Physique Générale A

Série d'exercices 16 : Ondes Électromagnétiques - corrigé - 10 mars 2026

1.) **QCM A : Ondes électromagnétiques**

A. Faux. Une onde électromagnétique est à la fois constituée d'un champ électrique et d'un champ magnétique.

B. Faux. Une onde électromagnétique est une onde qui se propage aussi dans le vide.

C. Faux. Une onde électromagnétique se propage plus lentement dans la matière avec une limite fondamentale $c \approx 300000$ km/s.

D. Faux. La vitesse d'une onde peut être déterminée à partir de son indice de réfraction tel que $v = \frac{c}{n}$ ainsi plus l'indice de réfraction est élevé, plus la vitesse de l'onde EM est réduite.

E. Vrai. Par élimination.

2.) **QCM K' : Énergie**

A. Vrai. Cette onde se propage dans le vide donc à la vitesse de la lumière, c, ainsi on peut conclure que sa longueur d'onde est:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \,\mathrm{m\,s^{-1}}}{65\mathrm{s^{-1}}} = 4.62 \cdot 10^6 \,\mathrm{m}$$

B. Vrai. La densité d'énergie moyenne de l'onde est calculée comme suit:

$$\overline{u_{EM}} = \frac{1}{2}\epsilon_0 \, E^2 = \frac{1}{2} \times 8.85 \cdot 10^{-12} \,\mathrm{C^2\,N^{-1}\,m^{-2}} \times (4 \text{ N/C})^2 = 7.08 \cdot 10^{-11} \,\mathrm{J\,m^{-3}}$$

C. Vrai. Pour une onde se propageant dans le vide, les amplitudes des champs électrique (E) et magnétique (B) sont liées par la vitesse de la lumière (c) :

$$B = \frac{E}{c}$$

En utilisant les données de l'énoncé :

$$B = \frac{4 \text{ N/C}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 1.33 \cdot 10^{-8} \text{ T}$$

D. Faux. Les composantes de champ électrique et magnétique sont directement proportionnelles: $E = cB$. Si B double, E double également et la densité d'énergie moyenne quadruple (voir formule question B).

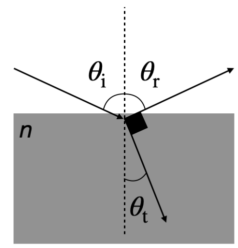
3.) **QCM K' : Spectre des ondes électromagnétiques**

Toutes les réponses sont vraies, toutes ces ondes sont des ondes électromagnétiques!

4.) **QCM A : Indice de réfraction**

Réponse C. On considère $n_{\text{air}} \approx 1$. Par la loi de la réflexion : $\theta_i = \theta_r$, et par la loi de Snell-Descartes $\sin\theta_i = n\,\sin\theta_t$. Vu que $\theta_t + \theta_r = 90°$ alors $\theta_t = 90° - \theta_i$, donc :

$$n = \frac{\sin\theta_i}{\sin(90° - \theta_i)} = \frac{\sin\theta_i}{\cos\theta_i} = \tan\theta_i = \tan(65°) = 2.14$$



5.) **QCM K' : Changement de milieu**

A. Vrai. L'indice de réfraction est une mesure du ralentissement de la vitesse de propagation de la lumière dans un milieu. Ce ralentissement dépend de la permittivité relative du matériau. On peut calculer l'indice de réfraction avec la relation $n = \sqrt{\epsilon_r}$. Pour le PMMA on trouve :

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_{\text{PMMA}}}{\epsilon_0} = \frac{30.989 \cdot 10^{-12}}{8.854 \cdot 10^{-12}} = 3.5$$

$$n = \sqrt{3.5} = 1.87$$

La vitesse de la lumière dans le PMMA est donnée par la relation :

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8}{1.87} = 1.6 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

B. Faux. La fréquence d'une onde monochromatique ne change pas lorsqu'elle change de milieu. A partir de la longueur d'onde et de la vitesse dans le vide, on peut calculer cette fréquence : $v = \lambda f$ donc $f = \dfrac{v}{\lambda} = \dfrac{3 \cdot 10^8}{1550 \cdot 10^{-9}} = 193.5 \cdot 10^{12}$ Hz $= 193.5$ THz

C. Vrai. La relation entre la longueur d'onde et la vitesse de propagation est donnée par $v = \lambda f$. Sachant que la fréquence f ne varie pas lors du changement de milieu et que la vitesse a diminué d'un facteur $n = 1.87$, on trouve $\lambda_{PMMA} = \lambda/n = 1550/1.87 = 829$ nm. Il est aussi possible d'effectuer le calcul $\lambda_{\text{PMMA}} = v_{\text{PMMA}}/f$ en utilisant la fréquence f trouvée à l'item précédent, qui reste inchangée.

D. Faux. Il y a un angle critique lorsque la lumière passe d'un indice de réfraction plus élevé à un indice plus faible, car dans ce cas la lumière est déviée en s'éloignant de la normale. Dans notre cas, $n_{\text{i}} = 1$ et $n_{\text{t}} = 1.87$. La lumière est déviée en se rapprochant de la normale et il n'y a pas d'angle critique.

6.) **QCM A : Fibre optique**

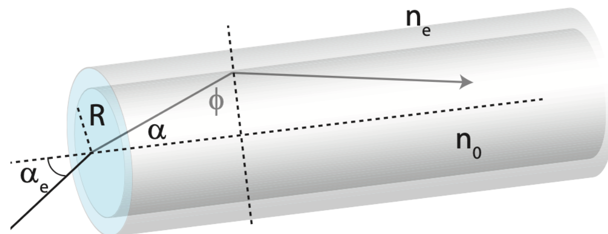
Réponse B. Pour un guidage optique total au point A, il faut une réflexion totale à l'interface des milieux n_e et n_0. On a donc la condition: $\sin\phi > (n_\mathrm{e}/n_0)$. Donc:

$$\phi > \sin^{-1}(0.9) = 64.15°,$$

d'où par trigonométrie:

$$\alpha < 25.85°.$$

Au point B la loi de Snell-Descartes donne: $\sin\alpha_\mathrm{e} = n_0 \sin\alpha$ avec $\alpha_\mathrm{e} < \sin^{-1}(1.53 \cdot \sin(25.85°)) = 41.8°$. Donc si $\alpha_\mathrm{e} < 41.8°$ la lumière est totalement guidée, si $\alpha_\mathrm{e} > 41.8°$ la lumière est partiellement guidée.



7.) **QCM A : Dispersion du verre**

Réponse D. Comme l'indice du vide vaut 1, la loi de Snell-Descartes donne l'angle de réfraction du faisceau rouge dans le verre :

$$\sin\theta_\mathrm{i} = n_\mathrm{r}\sin\theta_\mathrm{r}$$

d'où

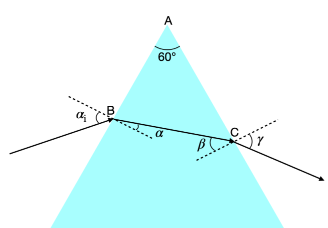
$$\theta_\mathrm{r} = \sin^{-1}(\frac{1}{n_\mathrm{r}}\sin\theta_i) = 25.9°$$

De même on trouve $\theta_\mathrm{v} = 25.2°$. À l'intérieur du verre d'épaisseur $l = 60\,\mathrm{cm}$, chaque rayon forme un triangle rectangle avec la normale. La distance latérale parcourue par un rayon est donnée par le côté opposé, soit $y = l \cdot \tan(\theta)$. La séparation d entre les deux faisceaux à la sortie est donc la différence de ces distances latérales et vaut :

$$d = y_\mathrm{r} - y_\mathrm{v} = l \cdot \tan(\theta_\mathrm{r}) - l \cdot \tan(\theta_\mathrm{v}) = 9\,\mathrm{mm}.$$

8.) **QCM K' : Prisme**

A. Vrai; B. Faux; C. Faux; D. Vrai.



On consider le triangle ABC. Au sommet A, l'angle est 60°. Au sommet B, la ligne pointillée est la normale à la face du prisme. Comme l'angle α se trouve entre cette normale et le rayon lumineux, l'angle interne du triangle à ce point est la différence : $(90° - \alpha)$. Pour la même raison, au sommet C l'angle interne du triangle est donc $(90° - \beta)$. Dans n'importe quel triangle, la somme des angles est égale à 180°, donc :

$$60° + (90° - \alpha) + (90° - \beta) = 180° \ \Rightarrow \beta = 60° - \alpha$$

Pour la loi de Snell appliquée au faisceau rouge en B :

$$\begin{aligned} \sin\alpha_{\mathrm{i}} = n_{\mathrm{R}} \sin\alpha_{\mathrm{R}} \Rightarrow \alpha_{\mathrm{R}} &= 29.85° \\ \text{Donc: } \beta_R &= 30.15° \end{aligned}$$

et en C :

$$n_{\mathrm{R}} \sin\beta_{\mathrm{R}} = \sin\gamma_{\mathrm{R}} \rightarrow \gamma_{\mathrm{R}} = \sin^{-1}(1.539 \cdot \sin(30.15°))\gamma_{\mathrm{R}} = 50.62°$$
$$\gamma_{\mathrm{R}} = 50.62°$$

Si on suit la même démarche pour le faisceau bleu, on obtient $\gamma_{\mathrm{B}} = 51.99°$.

9.) **Exercice d'approfondissement : Fibre optique**

A. Il faut une réflexion interne totale à l'interface fibre/air. Il faut donc calculer l'angle d'incidence limite à l'intérieur de la fibre qui satisfasse cette condition. La réflexion interne totale correspond à la situation où l'angle du rayon transmis est plus grand que 90°.

$$n_{\mathrm{fibre}} \sin(\theta_{\mathrm{m}}) = n_{\mathrm{air}} \sin(90°)$$

D'où $\sin(\theta_{\mathrm{m}}) = \frac{n_{\mathrm{air}}}{n_{\mathrm{fibre}}} = 0.667$. Alors $\theta_{\mathrm{m}} = 41.8°$

B. La vitesse de propagation de l'onde lumineuse dans ce milieu sera :

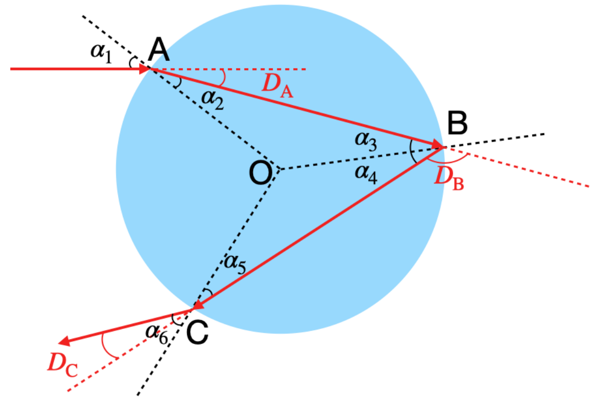
$$v = \frac{c}{n_{\mathrm{fibre}}} = \frac{3 \cdot 10^8}{1.5} = 2 \times 10^8 \,\mathrm{m/s}$$

C. Il faut calculer quel est l'angle du faisceau transmis à l'interface fibre/eau pour un angle incident de 41.8°.

$$n_{\mathrm{fibre}} \sin(\theta_{\mathrm{m}}) = n_{\mathrm{eau}} \sin(\theta_{\mathrm{eau}})$$

Donc : $\theta_{\mathrm{eau}} = \sin^{-1}(\frac{n_{\mathrm{fibre}}}{n_{\mathrm{eau}}} \sin(\theta_{\mathrm{m}})) = \sin^{-1}(\frac{1.5}{1.33} \sin(41.8°)) = 48.75° < 90°$. L'angle obtenu est plus petit que 90°, donc le rayon lumineux va sortir de la fibre. La fibre n'est donc plus en mesure de guider le rayon lumineux si elle est plongée dans l'eau.

10.) **Exercice d'approfondissement : Arc-en-ciel**



A. Au point A, on a : $n_{\text{air}} \sin(\alpha_1) = n_{\text{eau}} \sin(\alpha_2)$, d'où $\alpha_2 = \sin^{-1}\left(\frac{n_{\text{air}}}{n_{\text{eau}}} \sin(\alpha_1)\right)$. La déviation du rayon incident D_A s'exprime alors comme : $D_A = \alpha_1 - \alpha_2 = \alpha_1 - \sin^{-1}\left(\frac{n_{\text{air}}}{n_{\text{eau}}} \sin(\alpha_1)\right)$.

B. Au point B, $\alpha_3 = \alpha_4$. Les segments AO et BO sont deux rayons de la goutte, donc le triangle AOB est isocèle et les angles α_2 et α_3 sont égaux. On remarque que les angles α_3, α_4 et D_B forment un angle plat, donc $D_B = 180 - \alpha_3 - \alpha_4 = 180 - 2 \cdot \alpha_2$.

C. Au point C, le triangle BOC est également isocèle, donc $\alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_2$. La déviation D_C est la différence entre l'angle α_6 et l'angle α_5. Comme l'ensemble du système est symétrique, $\alpha_1 = \alpha_6$, d'où $D_C = \alpha_1 - \alpha_2$.

D. La déviation totale entre les rayons entrant et sortant de la goutte est :

$$\begin{aligned} D_{\text{TOT}} &= D_A + D_B + D_C \\ &= 180 + 2 \cdot \alpha_1 - 4 \cdot \alpha_2 \\ &= 180 + 2 \cdot (5°) - 4 \cdot \sin^{-1}\left(\frac{1}{4/3} \sin(5°)\right) \\ &\approx 175° \end{aligned}$$

Lorsqu'un rayon lumineux entre dans une goutte, il subit une réfraction à l'entrée et à la sortie ainsi qu'une (ou plusieurs) réflexion dans la goutte. Ce phénomène est à l'origine des arcs-en-ciel. La lumière blanche est composée de différentes couleurs, chacune ayant un indice optique n différent dans l'eau. Comme on peut l'observer à la sortie d'un prisme, la lumière est donc décomposée en sortant de la goutte. Ainsi, les rayons provenant des gouttes les plus hautes (basses) nous apparaîtront principalement rouge (violet). Les rayons arrivant aux yeux de l'observateur forment un cône (avec pour sommet les yeux, et pour axe la direction du soleil situé derrière l'observateur), d'où son apparence courbée.