

**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 : 7 pages numérotées de 1/7 à 7/7.*

*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.*

## Réalisation d'une source ultraviolette à masque dynamique

Les techniques qui permettent de fabriquer des objets tridimensionnels à faible coût évoluent. On utilise de plus en plus la projection, sur photopolymères, d'images générées par un écran à cristaux liquides (LCD).

Le système dont on propose l'étude figure en annexe 2 à titre d'information. Son exploitation n'est pas nécessaire pour résoudre les exercices.

*L'étude se limite à quelques aspects simples du système décrit.*

*Les trois parties sont indépendantes et peuvent être traitées dans n'importe quel ordre.*

### I. Sélection de modes dans la cavité d'un laser ND-YAG (sur 8,5 points)

#### 1. Modes d'une cavité Fabry-Pérot à miroirs plans

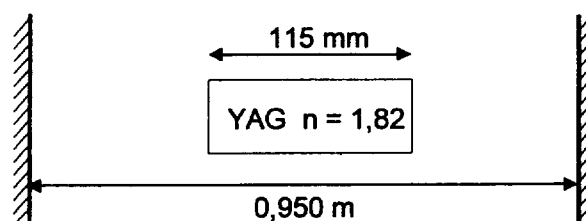
- 1.1. On appelle  $L$  le chemin optique correspondant à un aller simple dans la cavité résonante Fabry-Pérot d'un laser à miroirs plans. On prend, pour l'air qui remplit la cavité, une valeur de l'indice égale à 1,00.

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

- 1.1.a. Exprimer les fréquences permises  $\nu_p$  en fonction du chemin optique  $L$  et de la célérité  $c$  de la lumière (on considère qu'il n'y a pas de changement de phase lors de la réflexion sur les miroirs).
- 1.1.b. En déduire que l'écart (intervalle spectral libre) entre 2 modes voisins est donné par :

$$\Delta\nu = \frac{c}{2L}$$

- 1.2. Dans la cavité d'un laser Nd-YAG, les miroirs plans sont éloignés de 0,950 m. Entre ces miroirs, on a placé un barreau de Nd-YAG de longueur 115 mm et d'indice 1,82.



- 1.2.a. Calculer la valeur numérique du chemin optique  $L$  pour un aller simple.  
En déduire la durée  $T_0$  mise par la lumière pour faire un aller et retour dans la cavité.
- 1.2.b. Calculer la valeur numérique de l'intervalle spectral libre  $\Delta\nu$ .
- 1.2.c. La courbe de gain du laser a une largeur d'environ 21 GHz. Vérifier que le nombre de modes qui existent à l'intérieur de cette courbe est voisin de 150.

## 2. Émission en modes bloqués, laser picoseconde

Un dispositif interne permet de superposer les différents modes et de les mettre en phase. Ces conditions de fonctionnement permettent d'obtenir une émission périodique, de forte puissance crête et de très courte durée. C'est l'émission en modes bloqués.

On superpose 150 ondes de même amplitude  $E$ , leurs fréquences ont pour expression :

$$\begin{aligned} \nu_p &= \nu_0 + p \cdot \Delta\nu \quad (p \text{ variant de } 0 \text{ à } 149) \\ \nu_0 &= 5,64 \times 10^{14} \text{ Hz} \quad \text{et} \quad \Delta\nu = 140 \text{ MHz} \end{aligned}$$

À chaque mode correspond une expression de la forme :

$$E_p = E \cdot \sin(2\pi \cdot \nu_p \cdot t) = E \cdot \sin(2\pi \cdot \nu_0 \cdot t + 2\pi \cdot p \cdot \Delta\nu \cdot t)$$

ou

$$E_p = E \cdot \exp(j \cdot 2\pi \cdot \nu_p \cdot t) = E \cdot \exp(j \cdot 2\pi \cdot \nu_0 \cdot t) \exp(j \cdot 2\pi \cdot p \cdot \Delta\nu \cdot t)$$

2.1. Donner l'expression de  $E_0$ ,  $E_1$  et  $E_2$ .

2.2. L'expression de l'intensité résultante  $I$  s'écrit :

$$I = I_0 \frac{\sin^2(150 \cdot \pi \cdot \Delta\nu \cdot t)}{\sin^2(\pi \cdot \Delta\nu \cdot t)}$$

L'intensité résultante  $I$  est une fonction périodique du temps. Sa valeur est maximale quand :

$$\pi \cdot \Delta\nu \cdot t = m \cdot \pi \quad m \text{ étant un nombre entier.}$$

Exprimer en fonction de  $I_0$  la valeur maximale  $I_{\text{MAX}}$  de l'intensité résultante  $I$ . Commenter le résultat obtenu.

On rappelle que :  $\sin \alpha \approx \alpha$  quand l'angle  $\alpha$  est petit et exprimé en radian.

## 3. Puissance crête et énergie d'une impulsion.

Un système bloque en fait la plupart des impulsions et ne laisse passer qu'une impulsion géante dont on admet que la forme est rectangulaire. Cette impulsion rectangulaire est émise régulièrement avec une période  $T_3 = 0,10$  s. Elle possède une énergie  $E_{\text{IMP}} = 1,2$  mJ et sa durée est  $T_4 = 50 \times 10^{-9}$  s.  $P_{\text{MOY}}$  est la puissance moyenne mesurée à la sortie du laser.

3.1. Exprimer  $T_3$  en fonction de  $P_{\text{MOY}}$  et  $E_{\text{IMP}}$ .

3.2. En déduire la valeur de la puissance moyenne  $P_{\text{MOY}}$  émise par ce laser.

3.3. Calculer la puissance crête  $P_{\text{MAX}}$  émise par ce laser. Commenter ce résultat.

## II. Le faisceau gaussien (sur 5,5 points)

### 1. Étude spatiale

Le faisceau laser vert issu du cristal de KTP se propage le long d'un axe  $z'z$ . C'est un faisceau gaussien caractérisé par sa symétrie de révolution et une longueur d'onde  $\lambda = 532 \text{ nm}$ .

Son rayon au waist a pour valeur  $w_0 = 0,60 \text{ mm}$ .

On étudie la dimension du faisceau dans un plan longitudinal contenant l'axe de propagation  $z'z$ . L'origine de cet axe est prise au waist. On rappelle l'équation décrivant un tel faisceau :

$$w^2 = w_0^2 \left( 1 + \left( \frac{z}{z_R} \right)^2 \right) \quad \text{avec} \quad z_R = \frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda}$$

Calculer la valeur de la distance de Rayleigh  $z_R$  de ce faisceau.

Quelle est, pour  $z = z_R$ , la valeur  $w_1$  du rayon ?

### 2. Étude énergétique

On étudie maintenant la répartition d'intensité dans un plan donné (pour lequel  $z$  est fixé) transversal à l'axe de propagation.

2.1. On veut utiliser le faisceau laser pour éclairer un écran LCD. L'éclairement est acceptable si :

- on a un maximum d'intensité  $I_0$  au centre de l'écran,
- l'intensité à une distance  $r = 10 \text{ mm}$  du centre, vaut  $I = I_0 / 2$ .

Calculer le rayon  $w_2$  du faisceau incident qui permet cette condition.

On rappelle que : 
$$I(r) = I_0 \exp\left(\frac{-2r^2}{w_2^2}\right)$$

2.2. On place, sur le trajet du faisceau, un extenseur (afocal) constitué d'une lentille divergente de focale  $-15 \text{ mm}$  et d'une lentille convergente de focale  $+300 \text{ mm}$ .

2.2.a. Faire un schéma de principe de l'extenseur en faisant apparaître les foyers objet et image de chaque lentille. Quelle distance sépare les 2 lentilles ?

2.2.b. Quelle relation lie le rayon  $w_s$  du faisceau à la sortie de l'extenseur et le rayon  $w_e$  à l'entrée de l'extenseur ?

2.2.c. Dans quel rapport l'extenseur diminue-t-il la densité surfacique de puissance sur l'écran LCD ?

2.2.d. Quelle doit être la valeur du rayon  $w_e$  pour que celle de  $w_s$  soit égale à  $17 \text{ mm}$  ?

### III. Étude de l'écran à cristaux liquides et de la projection du masque sur le cristal de LBO (sur 6 points)

#### 1. L'écran à cristaux liquides

Un cristal liquide se comporte comme un milieu uniaxe positif. Toutes ses molécules sont orientées dans la même direction Oz (figure 1(a) de l'annexe 1). Il se comporte comme un milieu biréfringent uniaxe positif ( $n_E = 1,64$  est l'indice extraordinaire principal et  $n_O = 1,50$  est l'indice ordinaire).

Le cristal est placé entre deux lames de verre parallèles (distantes de  $d$ ) sur lesquelles sont déposées des électrodes transparentes. Lorsqu'une tension  $U$  est appliquée aux électrodes le champ électrique créé modifie l'orientation des molécules et par conséquent celle de l'axe optique (figure 1(b) de l'annexe 1).

La vibration incidente se propage selon l'axe Oy et est polarisée rectilignement. Elle se décompose dans le cristal en deux vibrations (ordinaire et extraordinaire)

C'est l'ellipsoïde des indices (figure 2 de l'annexe 1) qui permet de déterminer la valeur de l'indice rencontré par une vibration lumineuse dans le milieu. Son intersection avec le plan d'onde incident P définit une ellipse dont les axes ont pour directions celles des lignes neutres Oz et Ox du biréfringent, et pour demi-longueurs les indices ordinaire  $n_O$  et extraordinaire  $n_E$ . Lorsqu'une tension suffisante est appliquée aux électrodes, l'ellipsoïde des indices bascule avec les molécules.

- 1.1. L'inclinaison  $\alpha$  des molécules (et de l'axe optique) est une fonction croissante de la tension  $U$  appliquée aux électrodes. L'indice extraordinaire  $n_e$  varie avec la tension  $U$  et sa valeur est donnée par la relation :

$$n_e = \frac{n_O n_E}{\sqrt{n_O^2 \cos^2 \alpha + n_E^2 \sin^2 \alpha}}$$

Calculer la valeur de  $\Delta n = n_e - n_O$  lorsque l'angle  $\alpha$  prend les valeurs  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  et  $90^\circ$ .

Comparer l'évolution des trois valeurs numériques de  $\Delta n$  avec l'évolution observée sur le graphe de la figure 3 de l'annexe 1.

- 1.2. Quelle est, en fonction de  $d$  et  $\Delta n$ , l'expression de la différence de marche  $\delta$  entre les deux vibrations à la sortie du cristal ?

Le sens de variation de la différence de marche  $\delta$  est-il le même que celui de la tension  $U$  ?

- 1.3. Un analyseur croisé avec le polariseur reçoit les vibrations émergentes.

1.3.a. L'épaisseur  $d$  des cristaux a pour valeur  $40 \mu\text{m}$ . En utilisant le graphe de la figure 3 de l'annexe 1 on peut associer une différence de marche  $\delta = 1,6 \mu\text{m}$  à une tension de valeur  $5 \text{ V}$ . Cela correspond-il à un comportement du cristal en lame demi-onde ou en lame d'onde (on travaille toujours à la longueur d'onde  $\lambda = 532 \text{ nm}$ ) ? Justifier votre réponse.

1.3.b. Quelle est la valeur de la différence de marche lorsque la tension  $U$  a pour valeur  $2,0 \text{ V}$ . Le cristal se comporte-t-il comme une lame demi-onde ou comme une lame d'onde ? Justifier votre réponse.

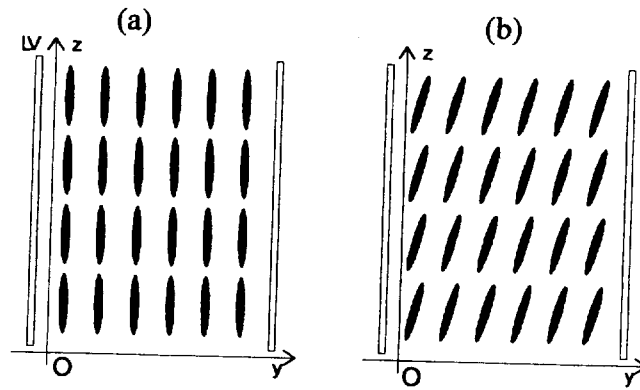
1.3.c. Quelle valeur de la tension ( $2,0$  ou  $5,0 \text{ V}$ ) faut-il appliquer aux électrodes pour que la lumière soit transmise ? Ne soit pas transmise ? Justifier votre affirmation.

## 2. Projection du masque sur le cristal LBO

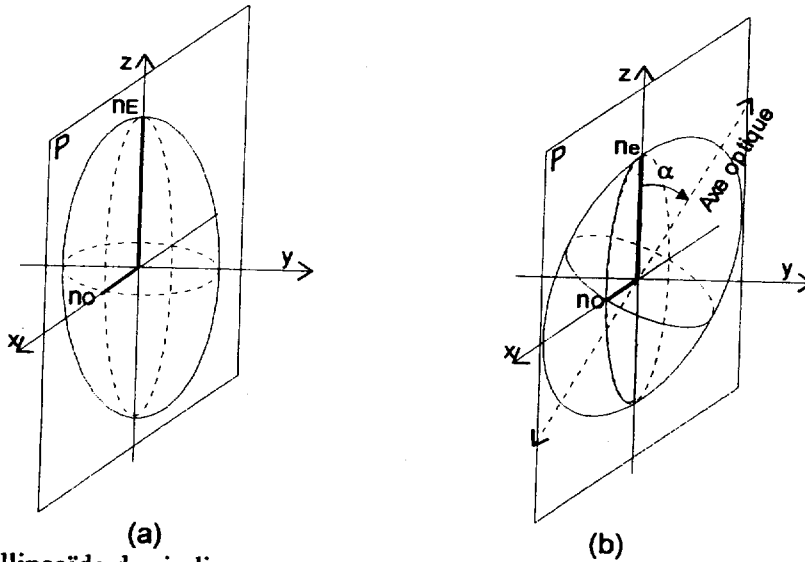
En utilisant la lentille  $L_4$  de focale  $f = +76$  mm du réducteur de faisceau, on projette, sur le cristal de LBO, l'image du masque inscrit sur l'écran LCD. On veut réaliser un grandissement transversal de valeur  $G_t = -0,30$ .

À quelle distance de la lentille doivent se trouver l'objet (sur l'écran LCD) et l'image (cristal de LBO) ?

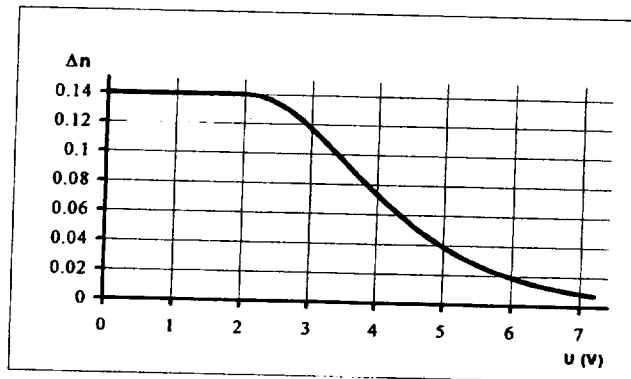
ANNEXE 1



**Figure 1** : - en l'absence de tension (a), les molécules et l'axe optique sont orientés selon Oz  
 - lorsqu'une tension est appliquée entre les électrodes (b), les molécules et l'axe optique s'inclinent d'un angle  $\alpha$ .



**Figure 2** : Ellipsoïde des indices  
 - en l'absence de tension (a),  
 - lorsqu'une tension est appliquée entre les électrodes (b).



**Figure 3** :  $\Delta n$  décroît lorsque la tension U dépasse la tension de seuil  $U_S = 2,0$  V.

## ANNEXE 2

## Source ultraviolette à masque dynamique

Les éléments principaux de ce système sont :

- Un laser Nd-YAG à modes bloqués qui émet une radiation infrarouge (1064 nm). Dans la cavité, une partie de cette radiation se transforme en radiation verte (532 nm) en traversant un cristal non linéaire KTP.
- Ces radiations sont séparées par la lame dichroïque MDi<sub>1</sub>.
- Le faisceau gaussien est traité (lame  $\lambda/2$ , expandeur (L<sub>1</sub> et L<sub>2</sub>), réducteur (L<sub>3</sub> et L<sub>4</sub>)) et traverse un masque (écran LCD à cristaux liquides suivi d'un polariseur) piloté par un ordinateur.
- Ce masque est projeté sur un cristal non linéaire LBO (LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub>) par la lentille L<sub>4</sub>.
- Ce cristal est éclairé par la radiation infrarouge et par la radiation verte qui sont superposées après avoir traversé la lame dichroïque MDi<sub>2</sub>. Orienté convenablement, le cristal produit une image ultraviolette (355 nm) obtenue en superposant les 2 radiations.
- À la sortie de la source, on place un filtre F<sub>1</sub> pour ne laisser passer que la radiation ultraviolette. On projette l'image du LBO sur la résine.

Le schéma, représenté ci-après, permet de repérer les éléments principaux cités.

