



SERVICES CULTURE ÉDITIONS  
RESSOURCES POUR  
L'ÉDUCATION NATIONALE

**Ce document a été numérisé par le CRDP de Bordeaux pour la  
Base Nationale des Sujets d'Examens de l'enseignement professionnel.**

**Campagne 2012**

# BREVET DE TECHNICIEN SUPÉRIEUR GÉNIE OPTIQUE

## Option PHOTONIQUE

### Épreuve de PHYSIQUE APPLIQUÉE

#### Sous-épreuve U42 : PHYSIQUE

SESSION 2012

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 : 12 pages numérotées de 1/12 à 12/12*

**Documents à rendre avec la copie :**

**ANNEXE 1..... page 11/12**

**ANNEXE 2..... page 12/12**

BTS GÉNIE OPTIQUE OPTION PHOTONIQUE	SUJET	SESSION 2012
U 42 : Physique appliquée	Code : GOPHYPH	Page : 1/12

# DISPOSITIF À SOURCE DE PHOTONS INTRIKUÉS EN POLARISATION

---

Le concept d'intrication joue un rôle fondamental dans la théorie quantique. Il trouve aujourd'hui de nombreux développements notamment dans le domaine de la cryptographie quantique.

Tout ce qui transite par les fibres optiques comme le commerce électronique, les transactions bancaires, les messages électroniques, est concerné par cette technique prometteuse de la cryptographie quantique car elle assure des communications sécurisées.

## Présentation du dispositif

La génération de paires de photons intriqués en polarisation se fait via un processus non linéaire de fluorescence paramétrique au sein d'un cristal BBO (beta borate de baryum). Sous l'action d'un photon incident, le cristal émet deux photons dans des directions différentes, l'un à polarisation verticale V, l'autre à polarisation horizontale H, mais chacun ayant une chance sur deux d'avoir l'une ou l'autre de ces polarisations. Lorsque l'on mesure la polarisation de l'un des photons en bout de chaîne, l'autre a systématiquement la polarisation opposée.

Le cristal de BBO est éclairé par une diode laser focalisée sur celui-ci. On collecte les photons en sortie du cristal dans des directions symétriques par rapport au faisceau incident. Ces directions constituent deux voies de mesures qui doivent être rigoureusement identiques.

Le dispositif est représenté sur la **figure 1**, page 3.

**L'étude qui suit est constituée de parties indépendantes**

BTS GÉNIE OPTIQUE OPTION PHOTONIQUE	SUJET	SESSION 2012
U 42 : Physique appliquée	Code : GOPHYPH	Page : 2/12

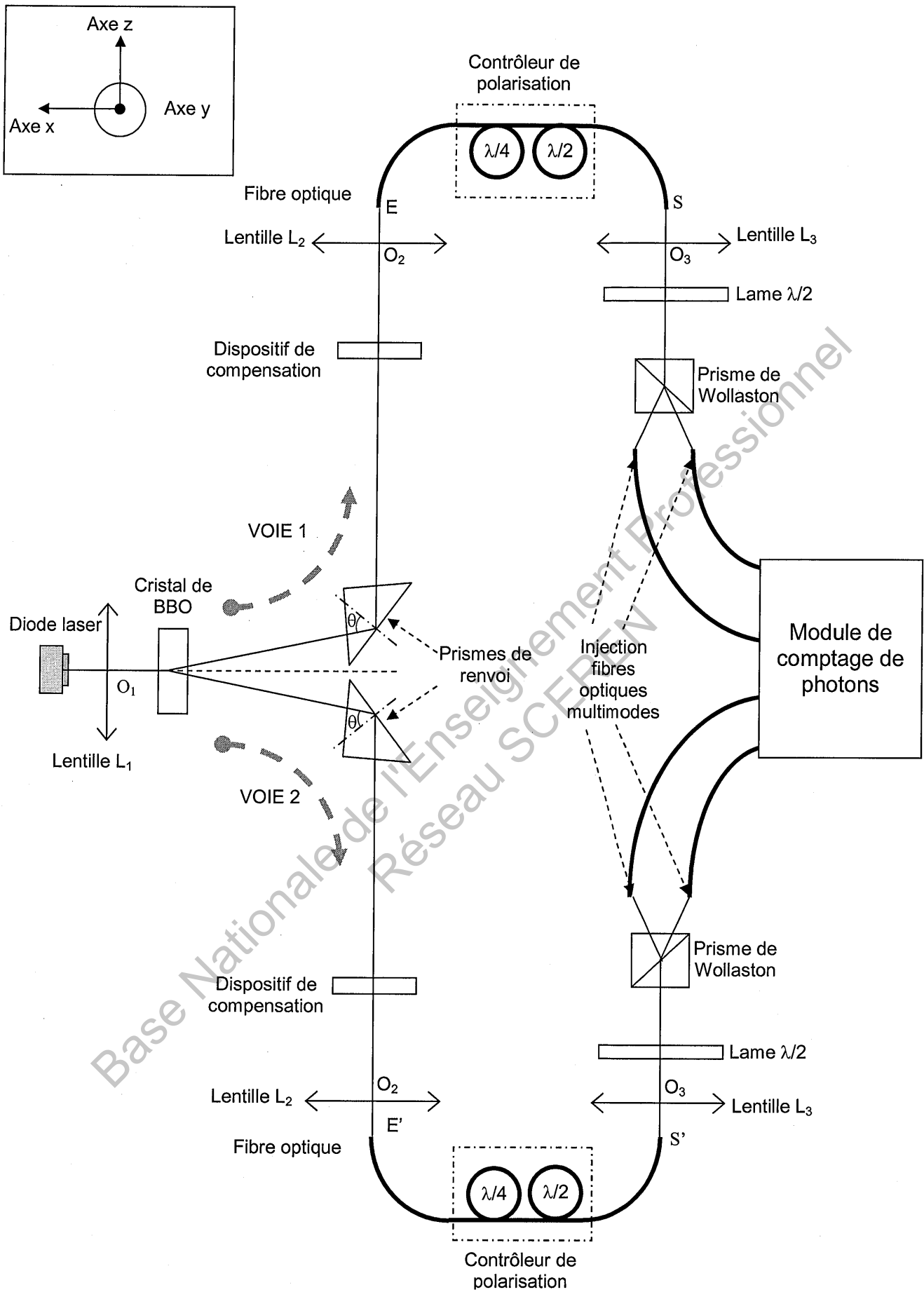


figure 1 : Dispositif vu de dessus, échelle et angles non respectés

## Partie A : Étude de la diode laser et de la lentille de focalisation (4 points)

La diode laser utilisée émet en continu, elle est collimatée par une optique intégrée. Son faisceau gaussien est alors à section circulaire.

Données :

Diode laser collimatée :

- Longueur d'onde dans le vide  $\lambda = 405 \text{ nm}$
- Puissance  $P = 50,0 \text{ mW}$
- Diamètre du faisceau  $1,00 \text{ mm}$  à  $1,00 \text{ m}$  de distance
- Divergence totale  $\alpha = 1,00 \text{ mrad}$
- Vitesse de la lumière dans le vide  $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$
- Constante de Planck  $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$

Faisceau gaussien :

- Variation de la largeur du faisceau :

$$w(z) = w_0 \cdot \left[ 1 + \left( \frac{z}{z_R} \right)^2 \right]^{1/2} \text{ avec } z_R \text{ distance de Rayleigh } z_R = \frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda}$$

- Divergence de la diode laser :  $\alpha = \frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot w_0}$  avec  $w_0$  waist de la diode laser

### 1. Faisceau laser

1.1 Quelle est la couleur du rayonnement émis par la diode laser ?

1.2 Exprimer l'énergie  $E$  d'un photon en fonction des données de l'exercice, puis calculer le nombre de photons  $N$  émis par seconde par la diode laser.

1.3 Calculer le waist  $w_0$  de la diode laser.

1.4 Calculer la distance de Rayleigh  $z_R$ .

### 2. Focalisation du faisceau

La lentille  $L_1$  permet de focaliser le faisceau laser sur le cristal de BBO.

Données :

Lentille mince convergente  $L_1$  :

- Centre optique  $O_1$
- Distance focale de la lentille  $f_1' = 50,0 \text{ mm}$

Relations des faisceaux gaussiens :

-  $z = \overline{OA}$ ,  $A$  position du waist objet et  $z' = \overline{OA'}$ ,  $A'$  position du waist image

-  $z' = f' \cdot \frac{z \cdot (f' + z) + z_R^2}{(f' + z)^2 + z_R^2}$  avec  $z_R$  distance de Rayleigh  $z_R = \frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda}$

-  $\frac{w_0'}{w_0} = \frac{f'}{\sqrt{(f' + z)^2 + z_R^2}}$  avec  $w_0'$  waist image

Le waist objet est situé au foyer objet de la lentille.

2.1 Où se trouve le waist image ?

2.2 Calculer la valeur du waist image  $w_0'$ .

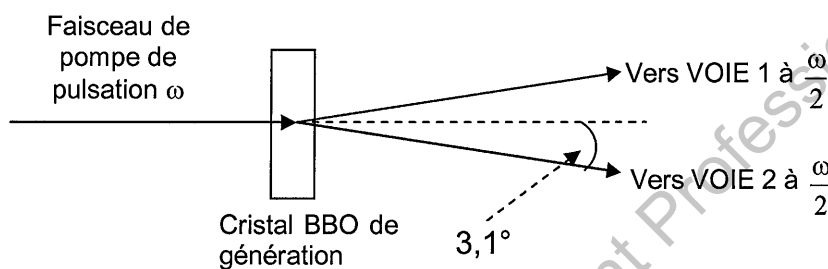
## Partie B : Paires de photons intriqués en polarisation (5 points)

### 1. Principe

La génération de paires de photons intriqués en polarisation se fait via le processus non linéaire de fluorescence paramétrique : le cristal de BBO sous l'action d'un faisceau de pompe permet la conversion d'un photon de ce faisceau de pulsation  $\omega$  en une paire de photons de pulsations  $\omega_1$  et  $\omega_2$  telles que :

$$\omega_1 = \omega_2 = \frac{\omega}{2}$$

De plus une seconde condition, dite d'accord de phase de type II, impose que les photons sont émis dans deux directions d'intrication symétriques par rapport à l'axe de la pompe (**figure 2**).



**figure 2 : Deux directions d'intrication**

On suppose que les directions de polarisation extraordinaire et ordinaire du cristal non linéaire correspondent respectivement à la verticale V et à l'horizontale H. Les deux photons jumeaux d'une paire créés par génération paramétrique ont des polarisations verticale et horizontale.

*Données :*

- Longueur d'onde dans le vide du faisceau de pompe  $\lambda_i = 405 \text{ nm}$
- Vitesse de la lumière dans le vide  $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

1.1 Quelle est la longueur d'onde dans le vide  $\lambda$  de la paire de photons émis par le cristal ?

1.2 La différence entre les indices ordinaire  $n_o$  et extraordinaire  $n_e$  fait que les deux photons jumeaux (H et V) ne se propagent pas à la même vitesse. Donner l'expression de la vitesse du photon V, puis celle du photon H en fonction de c et de l'indice à considérer.

1.3 Le cristal de BBO est uniaxe négatif, comparer les vitesses des photons ordinaire et extraordinaire.

1.4 Dédire des questions précédentes l'expression du décalage temporel  $\Delta t$  entre les photons jumeaux pour un trajet de longueur e dans le cristal.

### 2. Séparation des photons

Les photons intriqués en polarisation générés par le cristal BBO sont dirigés suivant deux voies grâce à des prismes de renvoi rigoureusement identiques. On s'intéresse à l'un de ces prismes.

Le prisme est isocèle à angle droit, il est en verre BK7. Le graphique de la **figure 3** donne la variation de l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde.

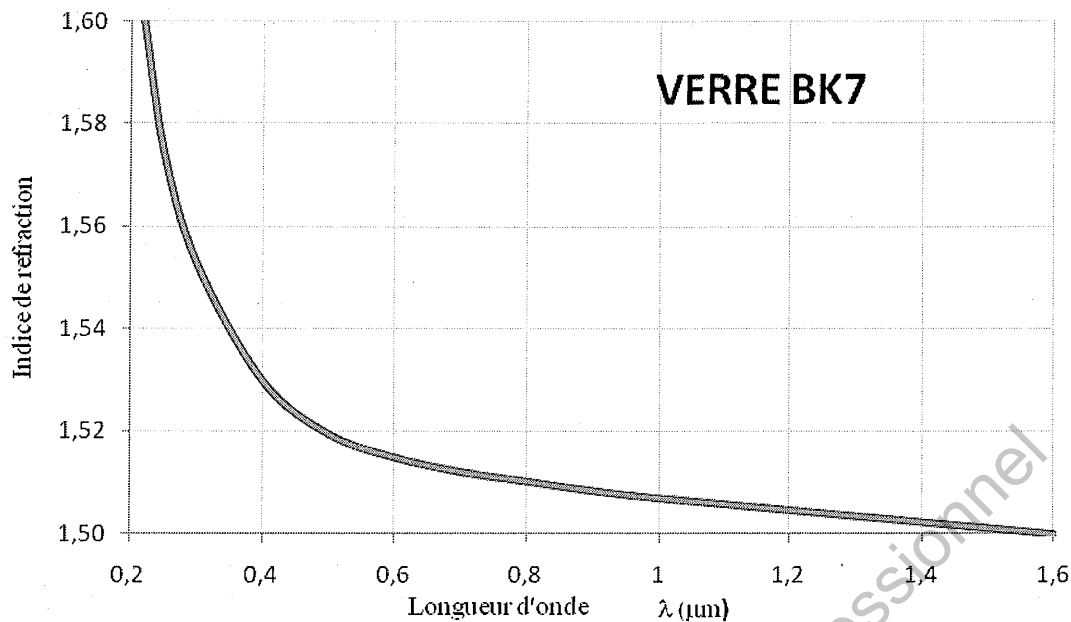


figure 3

2.1 Pour la longueur d'onde  $\lambda_i = 405 \text{ nm}$  et pour  $\lambda = 810 \text{ nm}$ , relever sur la **figure 3** les valeurs des indices correspondant, respectivement notés  $n_i$  et  $n$ .

2.2 On considère la longueur d'onde  $\lambda = 810 \text{ nm}$ . À partir de quelle valeur limite  $\theta_L$  de l'angle d'incidence sur la face hypoténuse du prisme a-t-on réflexion totale ?

2.3 Sur la face d'entrée du prisme le faisceau incident est sous incidence normale, montrer que le faisceau est totalement réfléchi sur l'hypoténuse. Montrer alors que le rayon émerge du prisme perpendiculairement au rayon incident.

### 3. Compensation du décalage temporel

Pour compenser le décalage temporel  $\Delta t$  entre les photons jumeaux H et V, on place sur chaque voie un dispositif de compensation. Ce dispositif est constitué d'une lame demi-onde et d'un cristal de BBO de caractéristiques physiques identiques au cristal de BBO de génération (**figure 4**).

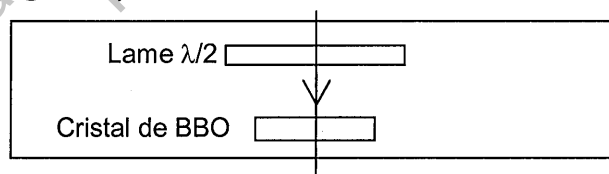


figure 4 : Dispositif de compensation

On suppose que le photon V est sur la voie 1 et que le photon H est sur la voie 2.

*Données :*

Cristal de BBO de compensation :

- Lignes neutres suivant la verticale et l'horizontale

Lame demi-onde :

- Axe rapide à  $45^\circ$  des axes du cristal de BBO de compensation

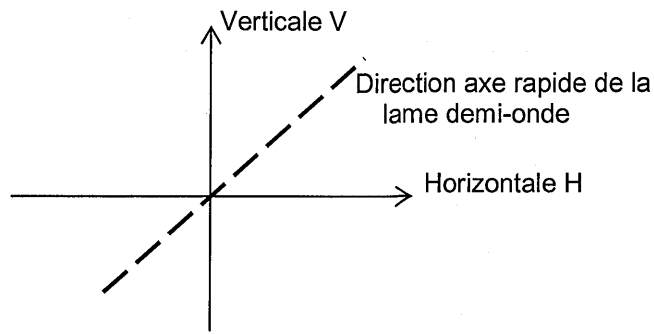


figure 5 : Directions des axes du compensateur

3.1 **Sur l'annexe 1, page 11 à rendre avec la copie**, compléter le **document 1** en indiquant les directions de polarisation du photon considéré après la lame demi-onde puis après le cristal de BBO de compensation.

3.2 **Sur l'annexe 1, page 11 à rendre avec la copie**, compléter le **document 2** en indiquant les directions de polarisation du photon considéré après la lame demi-onde puis après le cristal de BBO de compensation.

### Partie C : Parcours des photons (5,5 points)

On cherche à avoir deux longues voies de mesures. C'est le rôle des fibres optiques. L'injection dans une fibre est réalisée à l'aide d'une lentille  $L_2$  de distance focale  $f_2'$  et d'ouverture numérique  $ON_2$ . Cette lentille permet d'imager toute la section du faisceau dans la fibre.

Données :

Fibre optique :

- Diamètre du cœur  $d = 2a = 5,60 \mu\text{m}$
- Ouverture numérique  $ON = 0,100$

Paramètre V :

- $V = a \frac{2\pi}{\lambda} ON$
- Condition pour que la fibre soit monomode  $V < 2,405$

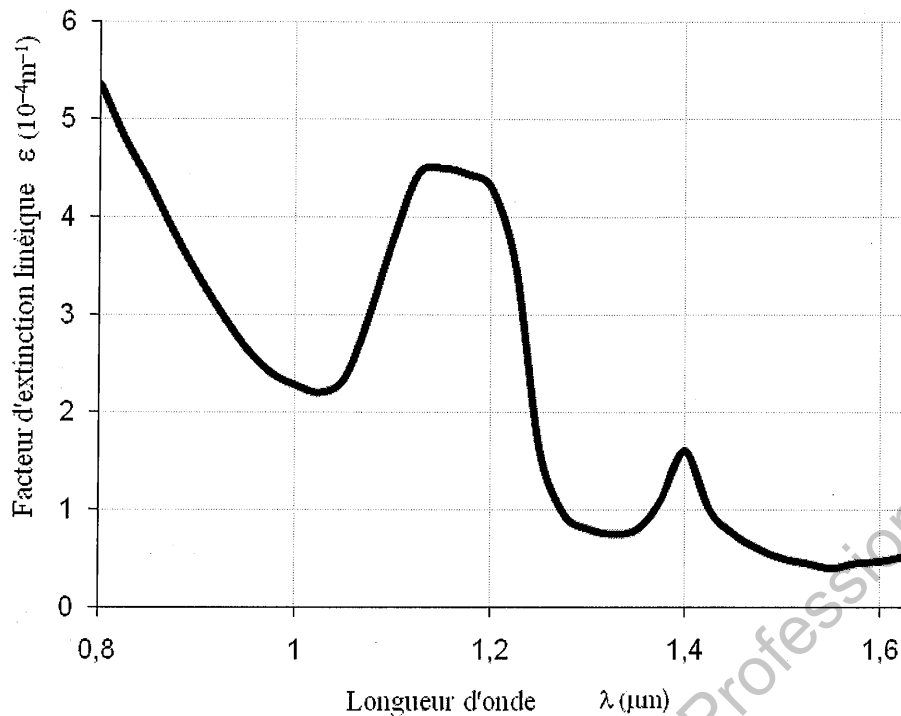
Lentille  $L_2$  :

- Distance focale  $f_2' = 15,0 \text{ mm}$
- Ouverture numérique  $ON_2$

Longueur d'onde du faisceau :

- $\lambda = 810 \text{ nm}$





**figure 6 : Facteur d'extinction**

## 1. Fibre optique

- 1.1 Donner le nom usuel du matériau utilisé pour la fabrication des fibres optiques employées en télécommunications.
- 1.2 Expliquer le principe de fonctionnement d'une fibre optique à saut d'indice fabriquée avec ce type de matériau. On utilisera pour cela une vue en coupe longitudinale contenant l'axe optique de la fibre indiquant ses différentes régions.
- 1.3 Définir l'ouverture numérique de la fibre.
- 1.4 Relever la valeur du facteur d'extinction linéique  $\varepsilon$  pour la longueur d'onde  $\lambda = 810 \text{ nm}$  (figure 6).

## 2. Injection dans la fibre

- 2.1 On suppose que le faisceau arrivant sur la lentille  $L_2$  est cylindrique. À quelle distance doit-on placer le centre de la lentille  $O_2$  de l'entrée de la fibre optique  $E$  ?
- 2.2 Quelle condition doit vérifier l'ouverture numérique de la lentille  $ON_2$  par rapport à l'ouverture numérique de la fibre optique  $ON$  pour optimiser l'injection ?
- 2.3 Calculer l'angle d'acceptance  $\theta_a$  de la fibre optique.

## 3. Propagation

- 3.1 Calculer  $V$ .
- 3.2 Montrer que la fibre est bien monomode pour la longueur d'onde considérée.

## 4. Compensation de la biréfringence naturelle de la fibre

La fibre optique est naturellement biréfringente. Pour conserver l'état de polarisation des photons après leur propagation dans la fibre, on compense cet effet parasite par un dispositif réalisant les fonctions de lame quart d'onde et de lame demi-onde. Ces lames correctement orientées permettent successivement de transformer la

polarisation elliptique en sortie de fibre en polarisation rectiligne, puis de ramener cette polarisation rectiligne dans sa direction initiale.

4.1 Quels déphasages introduisent respectivement les lames quart d'onde et demi-onde ?

4.2 Comment doivent être orientées les lignes neutres de la lame quart d'onde pour qu'elle puisse transformer la polarisation elliptique en polarisation rectiligne ?

## Partie D : États de polarisation H et V (5,5 points)

La projection de l'état de polarisation pour les mesures de corrélation, à partir des deux voies se fait en espace libre. Sur chaque voie, le faisceau de longueur d'onde  $\lambda$  est collimaté en sortie de fibre, puis envoyé sur une lame demi-onde et ensuite sur un prisme de Wollaston. Dans cette partie on ne s'intéresse qu'à la voie 1.

### 1. Lame demi-onde

L'orientation de la lame demi-onde détermine la base de mesure de la polarisation pour le détecteur. On suppose que la polarisation du photon arrivant sur la lame est horizontale H ou verticale V.

1.1 Comment doit-on orienter cette lame pour que la polarisation du photon horizontale H en entrée devienne en sortie verticale V ?

1.2 Comment doit-on orienter cette lame pour que la polarisation du photon en entrée verticale V devienne en sortie horizontale H ?

### 2. Prisme de Wollaston

Pour séparer les photons V et H, on utilise un prisme de Wollaston formé de deux prismes droits accolés et taillés dans un même milieu uniaxe positif d'indice ordinaire  $N_o$  et d'indice extraordinaire  $N_e$ . Les axes optiques de ces prismes sont indiqués **figure 7**. L'axe optique du prisme d'entrée est selon Ox et celui du prisme de sortie selon Oy.

Le faisceau arrivant sur le premier prisme n'est pas dévié et donne naissance en pénétrant dans le second prisme à deux faisceaux. Ces faisceaux font entre eux un angle  $\gamma$  en sortie du second prisme.

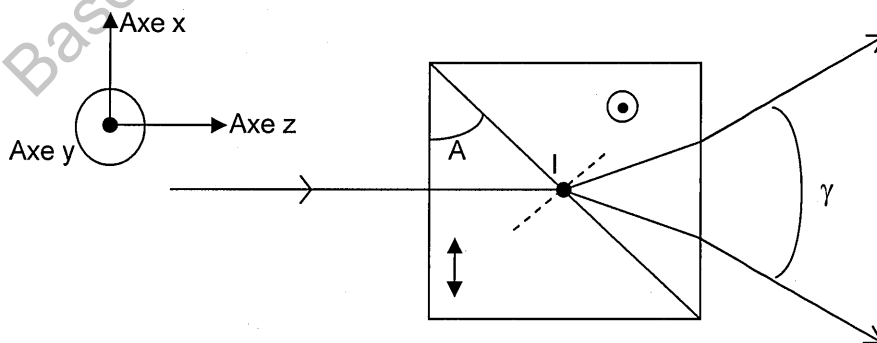


figure 7 : Prisme de Wollaston vu de dessus

Données :

- Angle  $A = 45,0^\circ$
- $N_e > N_o$  et  $N_e - N_o = 0,175$  pour la longueur d'onde considérée

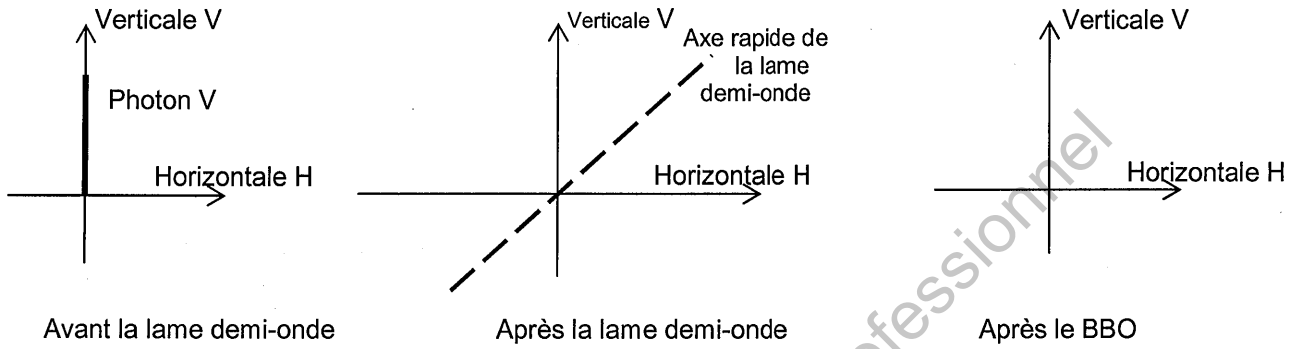
- 2.1 Donner la définition de l'axe optique d'un cristal uniaxe.
- 2.2 Donner la direction des axes propres de polarisation de chacun des prismes et les indices correspondants ( $N_e$  ou  $N_o$ ).
- 2.3 On cherche la direction des rayons lumineux dans le deuxième prisme et, pour cela, on applique la construction d'Huygens en I. **Sur l'annexe 2, page 12 à rendre avec la copie**, compléter les **documents 3 et 4**, en traçant les rayons lumineux réfractés et en faisant apparaître la méthode de construction (les surfaces d'onde sont représentées en pointillés).
- 2.4 Sur **l'annexe 2 document 5** les rayons lumineux sont représentés, indiquer l'état de polarisation correspondant V ou H.  
On montre que  $\gamma = 2 (N_e - N_o) \tan (A)$  avec  $\gamma$  en radians.
- 2.5 Calculer  $\gamma$  en degrés.

Base Nationale de l'Enseignement Professionnel  
Réseau SCEREN

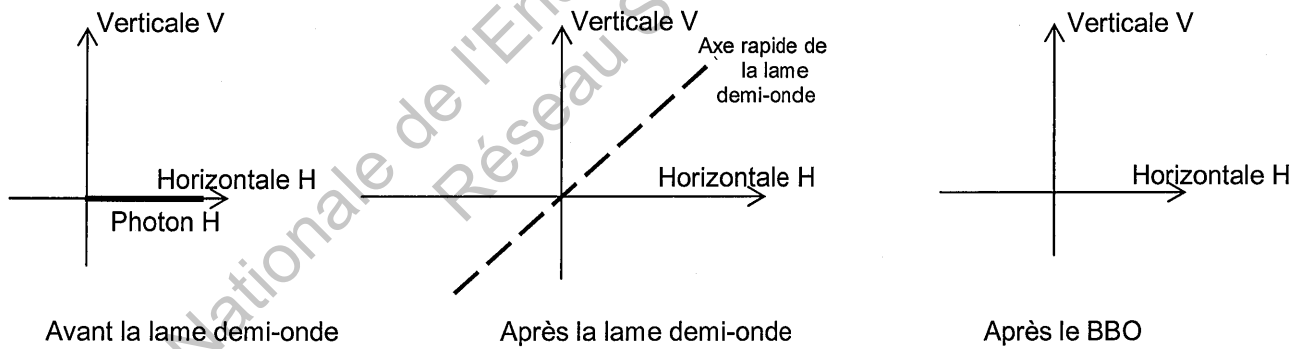
# Annexe 1

à rendre avec la copie

## Document 1 : Photon V voie 1



## Document 2 : Photon H voie 2

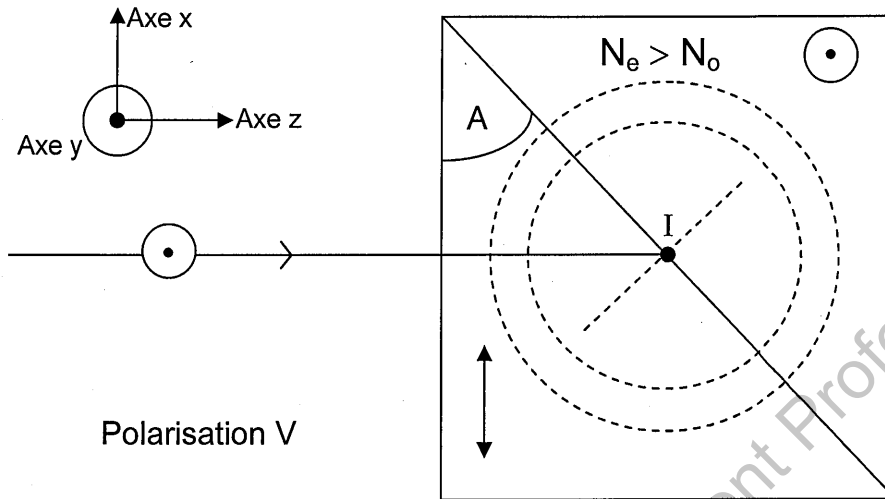


## Annexe 2 à rendre avec la copie

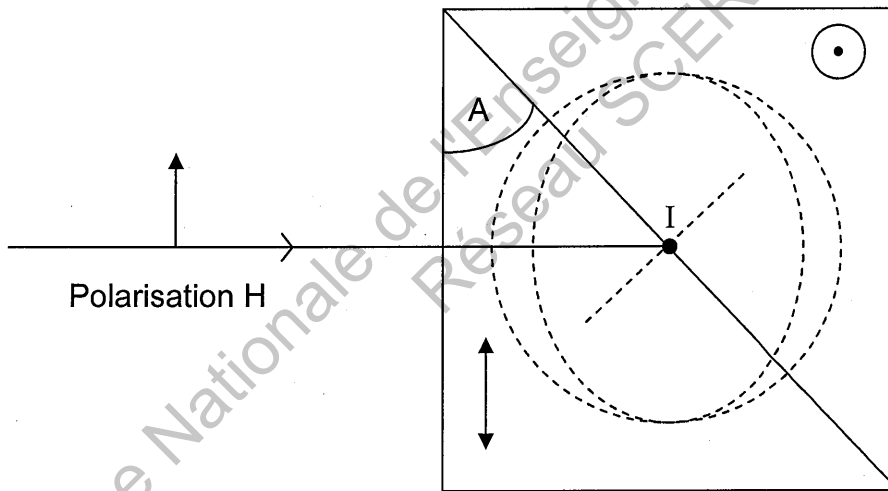
Prisme de Wollaston vu de dessus (les documents ne sont pas à l'échelle)

Les surfaces des vitesses sont représentées par des pointillés

**Document 3**



**Document 4**



**Document 5**

