

**BREVET DE TECHNICIEN SUPÉRIEUR**

**GENIE OPTIQUE**  
**option PHOTONIQUE**

**Epreuve de PHYSIQUE APPLIQUEE**

**Sous-épreuve U42 : PHYSIQUE**

**Durée 2 heures 30**

**coefficient 2,5**

*Dès que le sujet vous est remis, assurez-vous qu'il est complet.  
Ce sujet comporte : 5 pages numérotées de 1/5 à 5/5.*

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

**CALCULATRICE AUTORISÉE**

*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.*

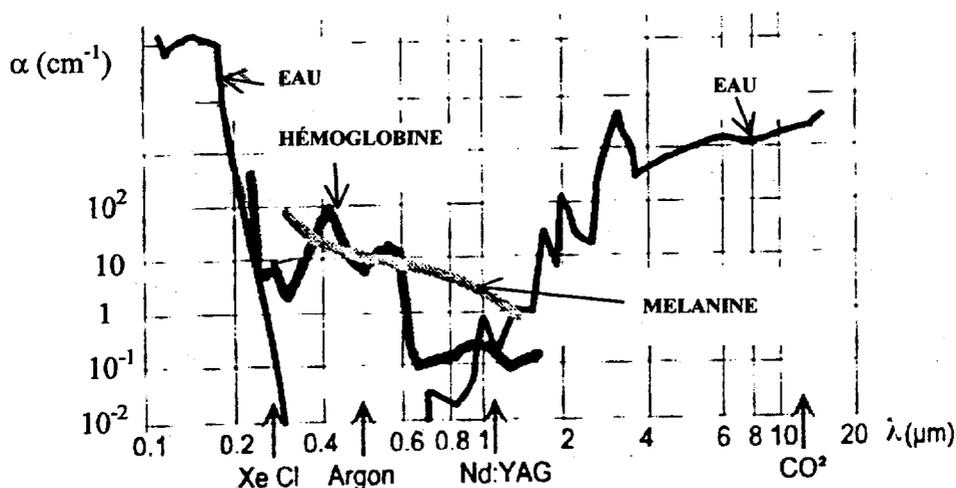
*Afin de prévenir les risques de fraude, sont interdits les échanges de machines entre les candidats, la consultation des notices fournies par les constructeurs ainsi que les échanges d'informations par l'intermédiaire des fonctions de transmission des calculatrices.*

## Utilisation médicale du laser YAG-néodyme

Un formulaire et les données nécessaires aux applications numériques sont disponibles à la fin de l'énoncé

Le laser YAG-Nd émet un rayonnement de longueur d'onde de 1064 nm qui pénètre très bien dans le corps, sur plusieurs millimètres. Il est très utilisé en chirurgie car il agit comme un scalpel mais c'est aussi un instrument de choix pour couper la circulation sanguine dans les vaisseaux. Il permet d'arrêter les saignements dans les ulcères gastro-intestinaux, d'enlever des tumeurs dans la vessie et les bronches. On s'en sert pour détruire des calculs rénaux. Il permet d'ouvrir le passage dans des vaisseaux sanguins obstrués par des plaques d'athérosclérose. Il est également préconisé dans certains cas de chirurgie ophtalmologique.

### I. Choix du laser (2 points)



Ce diagramme indique la manière dont les trois principaux composants d'un organisme vivant absorbent la lumière suivant sa longueur d'onde. L'eau est présente dans toutes les cellules vivantes. L'hémoglobine est prédominante dans les vaisseaux sanguins et donne au sang sa couleur rouge. La mélanine est le plus important des pigments de l'épiderme.

Suivant l'effet recherché, on choisira, pour l'irradiation des tissus humains, des lasers émettant dans les gammes de longueur d'onde ultraviolette, visible ou infrarouge.

L'absorption des tissus obéit à la loi de Beer :

$$P_1(\ell) = P_0 \cdot e^{-\alpha \ell}$$

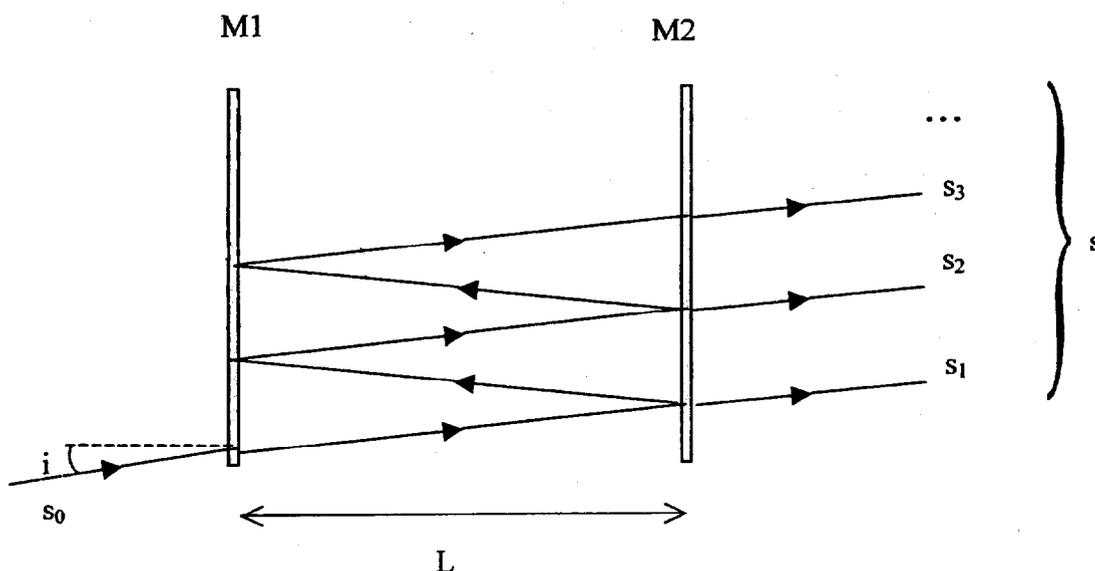
où  $P_0$  est la puissance incidente sur le tissu et  $P_1(\ell)$  la puissance après traversée d'une longueur  $\ell$  de tissu. Le coefficient d'absorption  $\alpha$  dépend de la longueur d'onde et du tissu traversé.

On appelle  $\ell_p$  la profondeur de pénétration définie par  $P_1(\ell_p) = 0,1 \times P_0$ .

1. Exprimer la profondeur de pénétration  $\ell_p$  en fonction du coefficient d'absorption  $\alpha$ .
2. Pour le laser YAG-Nd, dans le cas de la mélanine, le coefficient d'absorption a pour valeur  $1,7 \text{ cm}^{-1}$ . Calculer la profondeur de pénétration.
3. Le laser Yag-Nd est utilisé lorsqu'il s'agit de pénétrer profondément un tissu humain. Justifier ce choix en utilisant le graphe ci-dessus.

## II. Étude de la cavité laser (8 points)

La cavité laser, initialement vide, de longueur  $L$ , équivaut à un interféromètre de Fabry-Pérot. Elle est limitée par deux miroirs  $M_1$  et  $M_2$  identiques. Ces deux miroirs ne sont que partiellement réfléchissants, mais aussi transparents. Les coefficients de réflexion en amplitude et en intensité d'un miroir seront notés respectivement  $r$  et  $R$ , les coefficients de transmission en amplitude et en intensité  $t$  et  $T$ . On néglige toute absorption ( $T + R = 1$ ) ainsi que le décalage introduit par la traversée d'un miroir.



1. La lumière, de longueur d'onde  $\lambda_0$ , arrive sur le miroir  $M_1$  sous l'incidence  $i$ . Montrer que l'expression du déphasage  $\varphi$  entre une vibration transmise (par exemple  $s_1$ ) et la suivante après deux réflexions de la lumière dans la cavité (par exemple  $s_2$ ), est donnée par :

$$\varphi = 4\pi \frac{L \cos i}{\lambda}$$

2. Soit  $s_0$  la vibration incidente sur  $M_1$ , exprimer les vibrations  $s_1, s_2, s_3, \dots, s_N$  successivement transmises par  $M_2$  en fonction de  $s_0, R, T$  et  $\varphi$ . L'origine des phases est choisie pour  $s_1$ .

3. Montrer que la vibration résultante  $s$  a pour expression  $s = s_0 T \frac{1}{1 - R e^{j\varphi}}$

4. En déduire que l'intensité totale  $I$  transmise par la cavité est donnée par l'expression :

$$I = I_0 \frac{1}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right)} \quad \text{où } I_0 \text{ est l'intensité de la lumière incidente.}$$

5. Représenter l'allure de la fonction  $I(\varphi)$  pour  $R=0,95$  et  $\varphi$  compris entre  $0$  et  $6\pi$ .

6. La cavité contient à présent un milieu actif : des ions néodyme  $\text{Nd}^{3+}$  incorporés à une matrice cristalline de YAG (grenat d'yttrium et d'aluminium). Le milieu actif, dont on suppose qu'il remplit la cavité de longueur  $L = 0,20\text{m}$ , a pour indice  $n=1,82$ . L'incidence est normale ( $i = 0$ ).
- 6.1. Que devient l'expression du déphasage  $\phi$  exprimé à la question 1. lorsque la cavité est remplie d'un milieu actif d'indice  $n$  et quand l'incidence est normale ?
- 6.2. Définir et calculer l'intervalle spectral libre en fréquence  $\Delta\nu$ .

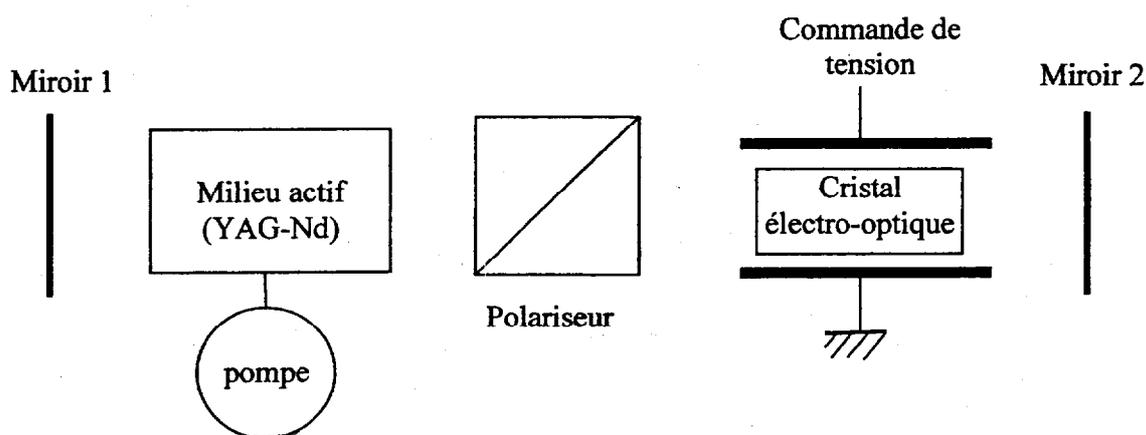
### III. Réalisation d'un laser fonctionnant en mode déclenché (« Q-switch ») (4 points)

Certaines applications médicales (urologie ou ophtalmologie) nécessitent l'emploi d'un laser YAG-Nd « Q-switched » au lieu d'un laser à émission continue. Des impulsions très courtes (quelques nanosecondes) et de forte "puissance crête" (plusieurs kW ou MW) sont alors générées et permettent une meilleure interaction avec le tissu traité.

Le fonctionnement en mode déclenché est obtenu de la façon suivante :

- On masque un des miroirs pendant tout le début du pompage, ce qui permet à l'inversion de population d'atteindre une valeur élevée.
- On rétablit ensuite rapidement la possibilité pour les rayons lumineux de faire des allers et retours entre les miroirs, le laser émet alors une brève impulsion lumineuse.

Le dispositif (voir schéma ci-dessous) comprend généralement une cellule de Pockels. On place entre le miroir  $M_2$  et le milieu actif un polariseur P et un cristal électro-optique auquel peut être appliquée une tension électrique, qui modifie alors la biréfringence du cristal. Si aucune tension n'est appliquée, la lumière est transmise sans aucune modification. Lorsque la tension est appliquée, le cristal se comporte comme une lame quart d'onde, pour la longueur d'onde  $\lambda_0 = 1064\text{nm}$ . La direction de P est à  $45^\circ$  des lignes neutres x et y de la lame. On admet que sa réflexion sur le second miroir n'entraîne aucun déphasage supplémentaire.



1. Faire un schéma représentant la direction du polariseur et les lignes neutres de la lame quart d'onde, équivalente au cristal électro-optique, lorsque la tension est appliquée.

2. La tension est appliquée.

2.1. Quelle est la valeur du déphasage  $\varphi$  qui résulte d'une traversée du cristal ?

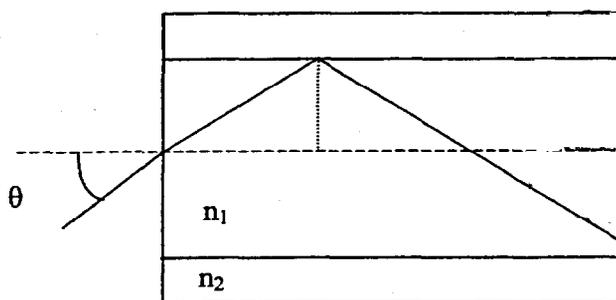
2.2. La lumière se réfléchit alors sur le miroir 2 et traverse à nouveau le cristal électro-optique. Quelle est sa direction de polarisation (Faire un schéma) ? Que vaut l'intensité de la lumière à la sortie du polariseur ?

3. Expliquer les phénomènes qui se produisent dans la cavité lorsque la tension est maintenue à sa valeur précédente, puis brutalement annulée (5 lignes maximum).

#### IV. Transmission par fibre optique (3,5 points)

La fibre optique est un moyen idéal pour transporter le rayonnement jusqu'à l'organe à traiter car elle est maniable, fine et fiable. La lumière de longueur d'onde de  $1,064 \mu\text{m}$  du laser YAG-Nd peut être transmise par une fibre optique en silice, ce qui n'est pas le cas pour le laser à  $\text{CO}_2$ . On suppose que la puissance sortant du laser YAG-Nd est intégralement injectée dans la fibre.

Les lasers médicaux utilisent des fibres multimodes à saut d'indice dont le cœur est en silice.



1. La fibre, placée dans l'air, est constituée d'un cœur d'indice  $n_1 = 1,50$  et d'une gaine d'indice  $n_2 = 1,48$ .

Exprimer puis calculer numériquement l'angle d'acceptance  $\theta_0$  ainsi que l'ouverture numérique O.N. de la fibre.

2. Une rupture de la fibre peut intervenir lors de la transmission d'impulsions puissantes, nécessaires par exemple à la destruction des calculs rénaux par un effet dit électromécanique.

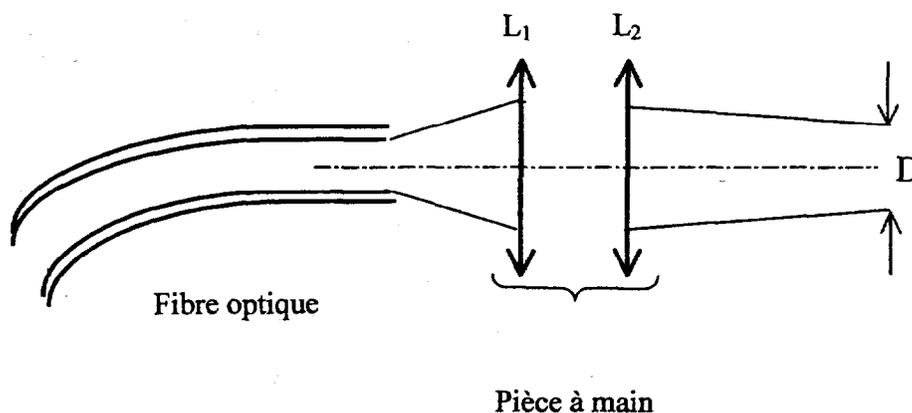
Le seuil de rupture des fibres en silice est de  $4 \text{ GW}\cdot\text{cm}^{-2}$ .

Des impulsions, de forme rectangulaire, d'énergie  $40 \text{ mJ}$  et de durée  $10 \text{ ns}$  sont nécessaires pour détruire le calcul rénal. On supposera que la densité surfacique de puissance est uniforme sur toute la face d'entrée de la fibre.

En prenant une marge de sécurité d'un facteur 4 sur le seuil de rupture de la fibre, calculer son diamètre minimal.

### V. Étude d'une pièce à main (2,5 points)

Pour certaines applications, en particulier en dermatologie, une pièce à main, adaptée à l'extrémité libre de la fibre optique, permet de régler la concentration du faisceau sur la cible.



On travaille dans le cadre de l'optique géométrique. On fait l'image de la face de sortie de la fibre de rayon  $a$  avec une pièce à main constituée d'une lentille de collimation  $L_1$  de distance focale  $f_1$  et une lentille de focalisation  $L_2$  de distance focale  $f_2$ .

La face de sortie de la fibre appartient au plan focal objet de la lentille  $L_1$ .

1. A partir d'une construction de rayons lumineux, montrer que le diamètre minimal  $D$  de l'impact est donné par la formule suivante :

$$D = 2a \times \frac{f_2}{f_1}, \text{ où } a \text{ est le rayon du cœur de la fibre.}$$

2. Calculer le diamètre minimal de la surface éclairée si on utilise une fibre de rayon  $a = 500 \mu\text{m}$  et une pièce à main dont les distances focales des lentilles valent respectivement  $f_1 = 10 \text{ cm}$  et  $f_2 = 50 \text{ cm}$ .

#### Donnée

Célérité de la lumière dans le vide :  $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

#### Formulaire

$$\cos(2\varphi) = \cos^2(\varphi) - \sin^2(\varphi)$$

$$\cos(2\varphi) = 1 - 2 \sin^2(\varphi)$$

$$\cos(2\varphi) = 2 \cos^2(\varphi) - 1$$

$$1 - \cos(\varphi) = 2 \sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right)$$

somme des termes d'une progression géométrique :

$$1 + q + q^2 + \dots + q^{N-1} = \frac{1 - q^N}{1 - q}$$

$$e^{j\varphi} = \cos(\varphi) + j \sin(\varphi)$$

$$2 \cos(\varphi) = e^{j\varphi} + e^{-j\varphi}$$

$$2 j \sin(\varphi) = e^{j\varphi} - e^{-j\varphi}$$

$$\sin^2(\varphi) + \cos^2(\varphi) = 1$$

Barème sur 20

I. Choix du laser (2 points)

1.	$\ell_p = 2,3 / \alpha$	
2.	$\ell_p = 1,35 \text{ cm}$	1
3.	Justification détaillée	1

II Étude de la cavité laser (8 points)

1.	Établir l'expression $\delta = 2L \cos i$ Établir l'expression du déphasage $\varphi = 4\pi \frac{L \cos i}{\lambda}$	1 0,5
2.	$s_1 = s_0 T, s_2 = s_0 TR e^{j\varphi}, \dots, s_n = s_0 TR^{N-1} e^{j(N-1)\varphi}$	1,5
3..	$s = s_1 + s_2 + \dots + s_n$ Établir l'expression $s = s_0 T \frac{1}{1 - Re^{j\varphi}}$	1,5
4.	Établir l'expression de l'intensité $I = I_0 \frac{1}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right)}$ Utilisation de $T+R = 1$	1,5
5.	Allure de $I(\varphi)$	1
6.1.	$\varphi = 4\pi nL/\lambda$ .	0,5
6.2.	Définition de l'ISL $\Delta\nu = 412 \text{ MHz}$	0,5

III. Réalisation d'un laser fonctionnant en mode déclenché (4 points)

1.	Schéma	1
2.1.	$\varphi = \pi/2$ .	0,5
2.2.	Schéma L'intensité est nulle.	1
3.	Explication	1,5

IV Transmission par fibre optique (3,5 points)

1.	$\sin \theta_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ . $\theta_0 = 14,1^\circ$ O.N. = $\sin \theta_0 = 0,244$	2
2.	diamètre minimum : 0,7 mm. diamètre minimum $\gg$ longueur d'onde	1,5

V. Étude d'une pièce à main (2,5 points)

1.	schéma justification de l'expression proposée	2
2.	$D = 5 \text{ mm}$	0.5