellule suivante (figure 7) où l et c représentent respectivement l'inductance linéique et la capacité linéique de la ligne.

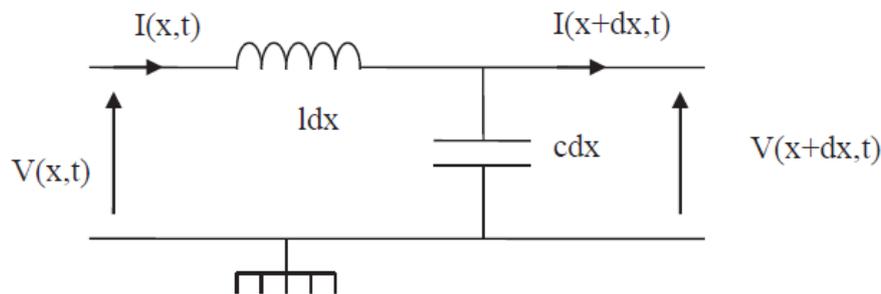


Figure 7 - Modèle électrique d'une portion de ligne

- 22) a) Expliciter le système d'équations aux dérivées partielles couplées vérifié par les fonctions $V(x,t)$ et $I(x,t)$.
b) En déduire les deux équations aux dérivées partielles, découplées, vérifiées par la fonction $V(x,t)$ d'une part, puis par la fonction $I(x,t)$ d'autre part.

Lors d'un dysfonctionnement d'une partie du réseau de distribution électrique de fréquence $f = 50$ Hz et compte-tenu des inductances des lignes, les disjoncteurs de fortes intensités ne peuvent ouvrir le circuit que lors d'un passage par zéro du courant électrique. Il n'est donc pas rare d'attendre un temps de l'ordre de quelques millisecondes avant de pouvoir ouvrir une portion de ligne parcourue par un courant électrique jugé trop important.

- 23) a) A quelle vitesse se propage l'onde de tension ou l'onde de courant liée à la foudre sur une ligne électrique ?
b) Jusqu'à quelle distance d peut se faire ressentir un coup de foudre 1 ms après son impact ?
c) Application numérique : évaluer la distance d .

Aspect thermique

On se propose ici d'écrire une équation permettant de déterminer un ordre de grandeur de l'élévation de température, notée ΔT_{foudre} , atteinte par un tronçon de ligne électrique, en almélec, assimilable à un cylindre de rayon $R = 3$ cm, traversé par un courant de foudre d'intensité supposée constante et égale à 25 000 A ($I/2$) pendant une durée Δt de 10 ms.

Les candidats devront faire preuve d'initiatives pour résoudre cet aspect et veilleront à ne pas passer plus de 15 minutes dessus.

- 24) Définir votre système ainsi qu'un modèle simple d'étude.
25) Recenser, en précisant leur unité, les grandeurs physiques dont vous avez besoin pour résoudre ce problème.
26) Ecrire pour ΔT_{foudre} une équation faisant intervenir les grandeurs précitées.

B.4 - Protection contre la foudre et prise de terre

L'élévation de la température ΔT_{foudre} n'est pas suffisante pour détériorer la ligne électrique. Néanmoins, il convient de dévier le courant de foudre vers la Terre de façon à ne pas laisser se propager des ondes de tension qui pourraient endommager les appareils électriques des usagers.

Une prise de terre (figure 8) est constituée d'une coque hémisphérique métallique de centre O, de rayon intérieur R_a et de rayon extérieur R_b . On note $\gamma_{\text{mét}}$ la conductivité électrique du métal qui la constitue. Cette prise est enfoncée dans le sol, assimilé au demi espace $z < 0$ et de conductivité électrique γ_{sol} .

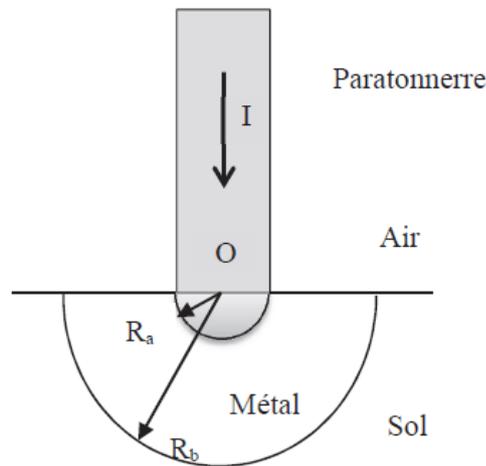


Figure 8 - Modèle simplifié d'une prise de terre

La prise de terre se décompose ainsi en deux résistances hémisphériques $R_{\text{métal}}$ et R_{sol} , l'une en métal de rayon intérieur R_a et de rayon extérieur R_b , l'autre associée au sol de rayon intérieur R_b et de rayon extérieur infini.

Elle est destinée à recevoir un courant I provenant d'un paratonnerre. Il sera supposé indépendant du temps et descendant.

On suppose que le courant, qui traverse la prise de terre, est radial. Sa densité est de la forme $\vec{j} = j(r)\vec{e}_r$ en coordonnées sphériques.

- 27) a) Rappeler l'unité de la grandeur $j(r)$.
b) Donner l'expression de la densité de courant $j(r)$ en fonction de I et de r .
- 28) a) Exprimer alors le champ électrique $E(r)$ régnant dans le sol.
b) En déduire en fonction de I , r et γ_{sol} , l'expression du potentiel électrique $V(r)$ régnant dans le sol. On supposera que $V = 0$ loin du point O.
- 29) Cette répartition non uniforme du potentiel à la surface de la Terre explique le foudroiement indirect des hommes ou des animaux.
On appelle R_h la résistance du corps humain mesurée entre ses deux pieds supposés distants de a . Pour ne pas être électrocuté (c'est-à-dire pour que son corps ne soit pas traversé par un courant supérieur à une valeur seuil notée : I_{max}), un homme doit rester éloigné d'une distance au moins égale à D de la prise de terre.
a) Trouver une relation entre D , a , R_h , I , I_{max} et γ_{sol} .

- b) En supposant $D \gg a$, exprimer D en fonction de a , R_h , I , I_{\max} et γ_{sol} .
- c) Application numérique : évaluer D pour $I = 5,0 \cdot 10^4$ A.
- d) Ce phénomène d'électrocution à distance touche-t-il plutôt les grands animaux (vaches, chevaux, ...) ou les petits animaux (lapins, renards, ...) ?

30) Expression de la résistance d'une coque hémisphérique

On considère une coque hémisphérique homogène de conductivité électrique γ , comprise entre les rayons R_{int} et R_{ext} et parcourue par un courant radial.

On la décompose en une infinité de coques hémisphériques élémentaires comprises entre les rayons r et $r + dr$.

a) Exprimer en fonction de γ , r et dr , la résistance élémentaire dR_c d'une coque hémisphérique élémentaire.

b) En déduire en fonction de γ , R_{int} et R_{ext} , la résistance totale R_c de la coque hémisphérique.

31) a) Donner l'expression de la résistance globale, notée R_{glob} , de la prise de terre en fonction de $\gamma_{mét}$, γ_{sol} , R_a et R_b .

b) Application numérique : évaluer R_{glob} pour $R_a = 1,0$ cm, $R_b = 35$ cm, $\gamma_{mét} = 6,0$ S. m⁻¹.

c) La législation en terme de sécurité électrique impose que $R_{glob} < 25 \Omega$, est-ce respecté dans le cas de cette prise ? Sinon, que préconisez-vous pour remédier à ce problème ?

Exercice n°3 : Le four à micro-ondes

CCINP TPC 2020

Partie I - Généralités

De manière schématique, un four à micro-ondes est une cavité parallélépipédique rectangulaire constituée de six faces métalliques qui réfléchissent parfaitement les ondes électromagnétiques intérieures. Ces ondes sont produites et amenées dans la cavité par un dispositif qui ne sera pas étudié.

Les six faces du four sont supposées parfaitement planes et cinq d'entre elles sont pleines. La dernière est la porte vitrée qui contient une grille métallique dont le rôle est de permettre d'observer l'intérieur du four tout en empêchant la fuite du rayonnement électromagnétique.

Le four est étudié sans aliments et l'air qu'il contient est assimilé au vide.

Q32. Extraire de la documentation (**document 2**) les dimensions de la cavité du four, que l'on notera respectivement d_x pour la largeur, d_y pour la profondeur et d_z pour la hauteur.

Q33. Extraire de la documentation (**document 2**) la fréquence f de fonctionnement du four. Sachant que cette fréquence est connue à $\Delta f = \pm 50$ MHz près, déterminer la longueur d'onde correspondante. On présentera le résultat sous la forme $(\lambda \pm \Delta\lambda)$ cm.

Donnée : vitesse de la lumière dans le vide $c = 3,00 \cdot 10^8$ m · s⁻¹.

Document 2 - Spécifications techniques d'un four à micro-ondes

Alimentation	230 V
Dimensions extérieures ($L \times H \times P$ mm)	523 \times 309 \times 506
Dimensions de la cavité ($L \times H \times P$ mm)	373 \times 233 \times 370
Dimensions emballées ($L \times H \times P$ mm)	594 \times 380 \times 554
Fréquence de fonctionnement	2 450 MHz
Puissance absorbée (en fonctionnement micro-ondes)	1,40 kW
Puissance absorbée (en fonctionnement grill)	1,50 kW



Figure 11 - Dimensions

(L = largeur ; H = hauteur ; P = profondeur)

Source : www.samsung.fr

Partie III - Confinement des ondes électromagnétiques dans le four

On suppose ici que les six faces du four sont identiques et modélisées par des plans métalliques infiniment conducteurs. L'intérieur du four est assimilable au vide.

Q39. Énoncer les équations de Maxwell générales en présence de charges et de courants.

Q40. En l'absence de charges et de courants, établir l'équation de propagation tridimensionnelle du champ électrique $\vec{E}(M, t)$. Nommer cette équation.

Rappels : $\overrightarrow{\text{rot}}(\overrightarrow{\text{rot}}\vec{E}) = \overrightarrow{\text{grad}}(\text{div}\vec{E}) - \Delta\vec{E}$ et $\mu_0\varepsilon_0c^2 = 1$.

Le problème étant identique dans les 3 directions de l'espace, son étude est temporairement réduite à une seule dimension. On choisit arbitrairement de travailler le long de l'axe des x .

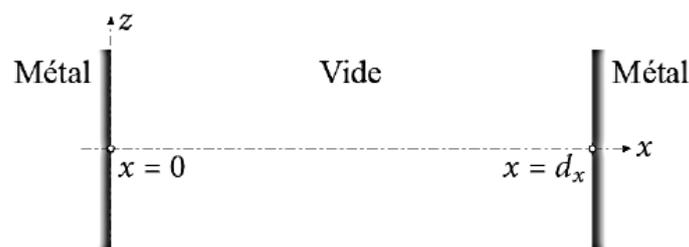


Figure 14 - Cavité métallique

On souhaite déterminer l'expression du champ électromagnétique présent entre les deux plans conducteurs distants de d_x (figure 14). En représentation cartésienne, on cherche le champ électrique de l'onde sous la forme :

$$\vec{E}(M, t) = E_0 \cos(kx - \varphi) \cos(\omega t) \vec{e}_z$$

où $E_0 \in \mathbb{R}^*$, $k \in \mathbb{R}^*$, $\varphi \in \mathbb{R}$ et $\omega \in \mathbb{R}^*$.

Dans cette **partie**, on suppose que le champ électrique est nul dans le métal.

Q41. Donner 4 qualificatifs permettant de caractériser cette onde.

Q42. On admet que la composante tangentielle du champ électrique est continue à l'interface vide-métal, en $x=0$ et $x=d_x$. En déduire les valeurs de φ et k . On choisira pour φ la plus petite valeur positive possible et on exprimera k notamment en fonction d'un entier naturel n .

Q43. Représenter sur un même schéma l'allure du fondamental et des deux harmoniques suivants de l'onde dans la cavité.

Citer, dans d'autres domaines de la physique, deux exemples avec lesquels une analogie pourrait être menée.

Le traitement tridimensionnel du problème permet de relier les longueurs d'ondes des modes de la cavité aux paramètres de la cavité à l'aide d'un triplet (m, p, q) d'entiers naturels tel que :

$$\frac{1}{\lambda^2} = \frac{m^2}{4d_x^2} + \frac{p^2}{4d_y^2} + \frac{q^2}{4d_z^2} \text{ où } m \in \mathbb{N}^*, p \in \mathbb{N}^* \text{ et } q \in \mathbb{N}^*.$$

À l'altitude z fixée, la représentation de l'amplitude de l'une des composantes du champ électrique correspondant est proposée sur la **figure 15**, pour un mode propre particulier (c'est-à-dire un triplet (m, p, q) particulier).

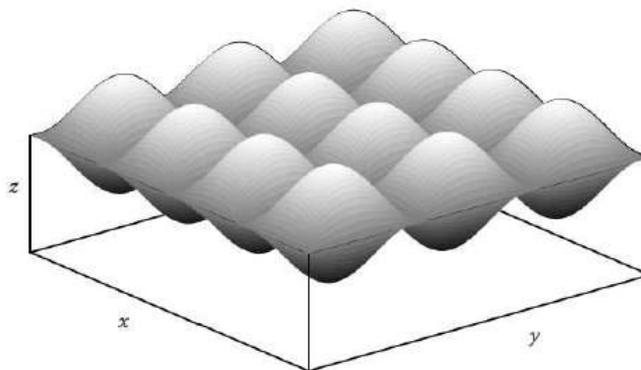


Figure 15 - Représentation tridimensionnelle d'un mode propre dans le four

Q44. Le tableau suivant donne, pour quelques-uns des triplets (m, p, q) possibles, la longueur d'onde et la fréquence correspondante.

m	p	q	λ (cm)	f (GHz)
1	5	2	12,3	2,43
2	3	3	12,4	2,42
3	2	3	12,4	2,42
3	5	1	12,3	2,44
5	1	2	12,4	2,42
5	3	1	12,3	2,43

Pour quelles valeurs de m et de p la **figure 15** a-t-elle été tracée ? En déduire s'il s'agit d'un mode propre possible dans le four.

Dans un four à micro-ondes dont la rotation du plateau a été bloquée, l'effet de l'onde a été observé par imagerie thermique au sein d'une fine pellicule d'eau placée à mi-hauteur (**figure 16**).

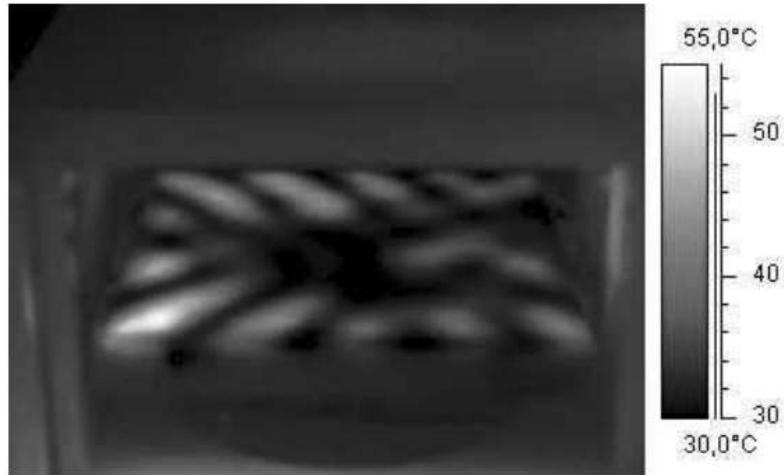


Figure 16 - Image thermique

Q45. Expliquer pourquoi il est difficile de déduire la longueur d'onde de l'onde électromagnétique à partir de la position de nœuds et de ventres observés expérimentalement sur l'image thermique.

Partie IV - Pénétration de l'onde dans le métal

En réalité, le champ électromagnétique n'est pas nul dans le métal. Une partie de l'onde électromagnétique pénètre dans les parois métalliques du four (**figure 17**) et s'atténue avec la distance. Celles-ci doivent donc être suffisamment épaisses pour que l'onde ne puisse les traverser que faiblement.

On s'intéresse à une onde électromagnétique dont le champ électrique s'écrit en notation complexe :

$$\vec{E}(M, t) = E_0 \exp i(\omega t + \underline{k}x) \vec{e}_z \text{ où } E_0 \in \mathbb{R}^*, \omega \in \mathbb{R}^*, \underline{k} \in \mathbb{C}^* \text{ et } i^2 = -1.$$

Les parois du four sont en céramique émaillée d'épaisseur 2,00 mm, assimilable à de l'aluminium de conductivité électrique $\gamma = 38,0 \cdot 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$.

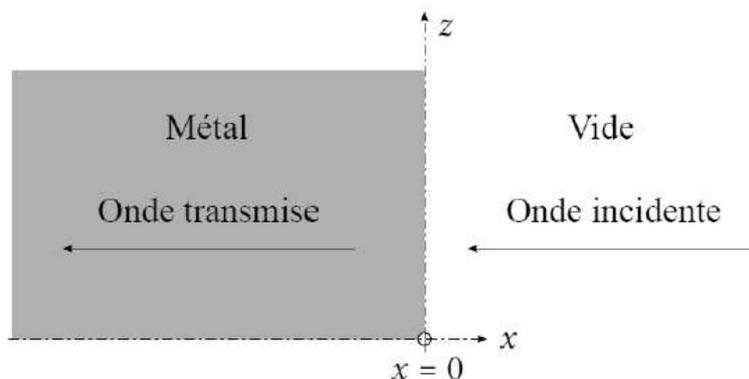


Figure 17 - Transmission de l'onde électromagnétique dans le métal

Q46. La propagation de l'onde dans le métal se fait dans le cadre de l'approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS). Définir ce régime temporel.

- Q47.** On cherche \underline{k} sous la forme $\underline{k} = k' - ik''$, où k' et k'' sont des réels positifs. En déduire que l'expression réelle du champ électrique dans le métal s'écrit :

$$\vec{E}(M, t) = E_0 e^{k''x} \cos(\omega t + k'x) \vec{e}_z.$$

Justifier qu'il y a bien atténuation et propagation de l'onde.

- Q48.** La relation de dispersion de l'onde se propageant dans le métal s'écrit $\underline{k}^2 = -i\mu_0\gamma\omega$. Exprimer k' et k'' définis précédemment en fonction de la distance caractéristique d'atténuation de l'onde dans le métal, notée $\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_0\gamma\omega}}$. Calculer δ .

Donnée : $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$.

- Q49.** Sachant que le champ magnétique dans le métal a pour expression réelle :

$$\vec{B}(M, t) = \frac{E_0}{\omega} e^{k''x} [k' \cos(\omega t + k'x) + k'' \sin(\omega t + k'x)] \vec{e}_y,$$

déterminer l'expression du vecteur de Poynting instantané \vec{R} se propageant dans le métal, puis sa valeur moyenne temporelle $\langle \vec{R} \rangle_t$.

- Q50.** En déduire le facteur d'atténuation du vecteur de Poynting à l'extérieur du four. Commenter, sachant que les normes sanitaires imposent une puissance surfacique extérieure inférieure à $10,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Données : $\exp(-1 \cdot 10^3) \approx 5 \cdot 10^{-435}$ et $\exp(-2 \cdot 10^3) \approx 3 \cdot 10^{-869}$.

FIN

ANNEXE de l'exercice 2

Constantes physiques universelles

Permittivité diélectrique du vide : $\epsilon_0 = \frac{1}{36.\pi.10^9} \text{ F.m}^{-1}$.

Accélération de la pesanteur : $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$.

Constante des gaz parfaits : $R = 8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$.

Nombre d'Avogadro : $N = 6,022.10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

Constante de Faraday : $1 \text{ Faraday} = 96\,500 \text{ C.mol}^{-1} = N.e$ (e = charge élémentaire d'un proton).

Caractéristiques électriques d'une ligne électrique

Inductance linéique : $l = 1,5 \text{ mH.km}^{-1}$.

Capacité linéique : $c = 10 \text{ nF.km}^{-1}$.

Physique du sol et du corps humain

Conductivité électrique du sol : $\gamma_{\text{sol}} = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ S.m}^{-1}$.

Résistance électrique entre deux pieds d'un homme : $R_h = 2,5 \text{ k}\Omega$.

Longueur d'un pas humain : $a = 1,0 \text{ m}$.

Courant d'électrocution d'un être humain : $I_{\text{max}} = 25 \text{ mA}$.

Rappels d'électrostatique

Capacité d'un condensateur plan : $C = \frac{\epsilon_0 S}{e}$ où S est la surface des deux armatures en regard et e la distance entre les armatures.

Densité volumique d'énergie électrostatique : $w_e = \frac{\epsilon_0 E^2}{2}$ où E est le champ électrique.

Energie d'un condensateur : $W = \frac{1}{2} C U^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$ où U est la différence de potentiel entre les deux armatures et Q la charge du condensateur.