CCP Physique 2 MP 2009 — Corrigé

Ce corrigé est proposé par Jérôme Lambert (Enseignant-chercheur à l'université) ; il a été relu par Olivier Frantz (Professeur agrégé) et Stéphane Ravier (Professeur en CPGE).

Ce sujet est divisé en deux problèmes de longueurs égales, indépendants, portant sur l'électromagnétisme et sur l'optique ondulatoire.

- Le premier aborde le problème de l'écrantage d'un champ magnétique variable dans un conducteur dans le cadre de l'approximation des régimes quasi permanents. Dans une première partie, il s'agit de décrire l'influence mutuelle de deux bobines coaxiales. Dans une deuxième partie, on remplace l'une des deux bobines par un cylindre conducteur creux considéré comme une nappe conductrice. Enfin, la dernière partie est consacrée à l'étude de la profondeur de pénétration du champ électromagnétique dans un conducteur.
- Le second problème traite de deux aspects de l'optique ondulatoire. Dans la première partie, il s'agit d'étudier différents dispositifs permettant de générer une onde de polarisation rectiligne. Dans la seconde, on propose de retrouver quelques résultats portant sur la diffraction à l'infini.

Ce problème est tout à fait abordable mais très long. Comme les années précédentes, il aborde l'optique et l'électromagnétisme ; il nécessite une excellente connaissance du cours dans ces deux disciplines. En outre, cette épreuve a la particularité d'évaluer les connaissances acquises en TP-cours, ce qui se traduit par des questions sur les dispositifs expérimentaux. On peut cependant regretter qu'un certain nombre de questions soient en dehors de la lettre (et parfois de l'esprit) du programme.

La rédaction de certaines questions pose des problèmes : quels sont les résultats et hypothèses supposés connus et admis ? Quels sont ceux qu'il faut impérativement retrouver ? L'énoncé n'aide pas sur ce point. Par ailleurs, une bonne maîtrise du cours permet souvent de répondre très rapidement à une question en apparence calculatoire. Il faut avoir vu au moins une fois ce type d'énoncé avant de passer les écrits.

Indications

Partie A

A.I.1.a Malgré la faiblesse du rapport L/r_2, considérer les solénoïdes comme infinis.

A.I.2.a S'appuyer sur l'ARQS pour pouvoir retrouver le champ créé par $i_0(t)$, puis appliquer la loi de Maxwell-Faraday à Σ_2 sans oublier qu'une partie du flux du champ magnétique à travers Σ_2 est due au champ créé par Σ_1.

A.I.2.b Utiliser le principe de superposition. À haute fréquence les phénomènes inductifs dominent-ils les phénomènes résistifs ?

A.II.1 Exploiter les symétries du dispositif.

A.II.3.a Utiliser le théorème d'Ampère.

A.II.3.c Considérer que le champ $\overrightarrow{\mathrm{B}}$ est rigoureusement nul en dehors du cylindre.

A.III.3 Si l'épaisseur du cylindre est très petite devant δ, que peut-on dire des champs dans le cylindre ?

Partie B

B.1.3.1 Ne pas confondre la loi de Malus avec le théorème de Malus !

B.1.3.2.3 Remarquer les angles complémentaires.

B.1.4.1.1 Par quoi les ondes réfléchies et transmises sont-elles « émises » ? Le mécanisme d'émission est-il isotrope ?

B.1.4.1.2 Y a-t-il des directions interdites par le mécanisme d'émission des ondes réfléchies et transmises ?

B.1.5.2 Y a-t-il transfert d'énergie quand les électrons sont dans l'impossibilité de se déplacer dans la direction imposée par le champ électrique de l'onde ?

B.1.6.1.4 Loin de la résonance, l'amplitude de la réponse en fréquence d'un oscillateur harmonique amorti ne dépend plus que de ω_0.

B.2.2.3 L'exponentielle complexe et la fonction $1/r$ varient-elles avec la même distance caractéristique ?

Les conseils du jury

Le rapport du jury souligne quelques points essentiels qu'il est bon de rappeler.

- « Les candidats doivent se convaincre qu'il faut faire les applications numériques demandées et que celles-ci doivent comporter une unité, sinon les réponses sont nulles. De même il faut maîtriser les relations d'homogénéité. En particulier l'argument d'une exponentielle est sans dimension. »
- « Dès que la réponse demande une petite rédaction, elle rappelle les remarques des années précédentes : manque de précision, de clarté et de concision, sans oublier l'orthographe qui ne va pas s'arranger à l'ère des SMS. »
- « On constate, de nouveau, que certains résultats sont affirmés alors que les arguments pour y parvenir sont loin d'être convaincants. Le candidat « n'admet plus » un résultat pour passer à la question suivante, mais il lui faut à tout prix trouver « un pseudo-raisonnement ». »

Ce rapport précise également que « les candidats ne se sont pas concentrés sur une seule partie du sujet, mais que l'ensemble des questions a été abordé avec plus ou moins de succès. Généralement les parties de cours (champ dans un solénoïde infiniment long, coefficients d'autoinduction et de mutuelle induction, équations de Maxwell, diffraction par une ou deux fentes...) semblent connues de la plupart des candidats. »

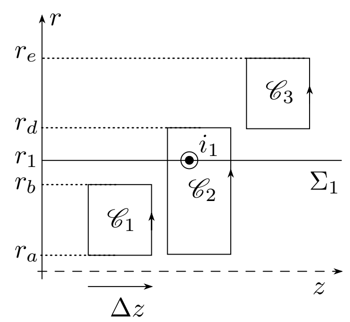
A. Écrantage d'un champ électromagnétique

A.I.1.a Examinons les propriétés de symétrie du champ magnétique $\overrightarrow{B}(r,\theta,z)$ engendré par un solénoïde infini, où r désigne la distance à l'axe de révolution du solénoïde. Soit un point $M(r,\theta,z)$ (à l'intérieur ou à l'extérieur du solénoïde) ; le plan contenant M et perpendiculaire à l'axe de révolution du solénoïde est un plan de symétrie du dispositif. Il en résulte que $\overrightarrow{B}(M)$ est porté par la direction perpendiculaire à ce plan : $\overrightarrow{B}(M) = B(M)\,\overrightarrow{e_z}$. En outre, l'invariance du dispositif par rotation autour de l'axe porté par $\overrightarrow{e_z}$ et par translation parallèlement à ce vecteur entraîne le fait que $B(M)$ ne dépend ni de θ ni de z. On en déduit que

$$\overrightarrow{B}(r,\theta,z) = B(r)\,\overrightarrow{e_z}$$

Appliquons le théorème d'Ampère aux trois contours représentés sur la figure ci-contre. Aucun courant ne traverse la surface délimitée par $\mathscr{C}_1$. De plus le champ est perpendiculaire aux portions radiales du contour donc

$$(B(r_a) - B(r_b))\Delta z = 0 \text{ pour tous } r_a, r_b < r_1$$



Ainsi, $\overrightarrow{B}$ est uniforme à l'intérieur du solénoïde. Le même raisonnement appliqué à $\mathscr{C}_3$ montre que $\overrightarrow{B}$ est également uniforme à l'extérieur du solénoïde.

Appliquons à nouveau le théorème d'Ampère au contour $\mathscr{C}_2$. Le courant traversant une surface s'appuyant sur ce contour est égal au produit du nombre de spires $N_1\Delta z/L = n_1\Delta z$ traversant le contour par le courant i_1 parcourant chacune de ces spires. Le théorème d'Ampère s'écrit alors :

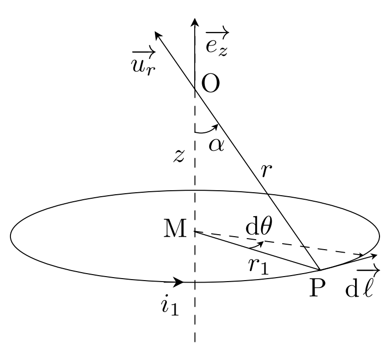
$$B(r_a)\Delta z - B(r_d)\Delta z = \mu_0\, n_1\, \Delta z\, i_1$$

Le champ dans tout l'espace se déduit donc de sa valeur en un point à l'intérieur du solénoïde. Calculons-le en un point O de l'axe de révolution z de ce dernier en sommant les contributions de chacune des spires.

Le champ créé par une spire centrée en M en un point O de son axe de révolution est donné par la loi de Biot et Savart :

$$\overrightarrow{B}(O) = \frac{\mu_0}{4\pi}\oint_{\text{spire}} \frac{\mathrm{d}\overrightarrow{\ell} \wedge \overrightarrow{u_r}}{r^2}$$

où $r^2 = {r_1}^2 + z^2$, $\overrightarrow{u_r}$ est le vecteur normé colinéaire à $\overrightarrow{PO}$ et $\mathrm{d}\overrightarrow{\ell} = r_1\mathrm{d}\theta\,\overrightarrow{e_\theta}$. Remarquons que tout plan contenant l'axe de révolution de cette spire est un plan d'antisymétrie du système : $\overrightarrow{B}$ est donc parallèle à l'axe commun à tous ces plans, c'est-à-dire à l'axe z. $B(O)$ est alors le projeté de $\overrightarrow{B}$ sur $\overrightarrow{e_z}$:



$$B(O) = \frac{\mu_0}{4\pi}\oint_{\text{spire}} \frac{(\mathrm{d}\overrightarrow{\ell} \wedge \overrightarrow{u_r})\cdot\overrightarrow{e_z}}{r^2}$$