

BREVET DE TECHNICIEN SUPÉRIEUR

GENIE OPTIQUE
option PHOTONIQUE

Epreuve de PHYSIQUE APPLIQUEE

Sous-épreuve U42 : PHYSIQUE

Durée 2 heures 30

coefficient 2,5

La clarté des raisonnements et la qualité de la rédaction interviendront pour une part importante dans l'appréciation des copies.

Matériel autorisé :

Calculatrice conformément à la circulaire n°99-186 du 16/11/1999

Sont autorisées toutes les calculatrices de poche, y compris les calculatrices programmables, alphanumériques ou à écran graphique à condition que leur fonctionnement soit autonome et qu'il ne soit pas fait usage d'imprimantes.

Le candidat n'utilise qu'une seule machine sur la table. Toutefois, si celle-ci vient à connaître une défaillance, il peut la remplacer par une autre.

Afin de prévenir les risques de fraude, sont interdits les échanges de machines entre les candidats, la consultation des notices fournies par les constructeurs ainsi que les échanges d'informations par l'intermédiaire des fonctions de transmission des calculatrices.

Tout autre matériel est interdit

*Dès que le sujet vous est remis, assurez-vous qu'il est complet.
Ce sujet comporte : 6 pages numérotées de 1 à 6.*

Un capteur à fibre optique : le thermomètre réparti à effet Raman

Après l'incendie de 1999, le tunnel du Mont Blanc a été équipé de capteurs à fibre optique permettant de mesurer en continu le profil de température dans des endroits difficiles d'accès, en particulier dans les endroits dits « chauds » (centrales nucléaires, puits de pétrole...). Ce capteur est un thermomètre réparti à effet Raman.

Dans ce problème, on se propose d'étudier l'effet Raman en partie I, la fibre optique en partie II, la rétro diffusion en partie III, le thermomètre global en partie IV.

Ces parties sont indépendantes.

Données : célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$
 constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$
 valeur de l'électron-volt : $1 \text{ eV} = 1,61 \times 10^{-19} \text{ J}$
 constante de Boltzmann : $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$
 correspondance degré Celsius/ Kelvin : $0^\circ \text{C} = 273 \text{ K}$

I. L'effet Raman (4 points)

Les fibres optiques sont constituées de molécules de silice. A la température absolue T , celles-ci peuvent être dans leur niveau fondamental d'énergie E_0 ou dans un état excité d'énergie $E > E_0$. On notera par la suite ΔE la différence d'énergie $E - E_0$.

Le rapport de la population N de molécules situées dans le niveau d'énergie E à la population N_0 de molécules situées dans le niveau d'énergie E_0 est donné par la loi de Boltzmann :

$$\frac{N}{N_0} = \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right)$$

Un photon incident, de fréquence ν_0 et d'énergie $h\nu_0$, peut être diffusé de trois façons différentes par une molécule de silice (voir le schéma n°1 qui suit):

- le photon incident et le photon diffusé sont tous les deux d'énergie $h\nu_0$, la molécule ne change pas de niveau d'énergie : c'est la diffusion Rayleigh.
- la molécule passe du niveau d'énergie E_0 au niveau d'énergie E tandis qu'elle diffuse un photon d'énergie :

$$h\nu_1 = h\nu_0 - \Delta E.$$

- La molécule passe du niveau d'énergie E au niveau d'énergie E_0 tandis qu'elle diffuse un photon d'énergie :

$$h\nu_2 = h\nu_0 + \Delta E.$$

Ces deux derniers cas correspondent à la diffusion Raman.

Si on analyse la lumière diffusée avec un spectromètre, on obtient le spectre représenté au schéma n°2 qui suit, sur lequel on a porté en abscisse la longueur d'onde dans le vide des radiations lumineuses et en ordonnée la puissance relative en décibels.

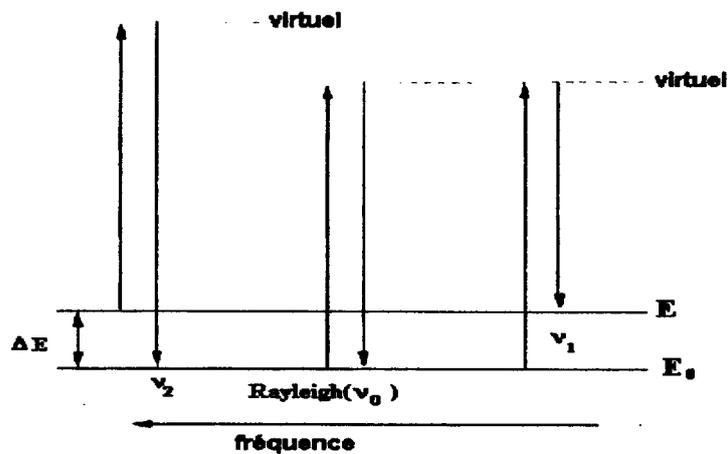


Schéma n°1

Intensité relative en dB

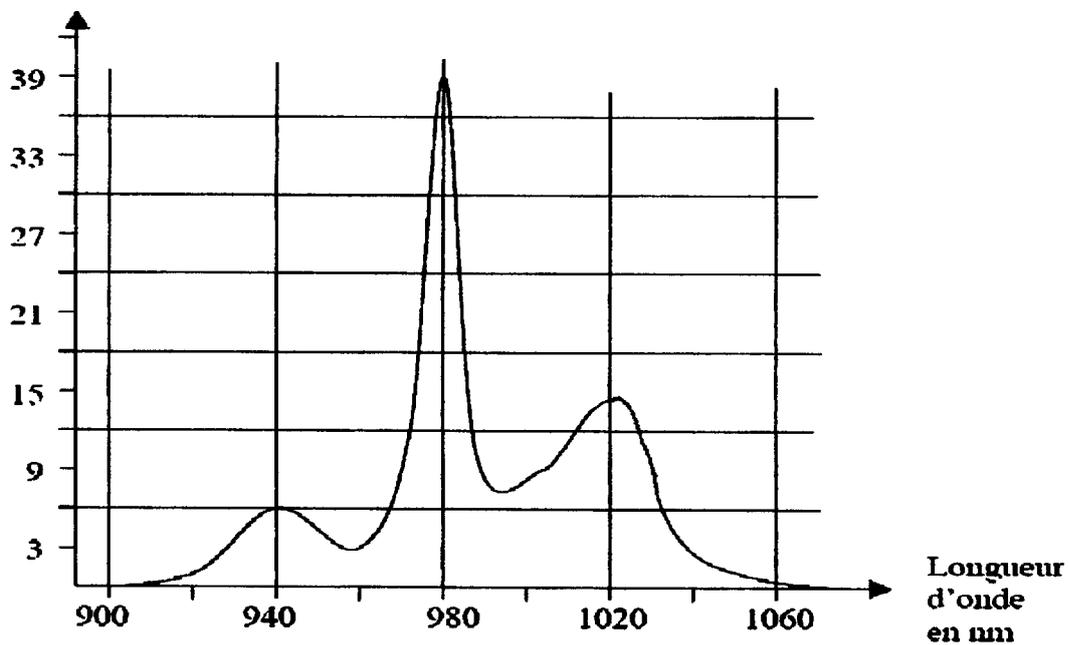


Schéma n°2

1. Interpréter l'allure de ce spectre et identifier la longueur d'onde λ_0 des photons incidents ainsi que les longueurs d'onde λ_1 et λ_2 correspondant respectivement aux deux possibilités de diffusion Raman. Justifier vos affirmations.
- 2.a. En déduire les valeurs des fréquences ν_0, ν_1 et ν_2 des diffusions considérées.
- 2.b. Montrer que les différences $\nu_2 - \nu_0$ et $\nu_0 - \nu_1$ sont égales, de valeur $\Delta\nu = 13,2 \times 10^{12}$ Hz aux erreurs de mesure près.
3. Calculer la valeur de la différence d'énergie ΔE en joule et en électron-volt.
4. Quelle est la valeur du rapport N/N_0 à la température de 300 K ?

II. La fibre optique (6 points)

Dans un premier modèle, on considère une fibre optique à saut d'indice dont le schéma est donné ci dessous. Cette fibre est constituée d'un cœur de diamètre de $D = 100 \mu\text{m}$, d'indice $n_2 = 1,500$ et d'une gaine d'indice $n_1 = 1,470$. La fibre considérée est d'une bonne longueur $L = 8,00 \text{ km}$.

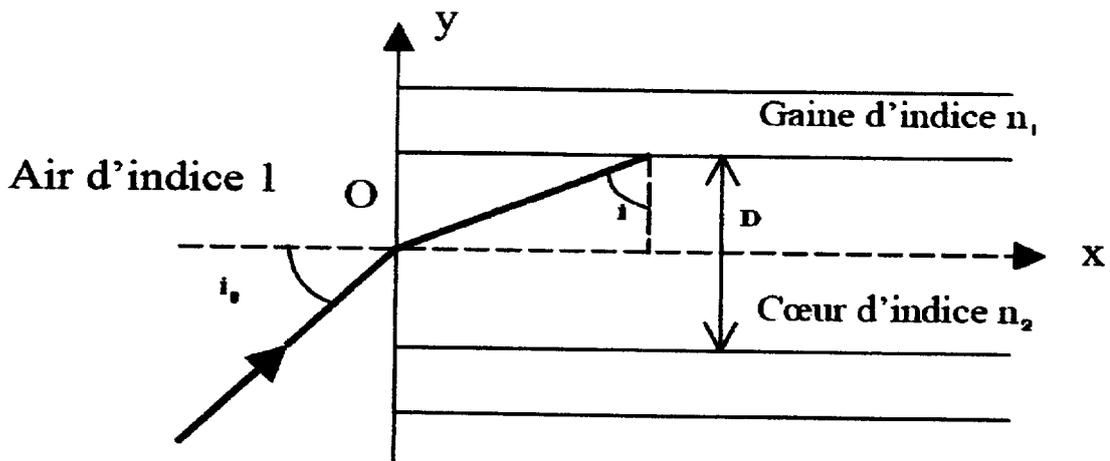


Schéma 3

1. L'angle d'acceptance θ_0 de la fibre correspond à l'angle limite d'entrée de la lumière dans la fibre, pour lequel il y a propagation dans le cœur.
 - 1.a. Établir l'expression de l'ouverture numérique $O.N. = \sin(\theta_0)$ de la fibre en fonction des indices n_1 et n_2 .
 - 1.b. Calculer la valeur de l'ouverture numérique puis celle de l'angle θ_0 .
2. Déterminer l'intervalle de temps $\Delta t_{a,i} = t - t'$ qui sépare l'arrivée au bout de la fibre du rayon ayant la durée de parcours maximale t et l'arrivée du rayon ayant la durée de parcours minimale t' .

3. On souhaite que la fibre véhicule, avec une déformation minimale et de façon indépendante, des impulsions lumineuses de durée $\tau = 10$ ns et séparées par un intervalle de $50 \mu\text{s}$. En particulier, l'étalement de l'impulsion doit être inférieur à 4 m en fin de fibre. Montrer que la fibre optique à saut d'indice ne convient pas dans ces conditions.

4. On considère un deuxième modèle de fibre : la fibre à gradient d'indice. Expliquer quelle est la différence entre les deux types de fibre et justifier le fait que la valeur du décalage temporel $\Delta t_{g,i}$ y soit alors beaucoup plus faible que dans le cas de la fibre à saut d'indice.

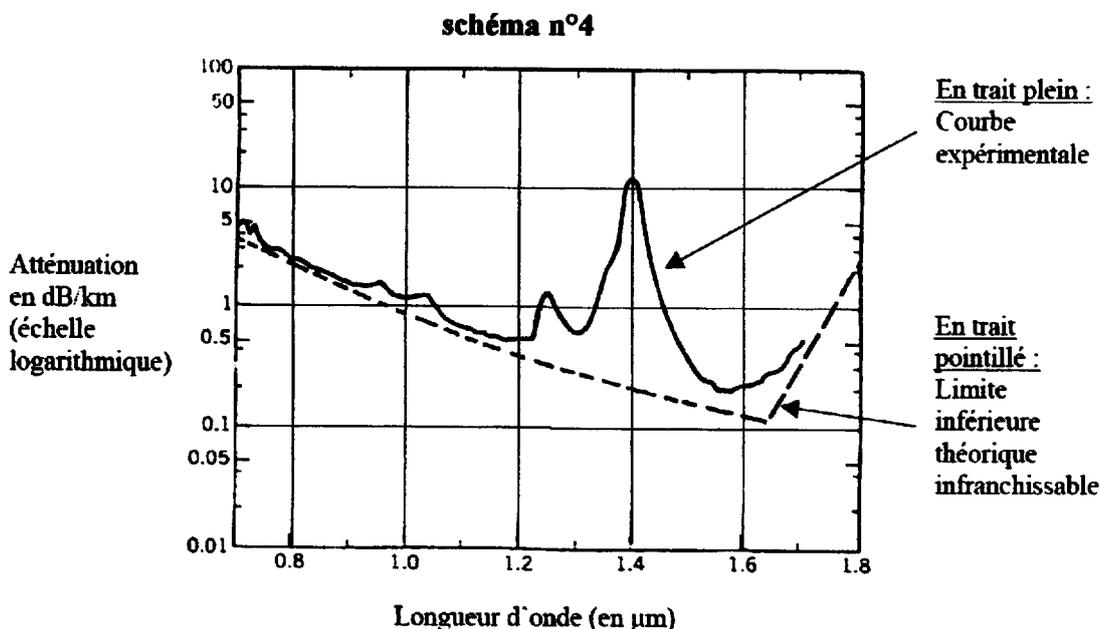
5. On peut montrer que, dans le cas de la fibre à gradient d'indice, le décalage temporel défini à la question 2 s'écrit :

$$\Delta t_{g,i} = \Delta t_{s,i} \frac{n_2 - n_1}{8 n_2}$$

n_2 désigne ici l'indice au centre de la fibre et n_1 l'indice à la frontière du cœur et de la gaine. Justifier que ce type de fibre convient pour l'application envisagée au II.3.

III. La rétro diffusion (6 points)

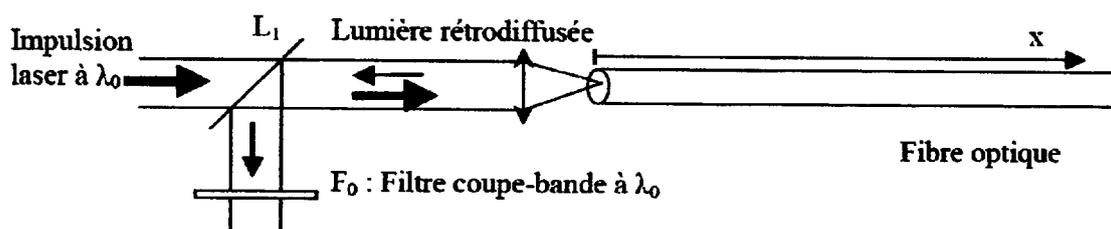
Une fibre optique absorbe toujours une partie de la lumière reçue ; la fraction non transmise dépend de la longueur d'onde λ_0 de la lumière injectée. La figure suivante représente l'atténuation linéique dans la fibre en décibels/km en fonction de la longueur d'onde dans le vide λ_0 de la lumière injectée.



1. La source lumineuse utilisée est un laser émettant à la longueur d'onde $\lambda_0 = 980$ nm. A quel domaine de radiations électromagnétiques appartient ce rayonnement ?
2. Donner une valeur approchée de l'atténuation linéique dans la fibre à la longueur d'onde λ_0 en vous aidant du schéma n°4.

3. Quelle puissance de sortie obtient-on pour une fibre de longueur $L = 8,0 \text{ km}$ si la puissance lumineuse injectée à l'entrée est de 100 mW ?
4. Pour la longueur d'onde λ_0 utilisée, l'atténuation provient essentiellement de la diffusion. La figure suivante (schéma n° 5) montre comment on capte la lumière rétro diffusée en utilisant une lame séparatrice L_1 placée devant la fibre.

Schéma n°5



La lumière rétro diffusée due à la diffusion Raman est alors noyée dans la lumière obtenue par diffusion Rayleigh et dans la lumière réfléchiée par la face d'entrée de la fibre. Pour éliminer ces radiations, on place sur la voie de mesure un filtre interférentiel F_0 qui élimine la composante de longueur d'onde λ_0 . On modélise ce filtre par une lame mince d'épaisseur e et d'indice n . La lumière arrive sur le filtre sous une incidence normale.

Démontrer la relation existant entre l'indice n , l'épaisseur e et la longueur d'onde λ_0 , qui traduit l'élimination de la radiation de longueur d'onde λ_0 .

IV. Le thermomètre (4 points)

Le principe du thermomètre à effet Raman utilise le rapport R de l'intensité de la raie Raman de longueur d'onde λ_1 et de l'intensité de la raie Raman de longueur d'onde λ_2 . Ces raies ont été définies dans la partie I. L'intensité de la raie de longueur d'onde λ_1 est indépendante de la température contrairement à l'intensité de l'autre raie. En effet, l'intensité diffusée est proportionnelle à la population des niveaux et inversement proportionnelle à la puissance quatrième de la longueur d'onde.

Ce rapport R s'écrit donc sous la forme :

$$R = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^4 \exp \left(\frac{\Delta E}{kT} \right)$$

où l'on prendra : $\lambda_1 = 1023 \text{ nm}$ et $\lambda_2 = 940 \text{ nm}$, $\Delta E = 0,055 \text{ eV}$.

1. Calculer la valeur du rapport R pour les températures $T = 300 \text{ K}$ et $T' = 310 \text{ K}$.
2. En déduire la valeur du taux de variation $\Delta R / \Delta T$ sur l'intervalle considéré.

3. On peut mesurer le rapport R avec une précision de 10^{-2} .
À quelle résolution de température cela correspond-il ?
4. En pratique, on effectue la mesure de R au moyen du dispositif suivant :

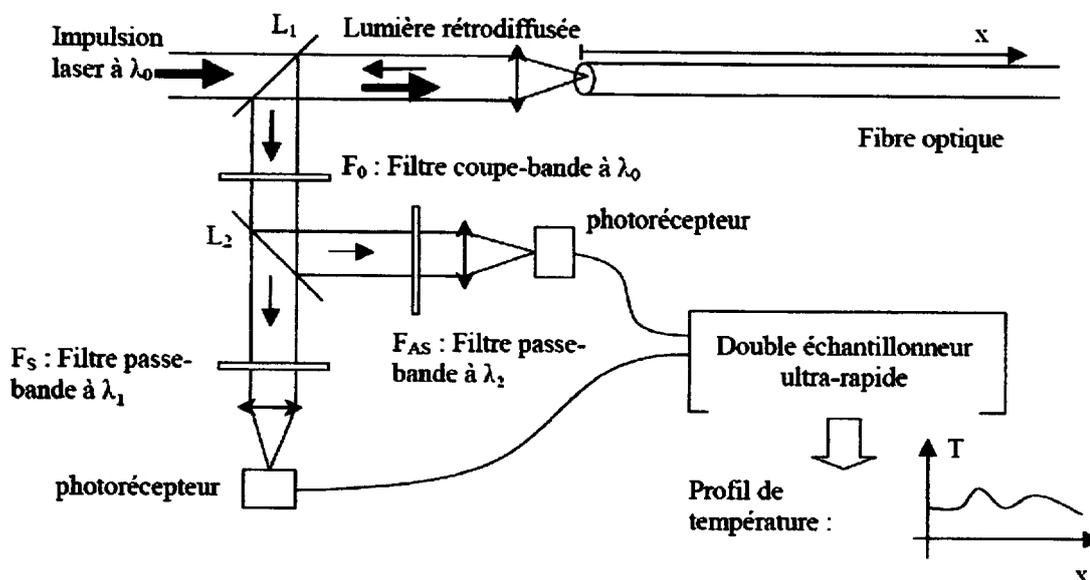


Schéma n°6

La mesure de R est faite régulièrement, à partir de l'instant zéro où la lumière pénètre dans la fibre et elle est répétée pendant une durée de l'ordre de 30 s. On obtient alors un profil donnant l'évolution de la température en fonction de la distance :

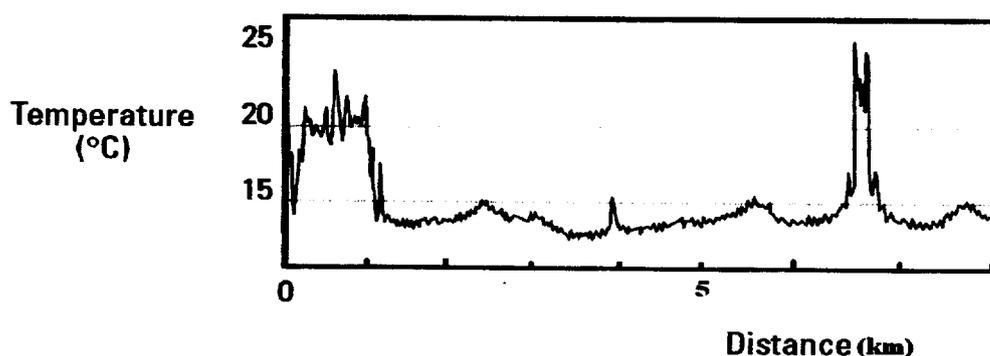


Schéma n°7

- 4.a. D'après ce graphe, quelle est la température mesurée à la distance de 6,7 km de l'entrée de la fibre ?
- 4.b. Quel est alors le temps mis par le signal pour effectuer un aller-retour jusqu'au point chaud ?