

I. Remarques générales

Le sujet de physique 2 de la session 2010 comprenait une partie A sur l'**optique** et une partie B sur l'**électromagnétisme**.

- La partie A, à caractère expérimental, s'intéresse à la réflexion et au phénomène d'interférence entre deux ondes en présence de un et de plusieurs miroirs plans. Cette partie nécessitait de nombreux résultats numériques dans les diverses applications.
- La partie B, plus théorique, comprenait en première partie « Onde quasi-monochromatique » comme approches mathématique et physique de l'onde monochromatique, suivie d'une seconde partie où deux plans conducteurs parallèles jouaient le rôle de « résonateur électromagnétique » ou de « guide d'ondes » pour une onde qui se propageait à l'intérieur de ces plans.

I.1. Erreurs courantes

Applications numériques : la mention en entête de l'énoncé : « des applications diverses illustrent ces différentes parties et ne devront pas être négligées » a incité les candidats à aborder plus souvent ces calculs alors que ces applications étaient souvent négligées les années précédentes.

Grandeurs algébriques, scalaires et vectorielles : en optique, les grandeurs algébriques demandées n'étaient pas toujours exactes, surtout dans l'association de deux miroirs en position « Michelson ». Bien que les représentations des grandeurs scalaires et vectorielles se trouvaient mentionnées dans l'introduction de la partie « Electromagnétisme », les relations de passage se sont retrouvées bien souvent en relations scalaires et non vectorielles et quelquefois en une égalité entre un vecteur et un scalaire. Nous rappelons qu'un vecteur nul est représenté par $\mathbf{0}$ ou $\vec{0}$.

La frange centrale : nous avons relevé une certaine confusion entre un ordre d'interférence $p = 0$ et une différence de marche $\delta = 0$ pour repérer la frange centrale. Dans le cas des miroirs de Fresnel par exemple, quand la différence de marche « géométrique » se confond avec la différence de marche « optique », alors la frange centrale est obtenue au centre du système de franges, pour $\delta(x=0) = 0$ et $p(x=0) = \delta/\lambda = 0$, alors que dans le cas du miroir de Lloyd : la d.d.m optique (δ_{opt}) = d.d.m géométrique ($\delta_{géo}$) + $\lambda/2$ et pour $x = 0$, $\delta_{géo}(0) = 0$ et $p(0) = \delta_{opt}(0)/\lambda = 1/2$, ce qui donne une frange centrale sombre qui n'est donc pas située au milieu de l'écran d'observation.

I.2. Autres remarques

Les correcteurs de cette épreuve constatent que le texte n'a pas posé de problème de compréhension ni présenté d'ambiguïté dans l'interprétation des questions posées.

Cependant, en dehors de l'interprétation de la frange centrale définie précédemment, de nombreux candidats représentaient le champ d'interférences dans le plan d'observation et non dans l'espace au-dessus du miroir de Lloyd (**question 2.1.2**).

Ce sujet a été plutôt bien réussi grâce au caractère classique du programme envisagé dans l'élaboration de ce sujet. Statistiquement, les parties **A** et **B** du sujet ont été traitées de manière égale. Très peu de candidats se sont limités à ne rédiger qu'une seule partie.

II. Rapport détaillé

Partie A. OPTIQUE

Partie 1 : Miroirs plans – Réflexion

1.1. Le miroir plan

La **question 1.1.1** fut généralement mal traitée, car les candidats n'ont pas envisagé les éléments utiles à un raisonnement géométrique : point J différent de I sur {P} et B' symétrique de B par rapport à {P}, par exemple. Restait à comparer les chemins [AIB], [AIB'] et [AJB']. L'application de la **question 1.1.2** devait aboutir aux coordonnées du point C (0,-a), intersection des rayons (1) et (2) mais bien souvent les équations des droites représentatives des deux rayons n'étaient pas exactes. L'intuition a quelquefois permis de placer correctement le point C sans avoir trouvé les équations des rayons réfléchis (1) et (2). Peu de candidats ont déduit de cette étude le stigmatisme rigoureux d'un miroir plan.

1.2. Association de deux miroirs

Les questions **1.2.1** et **1.2.2** furent souvent bien traitées alors que le nombre d'images distinctes observées pour $\alpha = \frac{\pi}{p}$ n'est pratiquement jamais trouvé.

Parmi les réponses aux différentes questions de la **partie 1.2.3** sur les miroirs disposés en position « Michelson », nous avons attribué le maximum de points aux réponses sur les positions des images S' , S'_1 , S_1 et S_2 , mais si les positions de ces images étaient correctes, les valeurs algébriques $\overline{OS'}$, $\overline{OS'_1}$, $\overline{OS_1}$ et $\overline{OS_2}$ se trouvaient parfois fausses. Ces erreurs se répercutaient sur la question suivante où le miroir (m_1) était translaté.

La représentation schématique des positions des images S' , S'_1 , S_1 et S_2 après rotation du miroir (m_1) n'était pas très précise pour la construction de S'_1 et S_1 . Nous aurions souhaité voir apparaître des angles de $\pm 2\gamma$ en rapport avec la rotation d'angle γ de (m_1).

1.3. Association de trois miroirs

La **question 1.3.1** a récompensé la plupart des candidats, mais quelques uns n'ont pas compris les termes de « réflexions successives » sur chacun des trois miroirs et se sont retrouvés avec le vecteur $\mathbf{u} = (\alpha, \beta, -\gamma)$. Il était donc difficile de conclure que le rayon lumineux initial de composantes (α, β, γ) repartait dans la même direction mais en sens inverse !

L'application sur les « réflecteurs lunaires » dans la **question 1.3.2** fut un échec pour la plupart des candidats : le temps τ était souvent pris pour un aller simple (Terre-Lune) et non pour un aller-retour comme mentionné dans la **question 1.3.2.1**. C'est pourquoi nous avons constaté dans les copies l'absence du coefficient $\frac{1}{2}$ dans la distance $d_{TL} = \frac{c \cdot \tau}{2}$ mais aussi la présence de formules

inhomogènes : « $\frac{c}{\tau}$, $\frac{\tau}{c}$ ». Cette erreur s'est répercutée dans l'étude des rendements « aller » et « retour » qui nécessitait des quotients entre des aires circulaires où les rayons s'exprimaient à l'aide de d_{TL} . Nous ajouterons à cela, la confusion en α_1 : angle ou demi-angle au sommet de la section méridienne du cône. Enfin, il ne faudrait pas oublier les candidats qui confondent encore rayon et diamètre pour le calcul de la surface d'un cercle. À cause de toutes ces possibilités d'erreurs, le résultat final correct à la **question 1.3.2.2** ne fut atteint qu'à la fréquence d'une copie sur cent.

Partie 2 : Miroirs plans – Interférences

1.1. Miroir de Lloyd

Les réponses à la **question 2.1.1** furent variées : 80% de « division du front d'onde avec $I_1 = I_2$ », puis 15% de « division d'amplitude avec $I_1 \neq I_2$ » et enfin 5% de « division d'amplitude avec $I_1 = I_2$ ».

En **question 2.1.2** les sources secondaires n'étaient pas toujours correctement positionnées, d'où une difficulté pour délimiter le champ d'interférences dans le plan de la figure. Ce champ s'est trouvé la plupart du temps localisé sur l'écran d'observation.

Pour les sources secondaires nous avons obtenu tous les cas de figures : sources cohérentes, non cohérentes, synchrones, non synchrones, en phase et en opposition de phase. Déclarer qu'elles sont en phase quand, dans l'énoncé, on écrit : « **Contrairement au rayon direct, le rayon réfléchi subit, lors de la réflexion, un déphasage de π** », c'est renoncer aux points « cadeau » du rédacteur.

Dans la **question 2.1.3** un candidat sur deux oubliait le terme de $\frac{\lambda}{2}$ dans l'expression de la différence de marche optique δ , oubli se répercutant dans l'expression de l'intensité lumineuse $I(x)$ de la **question 2.1.4**. Nous avons déjà évoqué, dans la rubrique « erreurs courantes », l'ambiguïté sur la notion de « frange centrale ».

En **question 2.1.6.1** l'application sur le « bateau en mer », en a « coulé » plus d'un : la différence de marche géométrique $\Delta' = 2z \sin \theta$ n'a été justifiée correctement que par un candidat sur cent et sur un échantillon de trois cents copies nous avons trouvé deux fois la valeur de $\lambda' = 3 \text{ m}$ et aucune réponse exacte pour les deux interférences i' . Un correcteur mentionne qu'un seul candidat a traité correctement cette question, applications numériques et commentaires inclus.

Quand la **question 2.1.6.2** est abordée, les candidats savent écrire l'expression de l'intensité lumineuse en un point du champ d'interférences dans le cas de deux sources qui émettent avec des intensités différentes, mais son utilisation pour le calcul du contraste n'est pas concluante. Un candidat sur environ trois cents trouve la valeur du contraste.

1.2. Miroirs de Fresnel

Cette partie en fin du problème d'optique, fut peu abordée par les candidats. Le manque de temps contribue certainement à cette impasse, mais les candidats qui se sont intéressés aux **questions 2.2.1**, ont trouvé les expressions de la distance entre les sources secondaires S_1 et S_2 et de la largeur du champ d'interférences. La recherche de l'expression de la distance entre les sources secondaires et l'écran d'observation fut plus laborieuse.

Les candidats qui ont abordé la **question 2.2.2.1**, exprimaient l'intensité $I'(x)$ sous la forme demandée, mais le manque de maîtrise des relations trigonométriques a fait que le facteur $\frac{1}{2}$ n'apparaissait pas toujours dans les expressions des fonctions $f(\lambda_1, \lambda_2)$ et $g(\lambda_1, \lambda_2)$. Quant à la **question 2.2.2.2**, très peu de candidats ont tenté un calcul qui puisse montrer sur le graphe (battements) de l'intensité $I'(x)$, que la mesure de la distance entre deux maximums de la modulation $\left(\frac{i'_{mod}}{2}\right)$ était bien supérieure à la largeur du champ d'interférences, ce qui ne permettait pas de déterminer les valeurs de λ_1 et λ_2 du doublet jaune du mercure. D'après la forme du « conditionnel » de la question certains en ont conclu simplement qu'on ne pouvait pas déterminer λ_1 et λ_2 !

Partie B. ÉLECTROMAGNÉTISME

Partie 1 : Onde quasi-monochromatique

1.1. L'onde $\underline{\Psi}(z, t)$

La majorité des candidats ont traité correctement cette question bien que l'équation d'onde n'apparaissait pas toujours. Nous avons trouvé des équations d'onde avec une dérivée première $\frac{\partial \Psi}{\partial t}$ et une affirmation de la vérification de la condition énergétique par un résultat, assez surprenant pour des « candidats MP », de la forme : $\int_{-\infty}^{+\infty} dz = 0$.

1.2. L'onde $\underline{\Psi}'(z, t) = \underline{\Psi}_1(z, t) + \underline{\Psi}_2(z, t)$

Presque tous les candidats ont trouvé l'expression de $\Psi'_0(z, t)$ de la **question 1.2.1.** mais tous n'ont pas exprimé correctement la vitesse du maximum de l'amplitude car souvent nous avons lu : $V = \frac{\omega_0}{k_0}$. Le résultat se déduisait pourtant du terme trouvé précédemment : « $\cos(\Delta\omega.t - \Delta k.z)$ ».

Dans la **question 1.2.2** le principe de superposition de deux ondes pour vérifier une équation linéaire n'a pas été souvent utilisé. La vérification directe pour montrer que $\underline{\Psi}'(z, t)$ était solution de l'équation d'onde s'est souvent soldée par un long développement sans une issue finale acceptable. Aucun candidat ne justifie correctement la différence de $\underline{\Psi}'(z, t)$ et $\underline{\Psi}(z, t)$ par rapport aux conditions énergétiques.

1.3. L'onde $\underline{\Psi}''(z, t) = A \int_{k_0 - \frac{\Delta k}{2}}^{k_0 + \frac{\Delta k}{2}} e^{j(\omega t - kz)} dk$

Le D.L, à l'ordre 1, de la relation de dispersion $\omega = \omega(k)$ autour de $k = k_0$ demandé en **question 1.3.1** est souvent obtenu et conditionne le résultat de la **question 1.3.2.**

La **question 1.3.3** est rarement traitée et si elle est abordée, le résultat n'est pratiquement jamais correct. Dans l'application de la détermination de v_g , où la vitesse de phase v_φ est donnée, certains candidats utilisent la relation $v_g v_\varphi = c^2$, formule que l'on doit trouver dans le commentaire.

Partie 2 : Onde entre deux plans parfaitement conducteurs

2.1. Démonstration de $E = 0$, $B = 0$, $j = 0$, $\rho = 0$

Dans la **question 2.1**, le point de départ pour $E = 0$ devait être la puissance dissipée dans le conducteur parfait, suivi des équations de Maxwell-Faraday, Maxwell-Ampère et Maxwell-Gauss pour démontrer respectivement $B = 0$, $j = 0$ et $\rho = 0$, mais beaucoup de candidats se sont imposés que « E étant nul ! », alors la loi d'ohm locale $j = \gamma E$, où $\gamma \rightarrow \infty$, conduit à $j = 0$!

2.2. Relations de passage des champs E et B

En général les relations de passage sont connues. Les erreurs rencontrées concernant ces quatre relations de passage proviennent principalement de sources diverses : les grandeurs vectorielles n'ont pas leurs flèches, égalité entre vecteurs et scalaires, permutation des relations entre les composantes « normales » et « tangentielles » de E ou de B et le vecteur unitaire utilisé dans les E_N et B_T n'est pas toujours correctement défini.

2.3. Montage en « résonateur électromagnétique »

Dans les **questions 2.3.1 à 2.3.4** les erreurs de signe furent fréquentes. Le vecteur de Poynting $\mathbf{R}(x, t)$ est une quantité réelle et doit se calculer à partir des expressions réelles $\mathbf{E}$ et $\mathbf{B}$ des champs. La valeur de $\langle \mathbf{R}(x, t) \rangle_t = 0$ de la **question 2.3.5** fut souvent donnée sans explication et sans émettre un commentaire sur le résultat obtenu. Beaucoup de candidats se sont retrouvés avec un facteur $\frac{1}{2}$ dans le résultat, de la **question 2.3.6**, concernant le calcul de la moyenne temporelle $\langle u(x, t) \rangle_t$. L'expression du vecteur densité surfacique de courant $\mathbf{j}_s(t)$ de la **question 2.3.7** fut quelquefois exprimée en notation complexe. Enfin dans la **question 2.3.8** peu de candidats ont trouvé l'égalité $\langle u(x, t) \rangle_t = \langle p \rangle_t$.

2.4. Montage en « guide d'ondes »

Nous avons souvent constaté une erreur de signe de $F(x)$ et/ou de $G(x)$ dans la **question 2.4.1**. L'équation différentielle vérifiée par l'amplitude $E_1(x)$ du champ électrique fut souvent trouvée, mais avec parfois une erreur de signe dans et devant l'expression $\left(\frac{\omega^2}{c^2} - k_g^2 \right)$. Les équations $\text{div } \underline{\mathbf{E}}_1 = 0$ et $\text{div } \underline{\mathbf{B}}_1 = 0$ furent parfois citées mais rarement vérifiées. Dans la **question 2.4.3** la résolution de l'équation différentielle ne présentait pas de difficulté et la solution pour $E_1(x)$ était trouvée, solution exacte même dans le cas où une erreur de signe aurait dû conduire à une solution « hyperbolique » ! Parmi les candidats qui ont abordé la **question 2.4.4**, tous n'ont pas exprimé les champs ($\underline{\mathbf{E}}_1$, $\underline{\mathbf{B}}_1$) dans $\square$ puis dans $\square$. Dans les **questions 2.4.5 et 2.4.6** les résultats numériques de la fréquence de coupure et de la vitesse de phase étaient majoritairement exacts. Les calculs pour les **questions 2.4.7 et 2.4.9** sur le vecteur de Poynting et sur la densité volumique d'énergie électromagnétique et sa moyenne temporelle, s'identifiaient à ceux des **questions 2.3.5 et 2.3.6**. L'expression du flux moyen Φ_m , de la **question 2.4.8** n'était pas toujours exprimée en fonction de la vitesse de phase v_ϕ . Enfin peu abordée et assez mal traitée, la **question 2.4.10** n'a pas permis de représenter les graphes de v_e et v_ϕ en fonction de $\frac{f}{f_c}$. D'après les correcteurs, un candidat sur trois cents aurait réalisé un tracé plus ou moins ressemblant à ce que nous attendions.

III. CONCLUSION

On remarquera que face à ces deux sujets, les candidats n'ont pas délaissé l'optique au profit de l'électromagnétisme et vice-versa. Les questions faisaient appel à des notions vues en travaux pratiques (réflexion sur des miroirs pour l'obtention d'images et d'interférences en optique, guide d'ondes en électromagnétisme) et à des notions classiques de cours (en optique : expressions de la différence de marche des rayons lumineux dans le cas de deux sources ponctuelles, de l'intensité en tous points où les interférences sont observées, du calcul de l'interfrange... ; en électromagnétisme : équation de propagation des ondes, équations de Maxwell, relations de passage pour les champs $\mathbf{E}$ et $\mathbf{B}$ au niveau d'une surface de milieux différents, vecteur de Poynting, densité volumique d'énergie électromagnétique...).

Cette année, les correcteurs ont apprécié un effort des candidats sur la présentation des copies, mais ils espèrent que l'orthographe subira le même sort l'an prochain. Comme demandé, les applications n'ont pas été négligées et les unités furent correctement exprimées.

Enfin, comme les années précédentes, la note n'est pas toujours proportionnelle au nombre de pages remplies. Pour exemple, le candidat, dont la rédaction comportait 32 pages, est loin d'avoir obtenu la meilleure note.

La moyenne de l'épreuve est de **8,26** et l'écart type est de **2,82**.
