

Le sujet comporte deux parties indépendantes.

Partie 1 - Applications des propriétés magnétiques de matériaux

La synthèse de nouveaux matériaux a permis de réaliser des dispositifs possédant des propriétés intéressantes du point de vue de la miniaturisation ou de la sensibilité aux champs électromagnétiques.

Certaines questions, peu ou pas guidées, demandent de l'initiative de la part du candidat. Leur énoncé est repéré par une barre en marge. Il est alors demandé d'explicitier clairement la démarche, les choix et de les illustrer, le cas échéant, par un schéma. Le barème valorise la prise d'initiative et tient compte du temps nécessaire à la résolution de ces questions.

Cet énoncé est accompagné d'un document réponse à remettre avec la copie. Certaines données numériques utiles sont disponibles dans ce document réponse.

Notations

À toute grandeur, fonction sinusoïdale du temps, $g(t) = G \cos(\omega t + \varphi)$, on associe la grandeur $\underline{g}(t) = \underline{G} e^{j\omega t}$, où $j^2 = -1$ et $\underline{G} = G e^{j\varphi}$ est appelée *amplitude complexe* de g .

I Le transformateur miniaturisé

Le besoin de transformateurs de plus en plus petits dans les systèmes électroniques embarqués a conduit à la conception de transformateurs miniaturisés. Les différents éléments (conducteurs, matériaux magnétiques, isolants) sont directement réalisés sur un circuit imprimé. La miniaturisation a été rendue possible grâce à l'utilisation de fréquences élevées et à l'aptitude des nouveaux matériaux à supporter de hautes températures.

Un transformateur est composé de différents matériaux :

- un matériau conducteur pour réaliser les enroulements (ou bobinages) ;
- un matériau magnétique ;
- un matériau isolant pour isoler les enroulements primaire et secondaire.

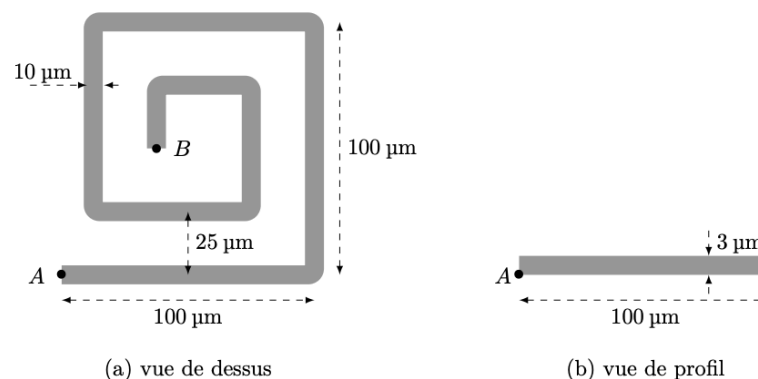


Figure 1 Schéma d'un enroulement en cuivre

I.A – Les enroulements

Q 1. Rappeler l'expression de la résistance électrique R d'un conducteur cylindrique de conductivité γ , de longueur L , de section S , parcouru uniformément par un courant parallèle à son axe.

Q 2. Pour l'enroulement de cuivre de la figure 1, le courant circule de A vers B . Évaluer sa résistance électrique R_e . Citer deux inconvénients que présente l'existence de cette résistance pour un transformateur.

L'inductance propre de l'enroulement peut être mesurée grâce à un impédancemètre dont le schéma est celui de la figure 2. On utilise le modèle de l'amplificateur linéaire intégré idéal de gain infini, alimenté en ± 15 V. La résistance $R_{ref} = 1000,0 \Omega$ est une résistance de référence, l'impédance à mesurer est $\underline{Z} = Z_r + jZ_i$, où Z_r et Z_i sont des nombres réels. Le générateur impose la tension harmonique $u_e(t) = U_0 \cos(\omega t)$.

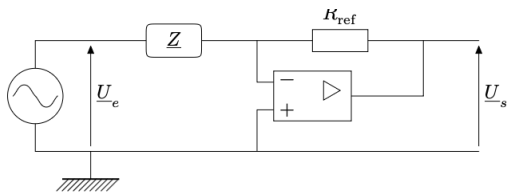
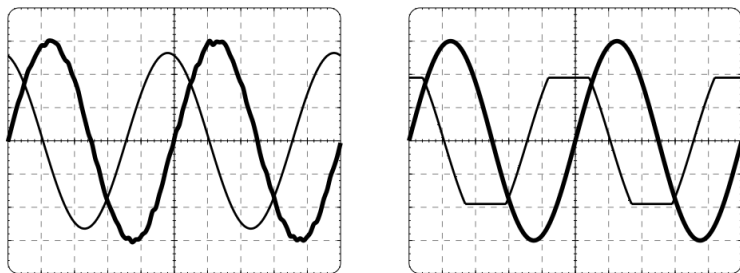


Figure 2 Schéma d'un impédancemètre

Q 3. Exprimer l'amplitude complexe \underline{U}_s en fonction de l'amplitude complexe \underline{U}_e , de R_{ref} et de Z .

La figure 3a donne les graphes des tensions $u_e(t)$ et $u_s(t)$.

Q 4. Calculer Z_r et Z_i . En déduire la valeur L de l'inductance propre de l'enroulement ainsi que la valeur de R_e .



(a) Le gain vertical est 2 mV par carreau pour u_e et 2 V par carreau pour u_s .

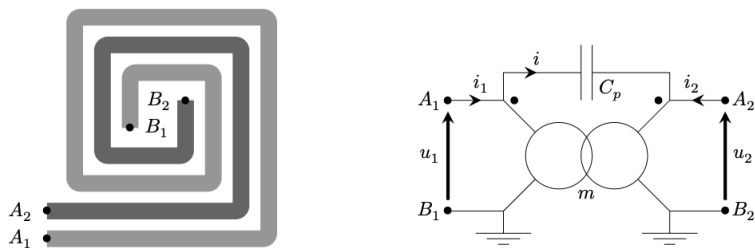
(b) Le gain vertical est 10 mV par carreau pour u_e et 1 V par carreau pour u_s .

Figure 3 Oscillogrammes — La courbe en gras est la tension d'entrée $u_e(t)$, la courbe en trait fin la tension de sortie $u_s(t)$, la base de temps est 200 ns par carreau

Q 5. L'amplitude de la tension d'entrée est portée à la valeur $U_0 = 30$ mV. Préciser l'intérêt d'une telle augmentation d'amplitude. Proposer, en la justifiant, la forme prévisible pour le signal de sortie. Expliquer pourquoi la réduction de la résistance de référence R_{ref} est à envisager si on veut garder $U_0 = 30$ mV.

Q 6. On choisit une résistance de référence plus faible, $R'_{ref} = 100,00 \Omega$. Les courbes obtenues sont représentées figure 3b. Interpréter quantitativement le phénomène observé.

Pour réaliser un transformateur, on dispose un enroulement primaire A_1B_1 et un enroulement secondaire A_2B_2 comme sur la figure 4a. L'enroulement primaire A_1B_1 est identique à l'enroulement AB de la figure 1. Les deux enroulements sont constitués de conducteurs d'épaisseurs identiques. Leur proximité, qui permet d'obtenir un couplage magnétique fort, a l'inconvénient de présenter un couplage électrostatique représenté par une capacité de couplage C_p (figure 4b). Le rapport de transformation pour le transformateur complet (enroulements et matériau ferromagnétique, non représenté) est $m = 0,9$.



(a) Enroulements primaire et secondaire

(b) Modélisation du transformateur complet

Figure 4 Enroulements et modélisation

Q 7. Estimer, en précisant la démarche, la capacité C_p à partir de l'expression de la capacité d'un condensateur plan et de la géométrie des enroulements (figure 1 et figure 4a). Le milieu magnétique qui remplit l'espace

entre les enroulements, non représenté sur la figure 4a, possède une permittivité relative $\epsilon_r = 5 \times 10^4$. Que penser de cette valeur de permittivité relative par rapport à celle de milieux usuels ?

La modélisation de la figure 4b est celle d'un transformateur idéal où l'on a ajouté un condensateur.

Q 8. Établir l'expression de l'intensité i en fonction de C_p , m et $\frac{du_1}{dt}$ pour une intensité de sortie nulle, $i_2 = 0$. En déduire l'expression de i_1 en fonction de C_p , m et $\frac{du_1}{dt}$. Toujours avec le modèle du transformateur idéal, quelle serait la valeur de i_1 en l'absence de la capacité parasite si $i_2 = 0$?

La tension d'entrée est périodique, de la forme donnée figure 5.

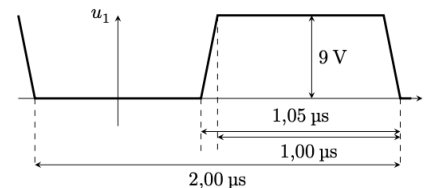


Figure 5 Forme du signal d'entrée u_1

Q 9. Calculer la valeur de l'intensité maximale i_1 dans les conditions de la question précédente. Quels sont les effets de ce courant ? Pourquoi ce défaut est-il particulièrement important pour les variations rapides de tension ?

I.B – Le matériau magnétique

Le rôle du matériau magnétique est de canaliser les lignes de champ magnétique. Cependant, il présente l'inconvénient d'être à l'origine de pertes énergétiques.

Q 10. Dans le modèle de Bohr, un électron possède une trajectoire circulaire autour d'un noyau atomique immobile. Le moment cinétique de l'électron est $\sigma_e = \|\vec{\sigma}_e\| = \hbar$, où \hbar est la constante de Planck réduite. Établir l'expression du moment magnétique $\mu_e = \|\vec{\mu}_e\|$ de cet atome, en fonction de \hbar , de la charge élémentaire e et de la masse de l'électron m_e . Effectuer l'application numérique.

Q 11. Un matériau ferromagnétique de masse molaire M , de masse volumique ρ , est formé d'atomes de moment magnétique $z\mu_e$ où $z \in \mathbb{N}$. Quelle est l'expression de l'aimantation de saturation M_{sat} , valeur de l'aimantation du matériau quand tous les moments magnétiques sont alignés et de même sens ? Calculer la valeur $M_{sat}(\text{Fe})$ pour le fer pour lequel $z = 4$.

Q 12. En reprenant la valeur précédente de M_{sat} , quel serait le moment magnétique à saturation m_a d'un cube de fer de côté $150 \mu\text{m}$? Quelle serait l'intensité I parcourant une boucle circulaire de diamètre $150 \mu\text{m}$ de moment magnétique m_a ? Commenter.

Pour mesurer la perméabilité magnétique, on utilise un impédancemètre équipé d'un dispositif de caractérisation de matériaux ferromagnétiques, sous la forme d'un bobinage de N_t spires enlaçant un tore formé de ce matériau. Le tore possède une longueur moyenne ℓ_t et une section S_t (figure 6).

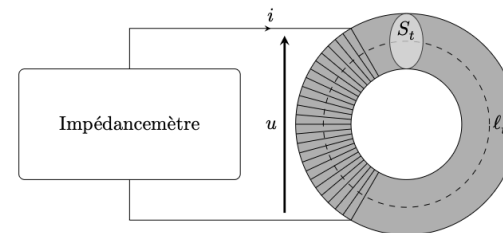


Figure 6 Tore de mesure d'impédance

Le milieu ferromagnétique est étudié dans son domaine linéaire et sa perméabilité magnétique relative est notée μ_r . On suppose que les lignes de champ adoptent la symétrie de révolution du tore. L'impédancemètre génère des signaux harmoniques de pulsation $\omega = 2\pi f_0$ avec $f_0 = 50$ Hz.

Q 13. On suppose les normes des champs d'excitation magnétique \vec{H} et magnétique \vec{B} uniformes dans le tore. À quelle condition sur la géométrie du tore cette hypothèse est-elle justifiée ?

Q 14. En travaillant en coordonnées cylindriques, d'axe l'axe de révolution du tore, justifier que $\vec{H} = H\vec{e}_\theta$ et $\vec{B} = B\vec{e}_\theta$.

Q 15. Exprimer les champs H et B en fonction de μ_0 , μ_r , N_t , ℓ_t et i . Préciser les orientations choisies.

Q 16. En déduire l'expression de l'impédance $\underline{Z} = \frac{u}{i}$. Y a-t-il dissipation d'énergie dans le matériau ?

Pour décrire plus complètement les propriétés du matériau ferromagnétique, on généralise la relation $\vec{B} = \mu_0\mu_r\vec{H}$ à une relation entre champs complexes $\vec{B} = \mu_0\mu_r\vec{H}$ où μ_r est la perméabilité relative complexe et l'on pose $\mu_r = \mu'_r - j\mu''_r$ où μ'_r et μ''_r sont des réels positifs.

Q 17. Exprimer la puissance moyenne P_c consommée dans le tore en fonction de la valeur efficace I_{eff} de l'intensité i et des caractéristiques du milieu.

Q 18. Dans le cadre d'un matériau de perméabilité relative complexe, tracer l'allure du cycle $B(H)$ du matériau ferromagnétique. Évaluer le champ magnétique rémanent B_r et l'excitation coercitive H_c . On prendra les valeurs des paramètres données en fin de problème ainsi que les valeurs $\mu'_r = 10^3$, $\mu''_r = 4$ et l'intensité maximale dans la bobine $I_{\text{max}} = 12$ A.

Q 19. Calculer la puissance moyenne P_{diss} dissipée dans le tore ferromagnétique. Quelle est la nature de cette perte ?

III Mesures de champs magnétiques avec un capteur Fluxgate

L'élément magnétique sensible d'un capteur *Fluxgate* est un noyau magnétique doux qui est saturé périodiquement par un signal fourni par une bobine d'excitation. Cette saturation périodique provoque une discontinuité du signal mesuré aux bornes d'une bobine de mesure, ce qui donne le nom de ces capteurs (*Fluxgate* signifie littéralement en français « vanne de flux »).

Dans toute cette partie, on se place dans l'approximation des régimes quasi stationnaires magnétique.

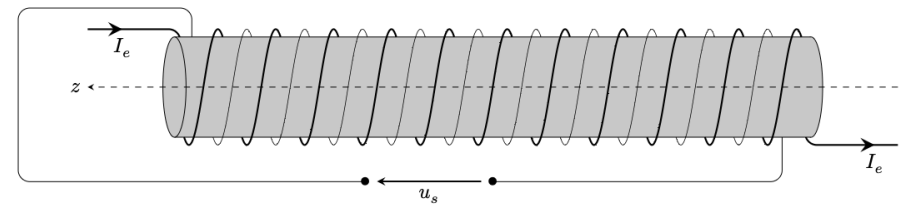


Figure 11 Fluxgate

La figure 11 représente les éléments essentiels du capteur. Un barreau cylindrique ferromagnétique doux, de perméabilité relative μ_r , de longueur ℓ , de diamètre D , est enlacé par deux enroulements. L'enroulement d'excitation (en trait gras), formé de N_f spires (densité linéique de spires n), est parcouru par une intensité d'excitation sinusoïdale $I_e(t) = I_{0e} \cos(\omega t)$. On mesure la tension $u_s(t)$ aux bornes de l'enroulement de mesure (en trait fin) qui compte N_f spires également. On néglige tout effet dû à un courant minime susceptible de circuler dans cet enroulement de mesure. On suppose que les spires sont circulaires, uniformément réparties sur le cylindre et que les champs sont uniformes dans le barreau.

III.A – Dans cette sous-partie, il n'y a pas de champ extérieur.

Q 31. Exprimer le champ d'excitation magnétique \vec{H} dans le barreau. On détaillera la méthode utilisée.

Q 32. Dans le cas où le milieu magnétique se comporte linéairement, exprimer le champ magnétique \vec{B} en fonction de I_e , n , μ_0 et μ_r . En déduire l'expression de la tension $u_s(t)$ en fonction de I_{0e} , ω , n , N_f , D et des constantes du milieu.

Le matériau ferromagnétique est caractérisé par la courbe d'aimantation $M(H)$ simplifiée donnée sur la figure 12. On pose $\frac{M_{\text{sat}}}{H_0} = \mu_r - 1$ et $\mu_r = 4000$.

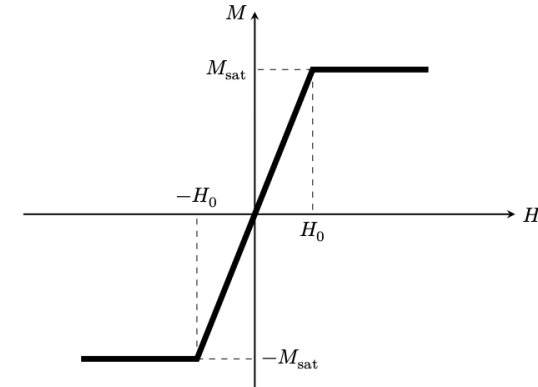


Figure 12 Courbe $M(H)$, où $M = \vec{M} \cdot \vec{u}_z$ et $H = \vec{H} \cdot \vec{u}_z$

Q 33. Sachant que I_{0e} est tel que la valeur maximale de l'excitation magnétique $H_{\text{max}} = 2H_0$, exprimer $u_s(t)$ dans les deux domaines, linéaire et saturé.

Q 34. Représenter sur la figure B du document réponse les graphes des fonctions $B(t) = \vec{B} \cdot \vec{u}_z$ et $u_s(t)$.

III.B – Le fluxgate est désormais placé dans un champ d'excitation extérieur $\vec{H}_{\text{ext}} = H_{\text{ext}}\vec{u}_z$ uniforme et constant créé par une source extérieure au dispositif. Le courant d'excitation $I_e(t)$ est inchangé.

Q 35. Quelle est l'expression de \vec{H} dans le barreau ? À l'aide des graphes de $B(t)$ et de $u_s(t)$ fournies figure C du document réponse, déterminer quelle inégalité est vérifiée par la valeur de H_{ext} :

- $H_{\text{ext}} > H_0$;
- $0 < H_{\text{ext}} < H_0$;
- $-H_0 < H_{\text{ext}} < 0$;
- $H_{\text{ext}} < -H_0$.

Q 36. Toujours à l'aide des graphes de la figure C, estimer numériquement la valeur du rapport $\frac{H_{\text{ext}}}{H_0}$.

La détection et la mesure de H_{ext} sont effectuées grâce à une analyse spectrale du signal $u_s(t)$. On donne dans le tableau 1 les amplitudes complexes $A_n(H_{\text{ext}})$ pour $n \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ du spectre des signaux $u_s(t)$ dans quatre cas : $H_{\text{ext}} = 0$, $H_{\text{ext}} = H_0/10$, $H_{\text{ext}} = -H_0/10$ et $H_{\text{ext}} = H_0/5$ pour le fondamental et les harmoniques $n = 2$ à 5, soit pour les fréquences $f_n = n f_1$. Les amplitudes sont déterminées grâce à la fonction `rfft` de Python qui calcule la transformée de Fourier discrète d'un échantillon de points.

| fréquences | f_1 | f_2 | f_3 | f_4 | f_5 |
|----------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| $H_{\text{ext}} = 0$ | $0,16 - 25,506j$ | $-0 + 0,006j$ | $-0,192 + 10,198j$ | $-0,001j$ | $-0,098 + 3,124j$ |
| $H_{\text{ext}} = H_0/10$ | $0,16 - 25,409j$ | $-0,035 + 2,787j$ | $-0,187 + 9,901j$ | $0,002 - 0,094j$ | $-0,084 + 2,664j$ |
| $H_{\text{ext}} = -H_0/10$ | $0,16 - 25,41j$ | $0,035 - 2,775j$ | $-0,187 + 9,903j$ | $-0,002 + 0,092j$ | $-0,084 + 2,667j$ |
| $H_{\text{ext}} = H_0/5$ | $0,158 - 25,113j$ | $-0,069 + 5,458j$ | $-0,171 + 9,052j$ | $0,002 - 0,084j$ | $-0,041 + 1,319j$ |

Tableau 1 Amplitudes A_n du spectre de Fourier discret selon les fréquences pour quatre valeurs de H_{ext}

Q 37. Quel signal issu de la décomposition de Fourier discrète permet de mesurer H_{ext} avec le maximum de sensibilité ? Peut-on connaître le signe de H_{ext} ? Le signal qui détecte la présence du champ extérieur H_{ext} lui est-il proportionnel ?

La longueur finie du barreau a une influence sur le champ d'excitation existant dans le barreau. Le champ d'excitation dans le matériau \vec{H}_r est donné en fonction du champ appliqué \vec{H}_{ext} par la relation

$$\vec{H}_r = \vec{H}_{\text{ext}} - 4\pi\alpha\vec{M}$$

où α est une fonction du rapport $\frac{\ell}{D}$.

Q 38. Exprimer $H_r = \vec{H}_r \cdot \vec{u}_z$ en fonction de H_{ext} , μ_r et α , dans le domaine de linéarité du matériau. En déduire l'expression de H_r en fonction du champ magnétique extérieur B_{ext} , μ_0 , μ_r et α .

On donne figure 13 le graphe de la fonction $\alpha(\eta)$ où $\eta = \frac{\ell}{D}$ et les caractéristiques d'un fluxgate dans le tableau 2.

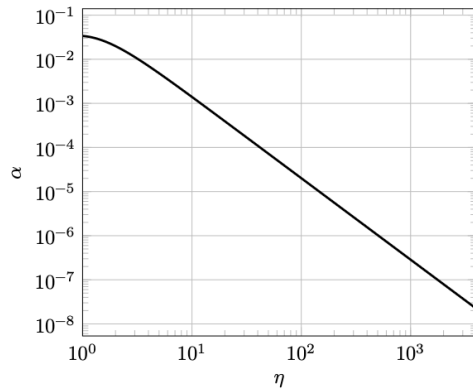


Figure 13 Coefficient α en fonction de η , rapport de la longueur sur le diamètre d'un barreau

| | |
|---|---------|
| Diamètre du barreau | 2,25 mm |
| Longueur du barreau | 13,0 mm |
| Nombre de spires | 646 |
| Bruit i_b de l'intensité d'excitation | 55 nA |

Tableau 2 Caractéristiques d'un fluxgate

Q 39. En considérant qu'un signal est détectable si $|H_r|$ dépasse de 10 % le champ d'excitation H_e provoqué par le bruit i_b de l'intensité d'excitation I_e , quelle est la plus petite valeur B_{min} du champ magnétique extérieur détectable par le fluxgate dont les caractéristiques sont données dans le tableau 2 ?

Données

Constantes générales

Constante de Planck réduite

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,055 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

Constante d'Avogadro

$$N_a = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

Charge élémentaire

$$e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Masse de l'électron

$$m_e = 9,0 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

Permittivité diélectrique du vide

$$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$$

Perméabilité magnétique du vide

$$\mu_0 = 1,26 \times 10^{-6} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$$

Propriétés physiques

Conductivité du cuivre

$$\gamma_{\text{Cu}} = 5,9 \times 10^7 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$$

Masse volumique du fer

$$\rho_{\text{Fe}} = 7,87 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

Masse molaire du fer

$$M_{\text{Fe}} = 55,8 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$$

Masse volumique du PZT

$$\rho_{\text{PZT}} = 7,8 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

Constante K du PZT

$$K_{\text{PZT}} = 2 \times 10^{11} \text{ SI}$$

Données pour la partie I

Nombre de spires du bobinage torique

$$N_t = 500$$

Section du tore

$$S_t = 0,6 \text{ cm}^2$$

Longueur moyenne du tore

$$\ell_t = 12,5 \text{ cm}$$

Doc réponse

Question 34

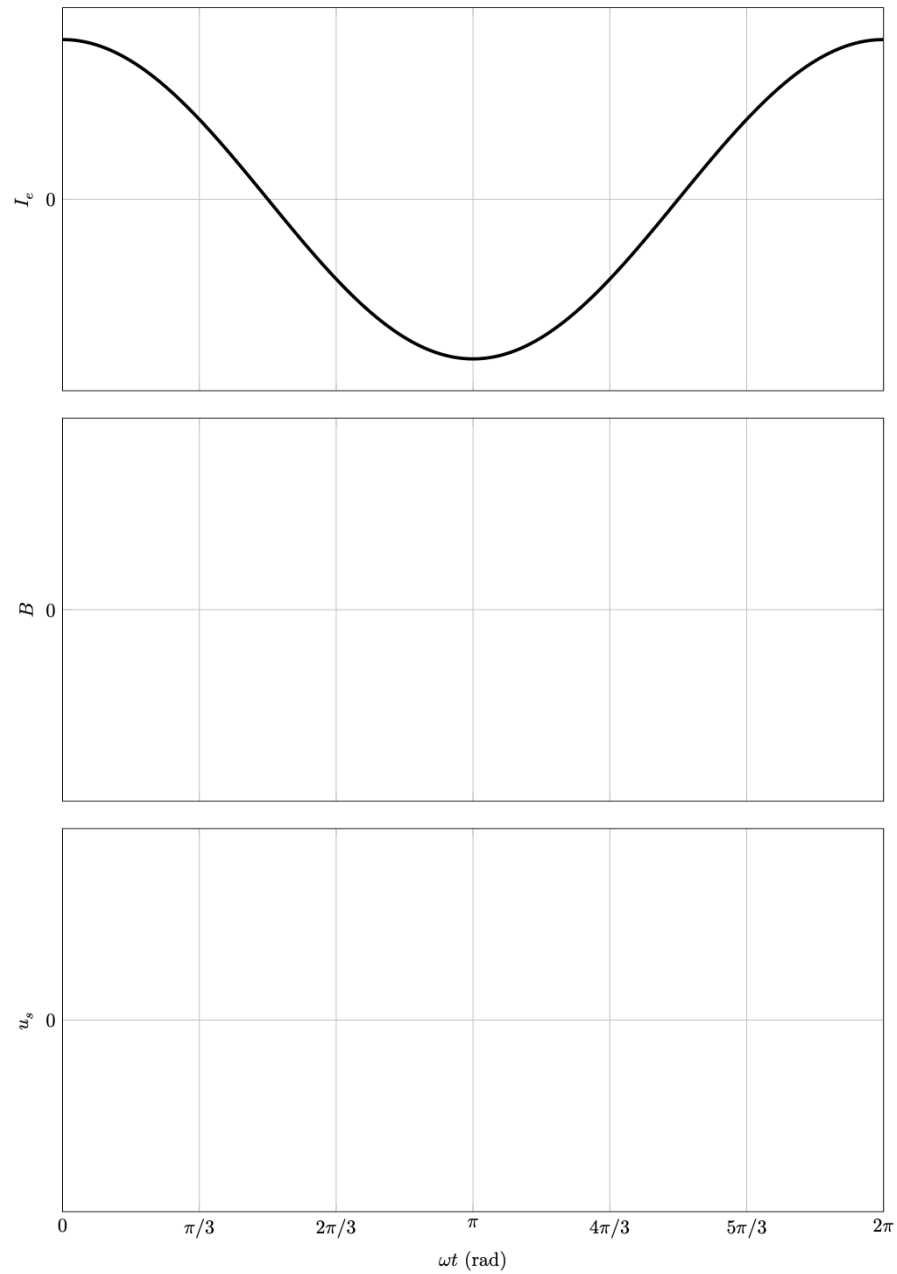


Figure B Graphes à compléter

Questions 35 et 36

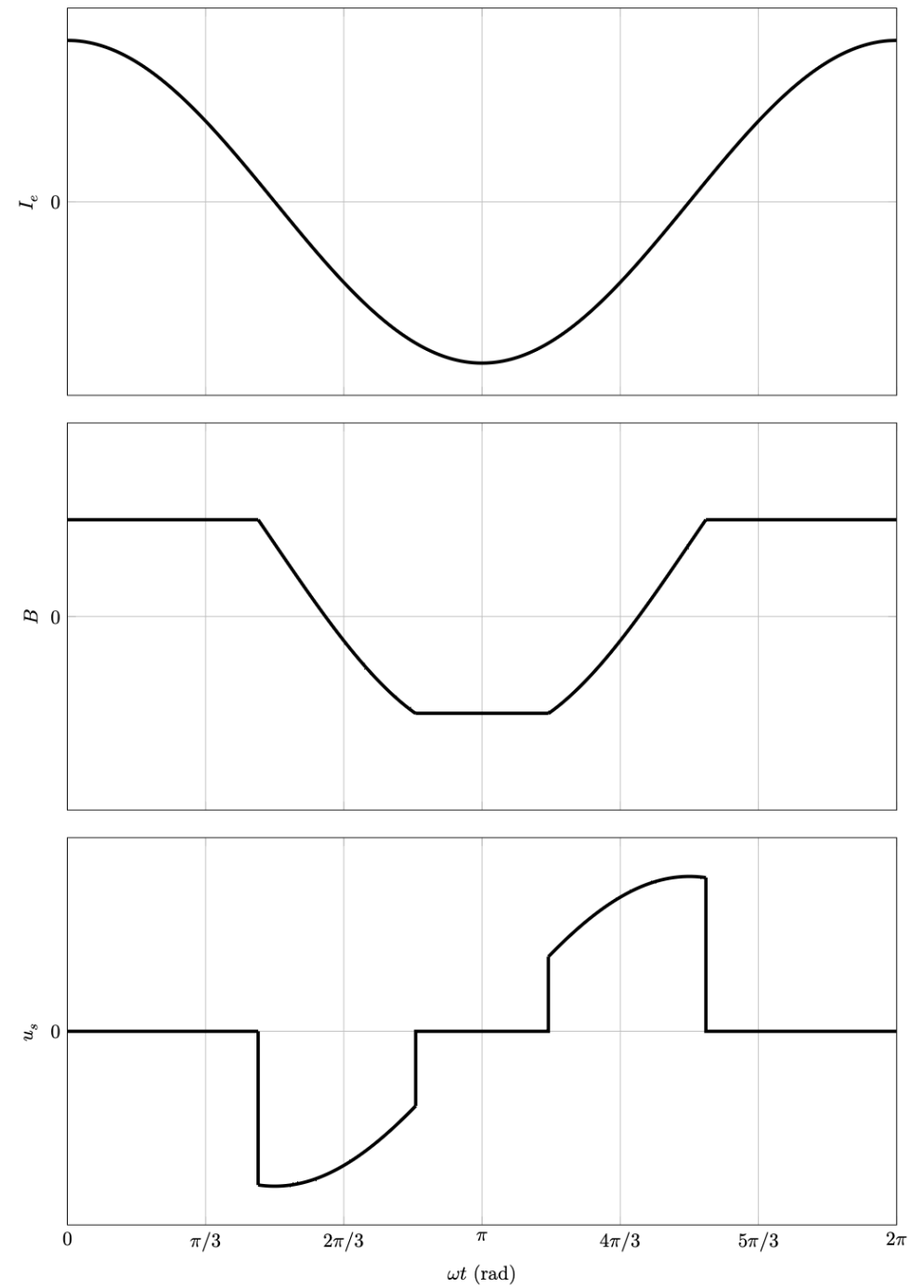


Figure C Graphes en présence d'un champ magnétique extérieur

Partie 2 - Télégraphie sans fil et réflexions ionosphériques

Ce sujet est consacré à l'étude de modes de communication à distance, relevant de plusieurs domaines de la physique ; les différentes parties sont totalement indépendantes et, à l'intérieur même de celles-ci, de nombreuses questions sont également indépendantes. Pour toutes les applications numériques, repérées par les initiales *A.N.*, on se contentera d'un ou deux chiffre(s) significatif(s). A l'exception de i tel que $i^2 = -1$, les nombres complexes sont repérés par une notation avec barre : $\bar{z} \in \mathbb{C}$. Une grandeur sinusoïdale de pulsation ω sera associée à la représentation $e^{i\omega t}$.

Données numériques et constantes physiques

- Célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- Masse d'un électron : $m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$
- Constante d'AVOGADRO : $\mathcal{N}_A = 6,0 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- Perméabilité du vide : $\mu_0 = 1,3 \times 10^{-6} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$
- Constante de BOLTZMANN : $k_B = 1,4 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$
- Permittivité du vide : $\varepsilon_0 = 8,8 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$
- Charge élémentaire : $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$
- Rayon de la Terre : $R_T = 6400 \text{ km}$

Le physicien italien MARCONI est considéré comme un des inventeurs de la transmission à grande distance de signaux électromagnétiques (la *T.S.F.*, télégraphie sans fil, ou radio). Il a reçu à ce titre le prix NOBEL de physique en 1909. On lui doit la réalisation de la première transmission radio transatlantique (1901) entre le nord-est du Canada et le sud-ouest de l'Angleterre, séparés par une distance à vol d'oiseau de 3500 km.

II.A Échos ionosphériques

Lors de la première série d'expériences, le récepteur se situait au niveau du sol et l'émetteur était porté par des cerf-volants dont l'altitude, limitée par la longueur du fil, ne dépassait pas $h = 180 \text{ m}$. On néglige tout phénomène de réflexion sur le sol, la portée d'un tel émetteur est donc limitée par la courbure de la Terre.

- – 16. Représenter sur un schéma les points d'émission E et de réception R du signal radio correspondant à cette transmission. Montrer qu'elle n'est possible que si la distance $d = ER$ vérifie $d < d_{\max}$ et exprimer d_{\max} en fonction de h et du rayon terrestre R_T .
A.N. : calculer d_{\max} et conclure.

La propagation sur une grande distance d'ondes radio est en fait possible grâce aux *échos ionosphériques*, qu'on assimilera à des réflexions de l'onde électromagnétique sur la surface de

séparation entre la basse atmosphère (assimilée au vide) et la haute atmosphère (l'ionosphère qui forme un plasma). Une onde électromagnétique incidente plane, progressive, de pulsation ω , polarisée rectilignement selon (Oy), est émise en direction de ce plasma, dans une direction faisant l'angle θ avec la verticale (Oz). L'ensemble est représenté sur la figure 5.

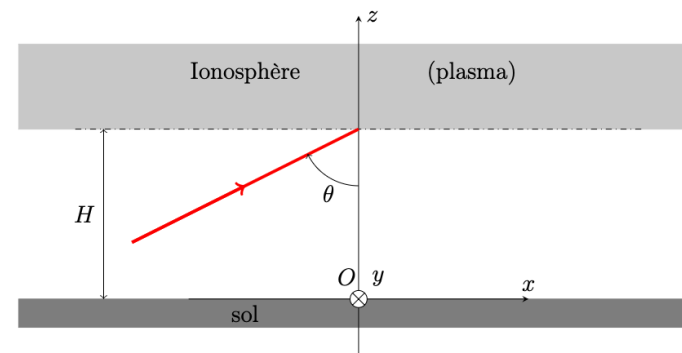


FIGURE 5 – Échos ionosphériques

- – 17. Exprimer la représentation complexe du champ électrique \vec{E} de l'onde incidente d'amplitude E_0 ; on prendra l'origine des phases au point origine O .

Le champ électrique dans le plasma étant recherché sous la forme $\vec{E}' = E'_0 \vec{e}_y \exp [i(\omega' t - \vec{k}' \cdot \vec{r})]$, on peut établir l'équation de dispersion (ED) $\omega'^2 = \omega_p^2 + c^2 \vec{k}'^2$ où $\omega_p^2 > 0$ est une constante qui ne dépend que des propriétés électromagnétiques locales de l'ionosphère. Par ailleurs, on admettra la continuité de toutes les composantes du champ électromagnétique à l'interface $z = H$ entre le vide et ce plasma. Une onde électromagnétique réfléchie existe également mais sa prise en compte n'est pas utile dans les calculs qui suivent.

- – 18. Expliciter ω' et les composantes $k'_x = \vec{e}_x \cdot \vec{k}'$ et $k'_y = \vec{e}_y \cdot \vec{k}'$ en fonction de ω , c et θ .
- – 19. En déduire k'_z en fonction de ω , ω_p , c et $\cos \theta$ et en déduire que l'onde transmise ne peut pas se propager dans le plasma si $\omega < \omega_\ell$ et exprimer la pulsation limite ω_ℓ en fonction de ω_p et θ .
- – 20. *A.N.* : pour l'ionosphère on prendra $f_p = \frac{\omega_p}{2\pi} \sim 1 \text{ MHz}$ et $H \sim 175 \text{ km}$. Calculer $\cos \theta$ puis la fréquence limite $f_\ell = \omega_\ell / 2\pi$ dans le cas d'une transmission sur une distance totale $d \sim 3500 \text{ km}$ (en négligeant l'influence de la courbure terrestre). Conclure.

II.B L'ionosphère

On considérera que l'ionosphère forme un plasma peu dense qui contient une densité particulière uniforme n d'électrons par unité de volume, et autant d'ions (de forte masse donc presque immobiles) de sorte que la charge totale reste partout nulle. On étudie ici encore la propagation d'une onde plane progressive et monochromatique, de champ électrique complexe \vec{E} dans le plasma.

- – 21. Dans le cadre non relativiste, en justifiant les simplifications, expliciter l'équation du mouvement des électrons et en déduire la densité volumique de courant dans ce milieu sous la forme $\vec{J} = \bar{\gamma}(\omega) \vec{E}$; préciser l'expression, le nom et la dimension de la grandeur complexe $\bar{\gamma}(\omega)$.

- – 22. Montrer que cette expression de \vec{J} permet d'obtenir une équation de dispersion (ED); préciser en particulier l'expression de la grandeur ω_p .
- – 23. Que peut-on dire de la puissance moyenne dissipée dans ce milieu lors du passage de l'onde? Que devient la puissance incidente électromagnétique dans le cas d'un écho ionosphérique?

Les ondes électromagnétiques actuellement utilisées pour la transmission de signaux radio ou télévision vérifient $\omega \gg \omega_p$, au contraire des ondes des expériences historiques étudiées précédemment.

- – 24. Citez l'ordre de grandeur des fréquences utilisées actuellement pour ce type de signaux. Quels sont les avantages et les inconvénients d'une transmission à haute fréquence?

FIN DE L'ÉPREUVE