

Devoir surveillé n°6

Samedi 23 mars 2024

- Vous devez vérifier que le sujet comprend 9 pages numérotées.
- Vous êtes invités à porter une attention toute particulière à la rédaction : les copies illisibles ou mal présentées seront pénalisées.
- Toute réponse devra être justifiée et ce, même si l'énoncé ne le précise pas (sauf mention particulière).
- Vous devez établir une relation littérale avant d'effectuer toute application numérique (sauf mention particulière).
- Toute relation littérale présentant une erreur flagrante d'homogénéité ne donnera pas lieu à l'attribution de points.
- Toute application numérique ne comportant pas d'unité ne donnera pas lieu à l'attribution de points.
- Le téléphone portable est strictement interdit. Il doit être rangé éteint dans le sac.
- La calculatrice est autorisée.

Première partie

Cuivre et supraconductivité

I Création d'un champ magnétique intense à l'aide d'un solénoïde

L'imagerie médicale a besoin de champ magnétique intense, permanent et uniforme. On se propose ici de dimensionner une bobine dans laquelle règne un champ magnétique de 2 T.

Résistance électrique d'un conducteur ohmique :

On considère un conducteur ohmique (figure 1), de conductivité électrique γ , de section S , de longueur h , parcouru par un courant électrique continu uniformément réparti de densité $\vec{j}_e = j_e \vec{e}_z$.

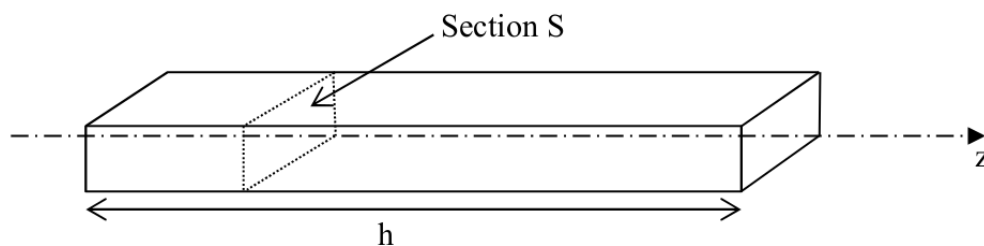


Figure 1 : conducteur ohmique

1. Exprimer, en fonction de γ et de $\vec{j}_e$, le champ électrique qui règne à l'intérieur de ce conducteur.
2. Donner, en fonction de γ , j_e et des caractéristiques géométriques de ce conducteur, les expressions du courant électrique I traversant ce conducteur et de la différence de potentiel U aux bornes de ce conducteur.
3. En déduire, en fonction de γ et des caractéristiques géométriques de ce conducteur, la résistance électrique R_Ω de ce conducteur.

Caractéristiques de la bobine à température ambiante :

On suppose ici que la bobine est maintenue à température ambiante $T = 300$ K.

La bobine (figure 2, ci-après) est assimilée à un solénoïde d'axe Oz , de longueur L , de rayon R_{moy} avec $R_{moy} \ll L$. Les effets de bords sont négligés, le solénoïde est donc considéré comme infini. Il est constitué de spires jointives d'un fil de cuivre de diamètre d et de conductivité électrique γ_{Cu} . Chaque spire est parcourue par un courant I . Il comporte p couches de bobinage superposées.

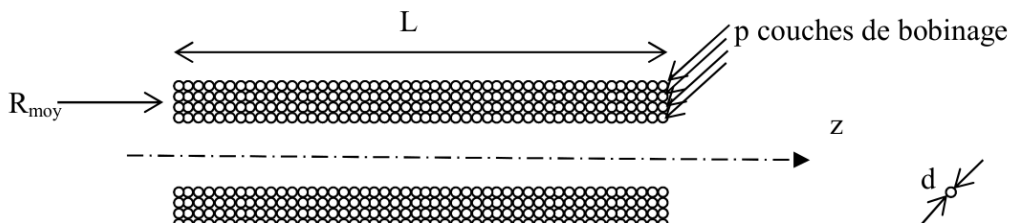


Figure 2 : bobine

4. (a) Sur une seule couche de bobinage, combien y a-t-il de spires jointives par unité de longueur de solénoïde ?
(b) Combien de spires par unité de longueur comporte ce solénoïde ?
5. (a) Donner, en fonction de d , p , I et μ_0 , l'expression du champ magnétique créé à l'intérieur du solénoïde.
(b) Application numérique : $B = 2,0$ T, $d = 3,0$ mm, $I = 35$ A. Déterminer p .

6. (a) En assimilant le rayon de chaque spire au rayon moyen R_{moy} , exprimer la longueur, L_{fil} , de fil nécessaire à la réalisation de cette bobine en fonction de R_{moy} , d , p et L .
- (b) Application numérique : $L = 1,8$ m et $R_{moy} = 50$ cm. Évaluer L_{fil} .
7. (a) Exprimer en fonction de γ_{Cu} , de L_{fil} et de d la résistance électrique R_{elec} de la bobine.
- (b) Application numérique : évaluer la puissance P_J , dissipée par effet Joule dans la bobine. Commenter.

Caractéristiques de la bobine refroidie à 77 K :

On suppose ici que la bobine est maintenue à la température de 77 K.

Pour diminuer la puissance dissipée, on peut envisager de refroidir le conducteur en cuivre par l'intermédiaire d'un bain d'azote liquide à 77 K. On peut alors imposer dans un conducteur de cuivre, de même diamètre $d = 3$ mm, un courant plus important $I' = 80$ A. On réduit ainsi le nombre de spire de la bobine et donc sa résistance électrique et son rayon moyen.

8. (a) Quel est alors le nombre de couches de bobinage, p' , à superposer pour obtenir un champ magnétique de 2 T ?
- (b) En assimilant le rayon de chaque spire au nouveau rayon moyen $R'_{moy} = 40$ cm, évaluer la nouvelle puissance dissipée par effet Joule, P'_J , dans la bobine.

Compte-tenu du coût de la réfrigération à 77K, il faut tenir compte de l'efficacité de la machine thermique assurant le maintien de cette basse température.

9. On considère une machine frigorifique cyclique et réversible qui assure, par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur, les transferts thermiques entre deux sources de températures constantes T_f et T_c .
 - (a) En effectuant un bilan énergétique et un bilan entropique sur un système bien défini, exprimer l'efficacité e_{rev} , de cette machine en fonction de T_f et T_c .
 - (b) Application numérique : $T_f = 77$ K et $T_c = 300$ K. Évaluer e_{rev} .
10. Évaluer la puissance P' , minimale, nécessaire pour absorber la puissance P'_J , dissipée dans la bobine en cuivre refroidi. Commenter.

II Puissance dissipée dans le supraconducteur lors des régimes transitoires :

Si les supraconducteurs sont dépourvus de pertes en régime continu, il n'en est pas de même en régime variable. Pour les bobines alimentées en régime continu, ces pertes ont lieu lors des deux régimes transitoires qui correspondent en début d'utilisation de la bobine à l'installation du courant dans le conducteur, puis en fin d'utilisation de la bobine, lors de la redescende à zéro de ce courant.

On se propose ici déterminer l'ordre de grandeur de la puissance dissipée par unité de longueur du conducteur, lors de la première montée de courant, dans une situation dite de champ propre, c'est-à-dire lorsqu'une portion de conducteur est soumise aux variations temporelles du champ magnétique qu'il crée sur lui-même.

On assimile le supraconducteur (figure 3) à un fil rectiligne infini suivant l'axe Oz , de rayon R . On adopte les coordonnées cylindriques.

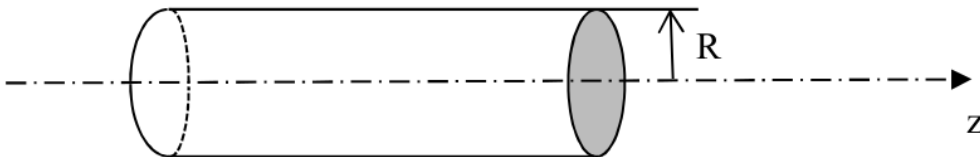


Figure 3 : supraconducteur

Compte-tenu des invariances du problème, la densité volumique de courant, notée $\vec{j}_e$, dans le supraconducteur ne dépend que de r et est portée par le vecteur $\vec{e}_z$. On a $\vec{j}_e = j_e(r)\vec{e}_z$. Pour un courant de transport I donné,

la densité de courant n'est pas uniforme dans le supraconducteur, son amplitude vaut $\pm j_0$ ou 0, où j_0 est une constante. Ce courant se distribue de façon à protéger le centre du supraconducteur de toute variation de champ magnétique.

11. Déterminer en fonction de j_0 et de R la valeur maximale I_c , dite valeur critique du courant de transport de ce conducteur.

Étude de la première montée de courant dans le supraconducteur :

On ne s'intéresse ici qu'à la première montée du courant $I(t)$ dans le supraconducteur.

On suppose que cette première montée s'effectue, pendant une durée T , suivant une consigne en rampe de sorte que : $I(t) = \frac{I_0}{T}t$, où I_0 est la valeur finale du courant dans le supraconducteur.

Ce courant se distribue de façon à protéger le centre du supraconducteur de toute variation de champ magnétique, de sorte qu'il se répartit, à un instant t de cette première étape, à la périphérie du supraconducteur dans la zone : $r_1(t) < r < R$ (figure 4).

On a : $j_e(r, t) = 0$ pour $r < r_1(t)$ et $j_e(r, t) = j_0$ pour $r > r_1(t)$.

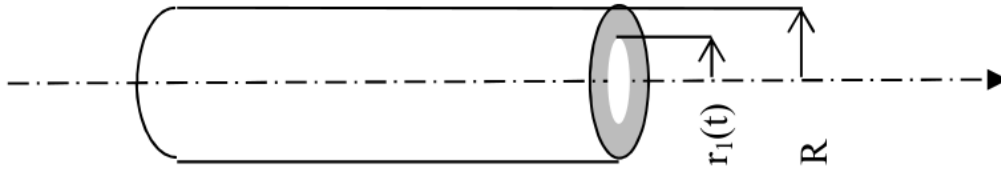


Figure 4 : répartition du courant dans le supraconducteur

12. On définit par $u = \frac{I_0}{I_c}$ le taux d'utilisation du supraconducteur. Exprimer u en fonction de j_0 , R et I_0 .
13. (a) Déterminer la relation qui existe entre $I(t)$, j_0 , $r_1(t)$ et R .
 (b) En déduire l'expression de $r_1(t)$ en fonction de R , u , T et t .
 (c) Exprimer $r_1(T)$ en fonction de u et R .
14. (a) À l'aide des propriétés de symétries et d'invariance, préciser de quelle(s) variable(s) de l'espace dépend le champ magnétique dans le supraconducteur et par quel(s) vecteur(s) de base il est porté.
 (b) Par application du théorème d'Ampère, dans l'approximation des régimes quasi-stationnaires, sur un contour que l'on précisera, déterminer à l'instant t le champ magnétique $\vec{B}(r, t)$ dans la zone : $r \in [0, r_1(t)]$.
 (c) De même, déterminer en fonction de μ_0 , j_0 et $r_1(t)$, le champ magnétique $\vec{B}(r, t)$ dans la zone : $r \in [r_1(t), R]$.
 (d) Tracer l'allure de la fonction $\|\vec{B}(r, t)\|$ à un instant t , pour $r \in [0, R]$.
15. (a) Rappeler l'équation de Maxwell-Faraday. Donner le nom du phénomène physique régi par cette loi. Historiquement, à quel siècle a-t-elle été découverte ?

Pour les deux questions suivantes, on admettra que toute contribution du champ électrique, qui ne dépend que de l'espace ou que du temps, sera assimilée à la fonction nulle.

- (b) Que vaut le champ électrique $\vec{E} = E(r, t)\vec{e}_z$ pour $r < r_1(t)$?
 (c) En remarquant que le champ électrique est continu en $r_1(t)$ et qu'il peut s'écrire sous la forme $\vec{E} = E(r, t)\vec{e}_z$, montrer que $E(r, t) = \frac{\mu_0 I_0}{2\pi T} \ln\left(\frac{r}{r_1(t)}\right)$ pour $r \in [r_1(t), R]$.

16. Quelle est l'unité de $\vec{E}$? Proposer, en quelques lignes, un protocole permettant de visualiser expérimentalement le champ électrique $E(R, t)$ sur un écran d'oscilloscope ou d'ordinateur.
17. Donner l'expression de la densité volumique locale et instantanée de puissance dissipée dans le supraconducteur, notée $p_v(r, t)$:

- (a) dans la zone $r \in [0, r_1(t)]$
 (b) dans la zone $r \in [r_1(t), R]$.
18. Par intégration sur l'espace, en déduire, en fonction de μ_0 , I_0 , T , L_{supra} , u et t , l'expression de la puissance $P_{elec}(t)$ dissipée dans une longueur L_{supra} de supraconducteur à l'instant t lors de la première montée de courant.
19. (a) Par intégration sur le temps, déterminer l'énergie Q dissipée lors de la première montée du courant dans un supraconducteur de longueur L_{supra} en fonction de μ_0 , I_0 , L_{supra} et u .
 (b) Est-il utile d'augmenter la durée T d'établissement de ce courant pour réduire l'énergie dissipée dans le supraconducteur ?
20. La machine thermique qui assure le refroidissement du supraconducteur à 4,2 K a une efficacité de $1,5 \cdot 10^{-3}$. On donne $I_0 = 445$ A, $L_{supra} = 14000$ m et $u = 0,7$. Évaluer l'énergie consommée Q_{amb} par le réfrigérateur devant absorber l'énergie Q dissipée lors de la première montée de courant. Commenter.

Données :

Constantes physiques : $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H.m⁻¹.

Conductivité électrique du cuivre : $\gamma_{Cu}(77K) = 3,3 \cdot 10^8$ S.m⁻¹, $\gamma_{Cu}(300K) = 6 \cdot 10^7$ S.m⁻¹.

Formulaire mathématique

Fonction : $f(x)$	Primitive : $F(x)$
$x \ln \frac{x}{x_0}$	$\frac{x^2}{2} \ln \left(\frac{x}{x_0} \right) - \frac{x^2}{4} + cste$
$\ln(1 - \alpha x)$	$\frac{(1 - \alpha x) - (1 - \alpha x) \ln(1 - \alpha x)}{\alpha} + cste$

Opérateurs vectoriels en coordonnées cylindriques :

$$\vec{\text{grad}}(U) = \frac{\partial U}{\partial r} \vec{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta} \vec{e}_\theta + \frac{\partial U}{\partial z} \vec{e}_z$$

$$\text{div}(\vec{a}) = \frac{1}{r} \frac{\partial (r a_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial (a_\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial (a_z)}{\partial z}$$

$$\vec{\text{rot}}(\vec{a}) = \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (a_z)}{\partial \theta} - \frac{\partial (a_\theta)}{\partial z} \right) \vec{e}_r + \left(\frac{\partial (a_r)}{\partial z} - \frac{\partial (a_z)}{\partial r} \right) \vec{e}_\theta + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r a_\theta)}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial (a_r)}{\partial \theta} \right) \vec{e}_z$$

Deuxième partie

GSM 4G

Données

- célérité des ondes électromagnétiques dans le vide ou l'air : $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$,
- permittivité diélectrique du vide ou de l'air : $\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi 10^9} \text{ F.m}^{-1}$,
- perméabilité magnétique du vide ou de l'air : $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$.

Les trois parties de ce problème sont indépendantes. Toutefois, la compréhension et la réalisation de la première partie permettent d'aborder plus rapidement les deux dernières parties.

On s'intéresse à l'un des deux standards de télécommunication, candidat pour la 4^e génération de la téléphonie mobile, « Long Term Evolution – Advanced ». Il est constitué, en France, de deux bandes de fréquences dites 800 MHz et 2 600 MHz. Par le déploiement de technologies particulières, des débits supérieurs à 30 Mbits / seconde pour des mobiles en mouvement sont visés.

L'espace est défini par un repère orthonormé direct $\mathcal{R} = (O, \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$ et on considère un point M de l'espace repéré par ses coordonnées cartésiennes (x, y, z) . On pose $\vec{OM} = \vec{r}$.

I PROPAGATION DANS L'AIR

A. Propagation

1. Donner, en les nommant, les équations de Maxwell sous leurs formes locales dans l'air en l'absence de sources. On traitera des champs $\vec{E}(M, t)$ et $\vec{B}(M, t)$ comme n'étant pas nécessairement ceux d'une Onde Plane Progressive Sinusoïdale (OPPS ou OPPH).
2. Établir l'équation de propagation en champ électrique et en déduire l'expression de la vitesse de propagation de l'onde, en fonction des données de l'énoncé.
3. On considère à présent que le champ $\vec{E}(M, t)$ est celui d'une OPPS polarisée rectilignement parallèlement à $\vec{e}_x$ se propageant suivant les z croissants et dont la formulation générale est donnée par l'expression complexe $\underline{\vec{E}}(M, t) = \underline{\vec{E}}_m e^{j(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)}$. $\vec{k}$ est le vecteur d'onde de norme constante k , ω est la pulsation et $\underline{\vec{E}}_m$ est une constante complexe vectorielle.
 - (a) Préciser et justifier l'expression de $\vec{k}$ et la direction de $\underline{\vec{E}}_m$.
 - (b) Donner l'expression de $\underline{\vec{E}}(M, t)$ en fonction des coordonnées de M et en projection dans la base cartésienne du repère $\mathcal{R}$.
 - (c) Expliciter les deux termes de l'équation de propagation en fonction de k , ω et $\underline{\vec{E}}(M, t)$.
 - (d) En déduire la relation de dispersion du milieu.
4. Dans l'hypothèse de la question précédente, expliciter le champ $\underline{\vec{B}}(M, t)$ dans la base cartésienne $\mathcal{R}$ en fonction de $\underline{\vec{E}}_m$, c , k et ω .
5. En notant $\underline{\vec{E}}_m = E_m e^{j\varphi}$, φ étant une constante, expliciter les champs réels $\vec{E}(M, t)$ et $\vec{B}(M, t)$.

B. Puissance et rayonnement

1. Donner la définition du vecteur de Poynting $\vec{R}(M, t)$ en fonction des champs et son interprétation physique. Quelle est sa dimension physique ?

- Montrer que la valeur moyenne temporelle de la norme de $\vec{R}(M, t)$ peut s'écrire $\langle \|\vec{R}\| \rangle = \alpha c \epsilon_0 E_m^2$ pour les champs de l'OPPS définie dans la partie A/. On donnera la valeur de la constante α .
- Dans le cas d'une antenne réelle, l'hypothèse de l'OPPS n'est valable que localement. On sait alors que la valeur de $\langle \vec{R} \rangle$ dépend de la distance d à l'antenne, de la puissance P_a d'alimentation et de son gain G , lequel dépend de la direction d'observation. On peut ainsi écrire : $4\pi d^2 \langle \|\vec{R}(d)\| \rangle = P_a G$. Exprimer l'amplitude E_m du champ en fonction de c , ϵ_0 , P_a , G et d .

C. Exposition

Il est parfois nécessaire de privilégier un sens de fonctionnement de l'antenne. L'énergie rayonnée par une antenne est alors répartie de manière inégale dans l'espace et il existe des directions privilégiées, appelées « lobes de rayonnement ». Ces différentes directions peuvent être visualisées à l'aide du diagramme de rayonnement réalisé en trois dimensions. Le lobe le plus important est appelé « lobe principal ». Il est dirigé vers l'avant de l'antenne. Les lobes secondaires, moins importants, sont dirigés vers l'arrière ou sur les côtés de l'antenne.

La norme sanitaire pour ce type de rayonnement est actuellement en France $E_{max} = 61$ V/m. Elle correspond à un seuil défini sur la base des effets thermiques (échauffement) liés au champ électromagnétique. À titre de comparaison, la norme en Italie, Russie, Pologne et Chine est de $E_1 = 6$ V/m.

- Dans le cadre d'une implantation urbaine, il se peut que certains locaux interceptent le lobe principal. En considérant dans ce cas une puissance $P_a = 50$ W, un gain $G = 63$ et une distance $d = 100$ m, calculer l'intensité du champ E_{m1} . Commenter le résultat.
- Une autre possibilité d'être exposé au rayonnement d'une antenne relais concerne le lobe secondaire orienté vers le sol. Dans ce cas le gain est plus faible, mais la distance également. Calculer, pour la même puissance $P_a = 50$ W, le champ E_{m2} dans le cas où $G = 2$ et $d = 10$ m. Commenter le résultat.

II REFLEXION D'UNE OPPS PAR UN MUR DE BETON

De façon préliminaire, on considère une interface air - métal parfait dans le plan $z = 0$. L'air occupe l'espace des $z < 0$ et le métal celui des $z > 0$. L'onde incidente est une OPPS se propageant dans l'air, polarisée selon $\vec{e}_x$ et qui arrive normalement à l'interface. On note $\vec{E}_{mi} = E_m e^{j\varphi}$ et $\vec{E}_{mr}$ respectivement, les amplitudes complexes des champs incident et réfléchi. On note $\vec{k}_i$ et $\vec{k}_r$, les vecteurs d'ondes associés respectifs. On admet que l'onde réfléchie a la même polarisation que l'onde incidente.

A. Expressions des champs

- Exprimer les champs électrique $\vec{E}_i(M, t)$ et magnétique $\vec{B}_i(M, t)$ incidents en fonction de $\vec{E}_{mi}$, z , ω , t et $k = \|\vec{k}_i\| = \frac{\omega}{c}$.
- Exprimer les champs électrique $\vec{E}_r(M, t)$ et magnétique $\vec{B}_r(M, t)$ réfléchis en fonction de $\vec{E}_{mr}$, z , ω , t et $k = \|\vec{k}_i\| = \frac{\omega}{c}$.
- On admet que le champ électrique est continu à l'interface entre les deux matériaux et qu'il est nul dans le métal. En déduire la valeur du coefficient de réflexion en champ électrique : $\underline{r} = \frac{\vec{E}_{mr}}{\vec{E}_{mi}}$.

B. Champ total et ondes stationnaires

- Déterminer l'expression du champ total réel $\vec{E}_{total}(M, t)$.

2. Quel type d'onde est-ce ?
3. Représenter l'amplitude de $\vec{E}_{total}(M, t)$ en fonction de la position de M pour trois valeurs différentes de t .
4. Localiser et nommer les points remarquables de la représentation.
5. Donner la distance d_m entre un minimum et un maximum adjacents en fonction de la longueur d'onde λ de l'onde.

C. Cas du béton

On remplace à présent le métal parfait par du béton. On reprend l'ensemble du problème et les notations considérées dans les parties II.A/ et II.B/. On donne le nouveau coefficient de réflexion en champ $\underline{r} = r.e^{j\alpha}$ dans la gamme de fréquence de la bande 2 600 MHz avec $r = 0,386$ et $\alpha = 169^\circ$.

1. Mettre le champ total $\vec{E}_{total}(M, t)$ dans l'air sous la forme $\vec{E}_{total}(M, t) = [\underline{f}(z)] \vec{E}_i(M, t)$ et exprimer $\underline{f}(z)$ en fonction de r , α , z et k .
2. En constatant que $\|\vec{E}_{total}\| = |\underline{f}| \|\vec{E}_i\|$, exprimer les valeurs maximale $\|\vec{E}_{total}\|_{max}$ et minimale $\|\vec{E}_{total}\|_{min}$ de l'amplitude de $\vec{E}_{total}$ en fonction de r et E_m .
3. Pour le coefficient de réflexion donné ci-dessus pour le béton, calculer le rapport $\rho = \frac{\|\vec{E}_{total}\|_{max}}{\|\vec{E}_{total}\|_{min}}$, également appelé Rapport d'Onde Stationnaire ou ROS.
4. Donner la distance d_m entre un minimum et un maximum adjacents.
5. Pour un véhicule se déplaçant à $v = 60$ km/h, calculer le temps qui s'écoule entre un maximum et un minimum de champ. En quoi cela peut-il affecter la communication ?

III TECHNOLOGIE MIMO

L'une des clés pour l'élévation du débit de la 4G réside dans la capacité des antennes à différencier les signaux en fonction de leur direction d'arrivée (ou d'envoi). Pour illustrer cette fonction, considérons le cas de deux OPPS de même amplitude E_m , mais de phases à l'origine différentes.

En associant cette origine à la première onde, on a $\underline{E}_{m1} = E_m \neq E_m e^{j\varphi} = \underline{E}_{m2}$. Elles utilisent le même canal et donc la même pulsation ω . Elles ont la même polarisation rectiligne $\vec{e}_x$. Les directions d'arrivée en un point quelconque de l'espace sont $\vec{k}_1 = k(\sin \theta \vec{e}_y + \cos \theta \vec{e}_z)$ et $\vec{k}_2 = k(-\sin \theta \vec{e}_y + \cos \theta \vec{e}_z)$.

A. Champs électriques

1. En vous appuyant sur un schéma clair, représenter dans le repère cartésien les vecteurs $\vec{k}_1$ et $\vec{k}_2$, ainsi que les champs associés $\vec{E}_1$, $\vec{B}_1$ et $\vec{E}_2$, $\vec{B}_2$ en respectant la vraisemblance liée à la structure des OPPS.
2. Exprimer les composantes $\underline{E}_{1x}(M, t)$ et $\underline{E}_{2x}(M, t)$ respectivement des champs $\vec{E}_1(M, t)$ et $\vec{E}_2(M, t)$ selon la direction $\vec{e}_x$ en fonction de E_m , φ , ω , t , k , z , y et θ .

B. Détection MIMO

1. On dispose deux antennes de réception en mesure de détecter le champ électrique aux points $P(x_P = 0, y_P = -\frac{\lambda}{4}, z_P = 0)$ et $Q(x_Q = 0, y_Q = +\frac{\lambda}{4}, z_Q = 0)$. Exprimer les composantes $\underline{E}_{1x}(P, t)$, $\underline{E}_{1x}(Q, t)$, $\underline{E}_{2x}(P, t)$ et $\underline{E}_{2x}(Q, t)$ des champs en fonction de E_m , φ , ω , t et θ , puis exprimer les champs totaux $\vec{E}_{total}(P, t)$ et $\vec{E}_{total}(Q, t)$ en fonction de ces mêmes paramètres.

2. On introduit le paramètre réel et variable Φ . Grâce à un calculateur numérique, on peut estimer la quantité $\vec{E}(t, \Phi) = \vec{E}_{total}(P, t) + e^{j\Phi} \vec{E}_{total}(Q, t)$ pour diverses valeurs de Φ .
Montrer que les contributions issues des champs $\vec{E}_1$ et $\vec{E}_2$ font apparaître respectivement les facteurs $f_1(\Phi) = 1 + e^{j(\Phi + \pi \sin \theta)}$ et $f_2(\Phi) = 1 + e^{j(\Phi - \pi \sin \theta)}$.
3. Proposer deux valeurs particulières Φ_1 et Φ_2 respectivement telles qu'après calcul de $\vec{E}$:
- on annule la contribution de $\vec{E}_2$ dans $\vec{E}(t, \Phi)$,
 - on annule la contribution de $\vec{E}_1$ dans $\vec{E}(t, \Phi)$.
4. On peut donc conclure que, si les directions d'arrivée sont connues et que l'on dispose d'une capacité de calcul suffisante, on peut séparer les deux signaux. Commenter l'intérêt de ce traitement dans le contexte du sujet.

Fin