

**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.*

## MODULATEUR D'INTENSITE LUMINEUSE HAUT DEBIT

Un modulateur d'intensité lumineuse permet de convertir des impulsions électriques binaires porteuses du signal numérique à transporter en impulsions lumineuses qui seront ensuite transmises par fibre optique.

Pour réaliser un tel instrument, on utilise généralement un modulateur de phase, la cellule de Pockels, à laquelle on associe soit un ensemble polariseur/analyseur soit un interféromètre Mach-Zehnder en optique intégrée. On atteint ainsi une fréquence élevée de modulation de l'ordre de  $40 \text{ Gbit.s}^{-1}$ . Le modulateur peut fonctionner dans une large fenêtre de longueur d'onde allant de 800 nm à 1600 nm, laquelle fenêtre est compatible avec les télécommunications optiques.

On s'intéresse ici à un modulateur intégré (Fig.1) fabriqué avec un cristal de Niobate de Lithium ( $\text{LiNbO}_3$ ) ayant pour dimensions 5 cm de longueur, 2 mm de largeur et 0,5 mm d'épaisseur. L'interféromètre adjoint est réalisé avec des guides d'onde intégrés : deux jonctions en Y sont reliées entre elles par deux guides parallèles. Le modulateur comprend deux jeux d'électrodes : l'un permet d'appliquer une tension continue de décalage (offset) et l'autre, la tension de modulation proprement dite, avec une fréquence qui atteint plusieurs dizaines de GigaHertz.

Dans l'étude simplifiée suivante, le faisceau lumineux produit par une source laser sera assimilé à une onde plane monochromatique, de longueur d'onde dans le vide  $\lambda$  et se propageant suivant l'axe z'z'.

Dans la cellule de Pockels se trouve un cristal qui se comporte comme une lame transparente biréfringente. Les indices ordinaire  $n_o(V)$  et extraordinaire  $n_e(V)$  dépendent de la tension  $V$  appliquée au cristal, perpendiculairement à la direction du faisceau lumineux.

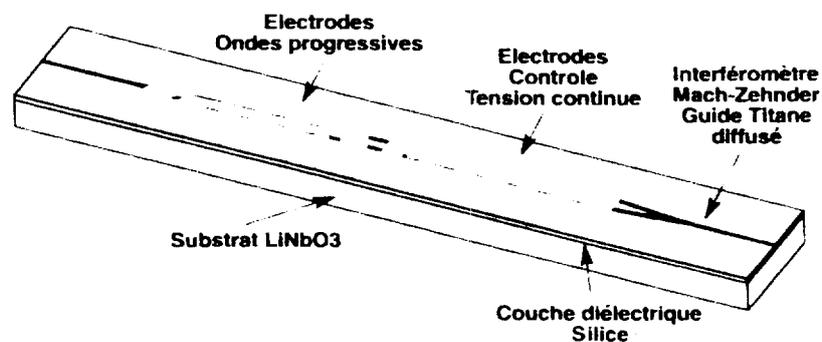


Fig 1 : modulateur d'intensité avec Mach-Zehnder intégré

## A – Étude de la source (6 points)

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

### 1. Étude de la diode laser

On utilise pour alimenter le modulateur intégré une diode laser dont le spectre est donné ci-dessous :

Intensité (mW)

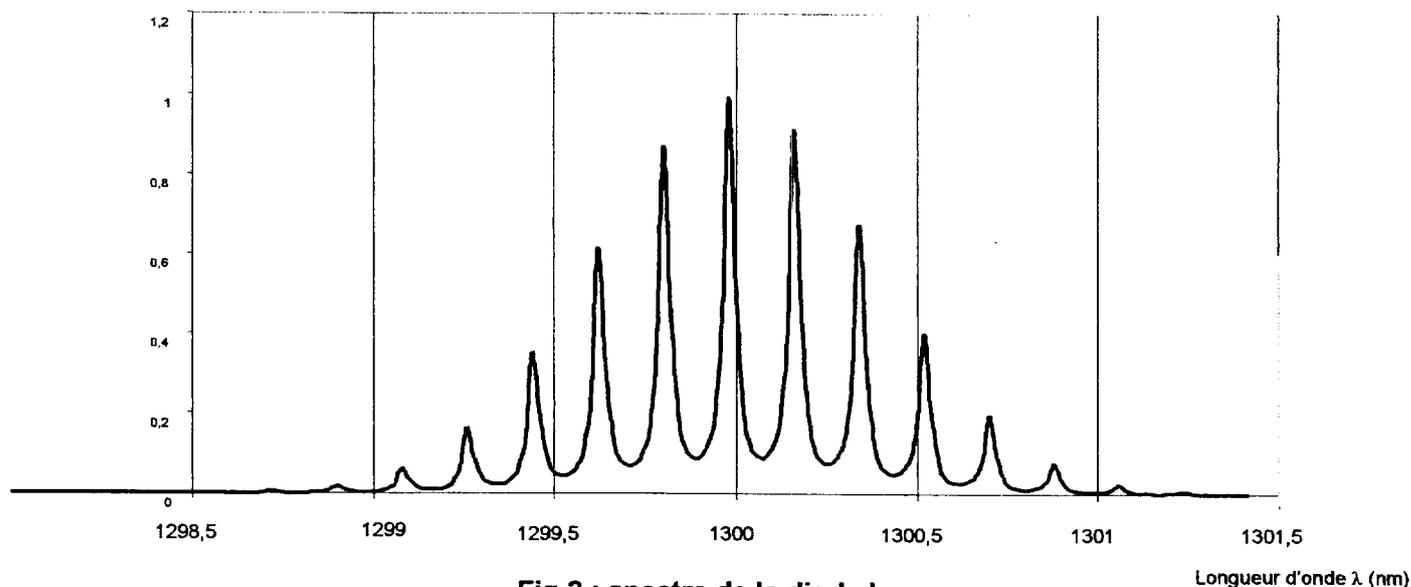


Fig 2 : spectre de la diode laser

- 1.1. Déterminer l'écart moyen en longueur d'onde  $\Delta\lambda$  entre deux modes longitudinaux successifs.
- 1.2. En déduire l'intervalle spectral libre (ISL) en fréquence  $\Delta\nu$  entre deux modes.
- 1.3. Sachant que l'intervalle spectral libre en fréquence s'exprime par la relation :

$$\Delta\nu = \frac{c}{2nl} \quad \text{où } n = 3,6 \text{ est l'indice du milieu actif,}$$

trouver la longueur  $l$  de la cavité résonnante.

- 1.4. L'émission laser se fait par une ouverture rectangulaire de petite taille. Donner la forme géométrique de la section du faisceau laser dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation et indiquer quel phénomène est responsable de la divergence du faisceau.

### 2. Étude de l'optique de collimation

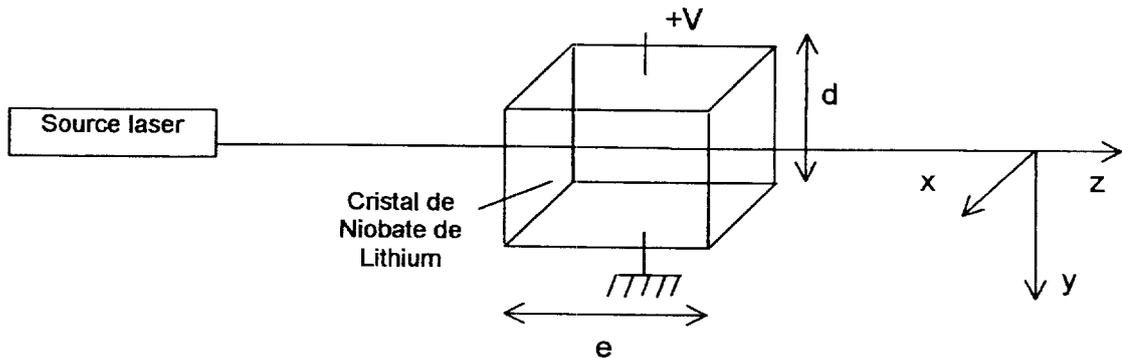
On utilise un système afocal pour réduire la divergence du faisceau issu de la diode laser.

Ce système afocal est formé, dans l'ordre, d'une lentille divergente  $L_1$  ( $f'_1 = -5 \text{ cm}$ ) et d'une lentille convergente  $L_2$  ( $f'_2 = 25 \text{ cm}$ ).

- 2.1. Quelle est la distance entre les centres optiques  $O_1$  et  $O_2$  des deux lentilles ?
- 2.2. Représenter sur la copie le schéma (sans échelle) du dispositif afocal et indiquer le trajet d'un rayon incident parallèle à l'axe optique.
- 2.3. Représenter sur un second schéma (sans échelle) le trajet d'un rayon lumineux faisant un angle  $\theta$  avec l'axe optique.

- 2.4. Calculer la largeur  $w_s$  du faisceau obtenu en sortie du système afocal lorsque la largeur  $w_e$  du faisceau à l'entrée vaut 0,85 mm.  
 Quelle est la divergence  $\theta'$  du faisceau à la sortie si l'angle  $\theta$  vaut 15 mrad ? On ne demande aucune démonstration dans cette question.

**B - Modulation d'intensité par cellule de Pockels et système polariseur/analyseur ( 9 points)**



**Fig 3 : Cellule de Pockels**

1. L'évolution des indices ordinaire  $n_o(V)$  et extraordinaire  $n_e(V)$  du cristal en fonction de la tension  $V$  appliquée est donnée par :

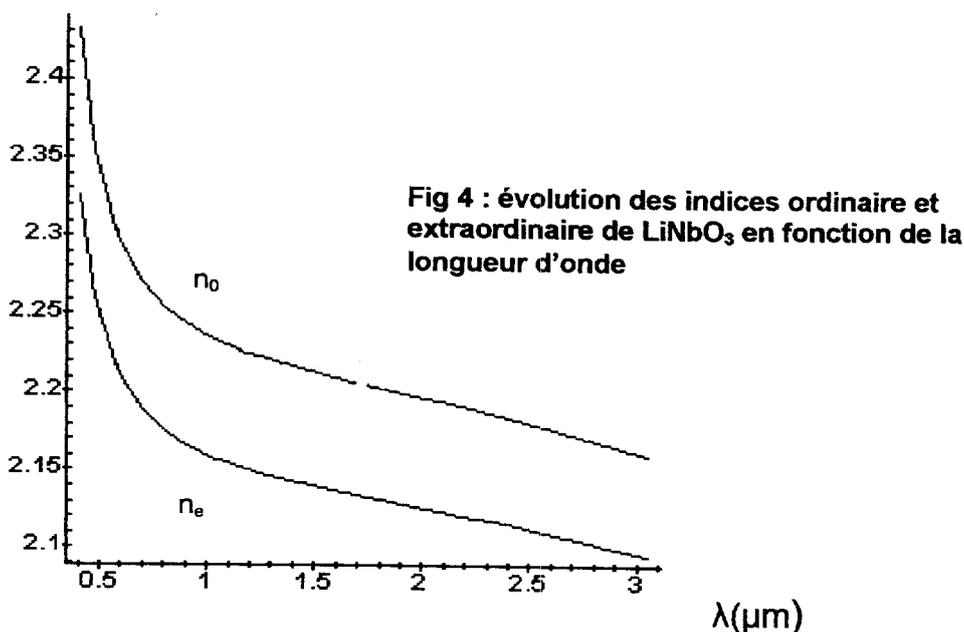
$$n_o(V) = n_o - \frac{1}{2} n_o^3 \alpha \frac{V}{d} \qquad n_e(V) = n_e - \frac{1}{2} n_e^3 \beta \frac{V}{d}$$

- $n_o$  et  $n_e$  sont respectivement les indices de réfraction ordinaire et extraordinaire du milieu à la longueur d'onde utilisée et pour  $V=0$ ,
- $\alpha$  et  $\beta$  sont les coefficients électro-optiques du cristal,
- $d$  est la distance entre les deux plaques auxquelles est appliquée la tension  $V$ .

**Données :**

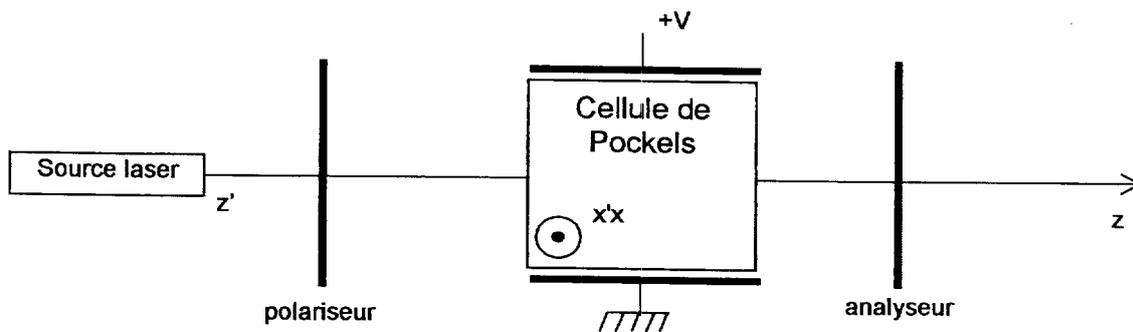
longueur d'onde utilisée  $\lambda = 1300$  nm,  
 coefficient  $\alpha = 8,6$  pm.V<sup>-1</sup>  
 coefficient  $\beta = 30,9$  pm.V<sup>-1</sup>  
 distance  $d = 5,0$  μm

- 1.1. En utilisant le graphe donné ci-dessous (Fig 4), repérer les valeurs de  $n_o$  et  $n_e$  et en déduire l'équation numérique de  $n_o(V)$  et de  $n_e(V)$ .
- 1.2. Quelles sont les variations relatives de  $n_o(V)$  et de  $n_e(V)$  lorsque la tension  $V$  passe de 0 V à 1,0 kV ? Conclure.
- 1.3. La cellule de Pockels équivaut à une lame biréfringente, dont l'axe optique a la direction de l'axe  $x'x$ . Pour toute tension appliquée, on a  $n_o(V) > n_e(V)$ . Déterminer quel est l'axe rapide de la lame.



2. La lumière traverse à présent un polariseur dont l'axe fait un angle de  $45^\circ$  avec l'axe  $x'x$ . L'axe  $x'x$  a même direction que celle d'une ligne neutre de la cellule de Pockels (Fig 5). La longueur de cristal traversée par la lumière est notée  $e$ . Un analyseur suit la cellule de sorte que analyseur et polariseur soient croisés.

La vibration, représentée par le champ électrique  $\vec{E}$ , a une amplitude  $a_0$  et une intensité  $I_0$  immédiatement après le polariseur.



**Fig 5 : modulateur d'intensité avec polariseur et analyseur**

- 2.1. Représenter sur un schéma, où figurent les lignes neutres  $x$  et  $y$  de la cellule, les directions de l'axe du polariseur et de l'analyseur ainsi que le champ électrique  $\vec{E}$ .
- 2.2. Déterminer, en fonction des grandeurs  $e$ ,  $\lambda$ ,  $n_o(V)$  et  $n_e(V)$ , le déphasage  $\phi$  de la composante  $\vec{E}_x$  par rapport à la composante  $\vec{E}_y$  du champ électrique en sortie du cristal.
- 2.3. On note  $\Phi_0$  la valeur de  $\phi$  obtenue pour une tension nulle. Exprimer  $\Phi_0$  en fonction des grandeurs  $e$ ,  $\lambda$ ,  $n_e$  et  $n_o$ .

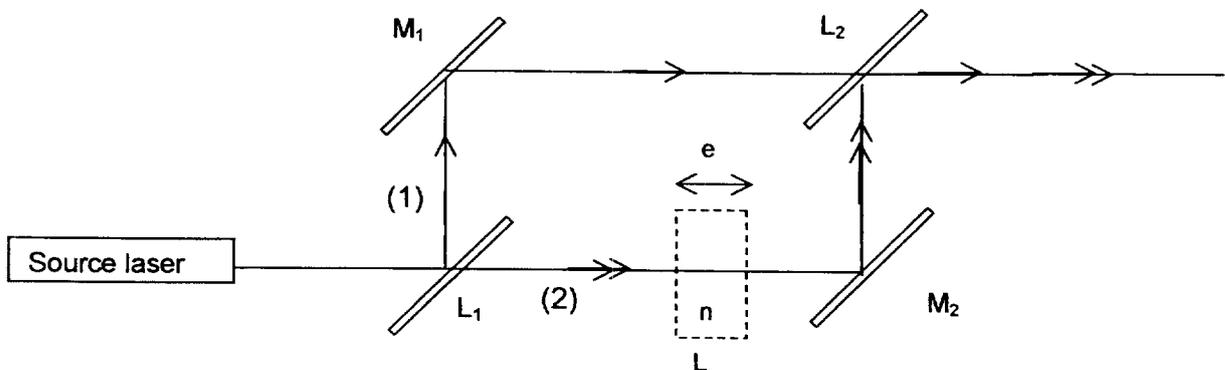
- 2.4. Donner, en fonction des grandeurs  $e$ ,  $d$ ,  $\lambda$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $n_c$  et  $n_o$ , l'expression de la tension  $V_\pi$  qui fait varier le déphasage  $\varphi$  de la valeur  $\pi$ .
- 2.5. Justifier pourquoi cette tension  $V_\pi$  est appelée " tension demi-onde ".
- 2.6. Démontrer que l'intensité  $I$  de la lumière à la sortie de l'analyseur s'écrit :

$$I = \frac{I_0}{2}(1 - \cos \varphi).$$

Justifier l'appellation " modulateur d'intensité " pour l'ensemble étudié.

**C - Modulation d'intensité avec cellule de Pockels associée à un interféromètre Mach-Zehnder (5 points)**

1. Interféromètre de Mach-Zehnder



**Fig 6 : interféromètre de Mach-Zehnder avec lame à faces parallèles**

L'interféromètre de Mach-Zehnder est un interféromètre à deux ondes et à division d'amplitude. Il comporte deux miroirs totalement réfléchissants  $M_1$  et  $M_2$  et deux lames semi-réfléchissantes identiques  $L_1$  et  $L_2$ . Les miroirs et les lames sont orientés à  $45^\circ$  de la direction des rayons.

Un faisceau laser parallèle et de longueur d'onde dans le vide  $\lambda$  est divisé en deux faisceaux (1) et (2) de même intensité par la lame  $L_1$ . L'onde incidente correspondant au faisceau initial a une amplitude  $a_0$  et une intensité  $I_0$ .

Après réflexion sur  $M_1$  et  $M_2$ , les faisceaux interfèrent à la sortie de  $L_2$ .

L'interféromètre est réglé initialement de sorte que les chemins optiques des faisceaux (1) et (2) soient identiques.

On introduit alors sur le trajet du faisceau (2) une lame  $L$  à faces parallèles, d'épaisseur  $e$  et d'indice  $n$ . On suppose que tous les rayons du faisceau (2) arrivent perpendiculairement à la face d'entrée de la lame  $L$ . Les deux vibrations qui interfèrent sont alors déphasées du déphasage  $\varphi$ .

- 1.1. En admettant que les vibrations qui interfèrent ont chacune une amplitude réelle égale à  $\frac{a_0}{2}$ , montrer que l'intensité lumineuse mesurée à la sortie de l'interféromètre s'écrit :

$$I = \frac{I_0}{2}(1 + \cos \varphi).$$

- 1.2. Exprimer le déphasage  $\varphi$  en fonction de  $n$  et  $e$ .

2. Étude générale du modulateur d'intensité lumineuse Mach-Zehnder

La lame L est à présent remplacée par une cellule de Pockels. Le déphasage  $\varphi$  peut être contrôlé par la tension  $V$  appliquée aux bornes de la cellule. Le dispositif équivaut alors à un modulateur d'intensité lumineuse lorsque la tension  $V$  est obtenue par superposition d'une tension continue et d'une tension variable.

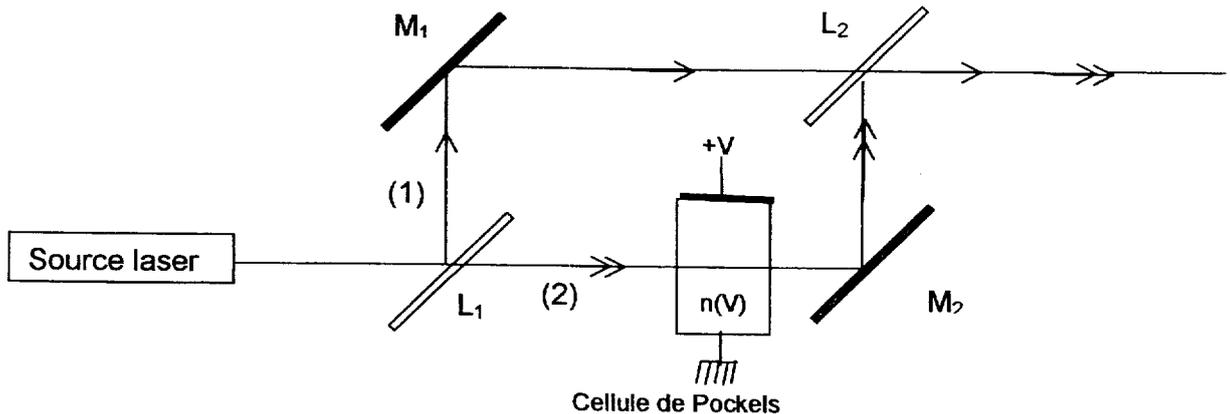


Fig 7 : modulateur d'intensité avec interféromètre de Mach-Zehnder

On note  $I(V)$  l'intensité lumineuse mesurée à la sortie de l'interféromètre, pour une tension appliquée  $V$ .

On pose  $\varphi = \varphi_0 - \frac{\pi V}{V_\pi}$  et on définit la transmittance de l'interféromètre par  $\Gamma(V) = \frac{I(V)}{I_0}$ .

La fonction transmittance  $\Gamma(V)$  s'exprime aussi par :  $\Gamma(V) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\varphi_0 - \frac{\pi V}{V_\pi}\right)$ .

- 2.1. Donner l'expression de la fonction  $\Gamma(V)$  pour  $\varphi_0 = 2\pi$ , puis représenter sur un schéma son allure pour  $V$  évoluant de 0 à  $3V_\pi$ .
- 2.2. Indiquer sur votre schéma l'endroit de la courbe où les variations de  $\Gamma(V)$  peuvent être considérées comme linéaires.  
Pour quelles valeurs de la tension  $V$  cela est-il obtenu ?