

**CONTROLE TERMINAL – SESSSION 1**

**Durée : 2h 00 min**

***Pas de documents, pas de téléphone portable. Calculatrice autorisée  
prenez soin de justifier vos réponses et de respecter les notations employées (cela sera pris en compte dans la notation)***

NOM :

**Problème : Utilisation d'une fibre optique de chalcogénure**

**21 points**

**Partie 0 : Questions préliminaires : source étudiée**

**1.75 points**

chapitres de cours associés : 0, 1, 8

Dans ce problème, nous allons nous intéresser à l'utilisation d'une fibre en verre chalcogénure (par exemple  $As_{38}Se_{62}$  obtenu par mélange d'Arsenic et de Sélénium). Ce matériau a comme atout d'être quasiment transparent au-dessus de  $1.5 \mu m$ . De tels verres peuvent être synthétisés et fibrés à Dijon au sein du laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne et plusieurs startups françaises commercialisent désormais de telles fibres (comme par exemple la société SelenOptics <sup>1</sup>, résultant de travaux de recherche de l'Université de Rennes). L'indice  $n$  de ce matériau est élevé et vaut  $n = 3$ . Si besoin, la valeur de la vitesse de lumière dans le vide  $c$  est  $3.10^8$  m/s.

Nous considérerons dans le cadre de ce problème un éclairage délivré par un laser émettant à la longueur d'onde  $\lambda$  de  $2.0 \mu m$ . Ce genre de laser est développé au sein de laboratoires comme celui de Dijon ou bien dans différentes start-up françaises (par exemple Novae lasers <sup>2</sup>, résultant de recherches de l'Université de Limoges).

**P0.1) Dans quelle région du spectre électromagnétique émet ce laser ?** 0.5 pt

- Visible     Infrarouge     UV     Rayons X     THz

**P0.2) Donnez la fréquence  $\nu$  de la lumière émise par le laser ?** 0.5 pt

$\nu =$	(expression analytique) =	(valeur numérique)
---------	---------------------------	--------------------

**P0.3) On néglige totalement l'absorption du matériau. Quelle conséquence cela a-t-il sur la permittivité diélectrique du matériau  $\epsilon$  ?** 0.25 pt

--

**P0.4) Les verres de chalcogénure ne sont pas utilisés pour les télécommunications optiques longues distances. Quel est le matériau qui est utilisé dans les fibres les plus performantes pour les télécommunications modernes ?** 0.5 pt

--

<sup>1</sup> <http://www.selenoptics.com/>  
<sup>2</sup> <https://www.novae-laser.com/>

**Partie 1 : Injection efficace de la lumière dans la fibre optique :**

**2.75 points**

chapitres de cours associés : 6

Dans cette première partie, nous nous intéressons à l'injection de la lumière laser à l'intérieur de la fibre optique. On considère que la lumière émise par le laser est décrite en première approximation par une onde plane monochromatique <sup>3</sup>. Le faisceau laser est focalisé par un dispositif optique de type microscope qui permet d'illuminer le cœur de la fibre optique dont le diamètre  $d$  est  $8 \mu\text{m}$ . On assimile ici le microscope à une lentille idéale qui est totalement transparente. Le diamètre de cette lentille est noté  $D$  et sa focale  $f'$ . La distance d'un point de la lentille par rapport à l'axe optique est notée  $r$  et on notera  $\text{cerc}(r/D)$  la fonction définissant un disque de diamètre  $D$ .

**P1.1)** En optique de Fourier, quelle est la fonction de transmission  $f(r)$  qui peut être associée à la lentille considérée ? 0.5 pt

$f(r) =$

**P1.2)** Comment s'appelle la tache caractéristique qui est obtenue au point de focalisation de la lentille ? Doit-t-on l'assimiler à une aberration géométrique ? Quelle fonction mathématique particulière cette tache fait-elle intervenir ? 0.75 pt

*La forme caractéristique obtenue au point de focalisation est appelée*  
*Elle est assimilable à une aberration géométrique :  OUI  NON*  
*La fonction mathématique particulière intervenant dans sa définition est :*

**P1.3)** De manière générale, comment s'appelle en optique ondulatoire l'image d'un point par un système optique ? Quelle quantité peut-on y associer lorsqu'on raisonne dans le domaine des fréquences spatiales ? 0.5 pt

*L'image d'un point par un système optique est*  
*Lorsqu'on raisonne dans le domaine des fréquences spatiales, on considère*

**P1.4)** Donnez l'expression analytique du diamètre  $d_f$  caractéristique de la tache évoquée en **P1.2)** en fonction de  $\lambda$ ,  $D$  et  $f'$  0.5 pt

$d_f =$   
*expression littérale*

**P1.5)** Quelle doit être l'ouverture numérique  $ON$  de la lentille pour que la lumière soit injectée efficacement dans la fibre optique ? On considérera ici pour simplifier que l'injection est satisfaisante si  $d_f = d$ . On rappelle que l'ouverture numérique peut être approximée par  $ON = D / 2f'$ . 0.5 pt

$ON =$   $=$   
*expression littérale en fonction de ON* *résultat numérique*

<sup>3</sup> En réalité, il serait plus précis de considérer un profil de faisceau gaussien.

**Partie 2 : Réflexion air/chalcogénure et traitement anti reflet :**

**7.5 points**

chapitres de cours associés : 2,4,8

Nous nous intéressons ici tout d'abord à la réflexion/réfraction qui peut exister au niveau de l'interface entre l'air et le verre de chalcogénure.

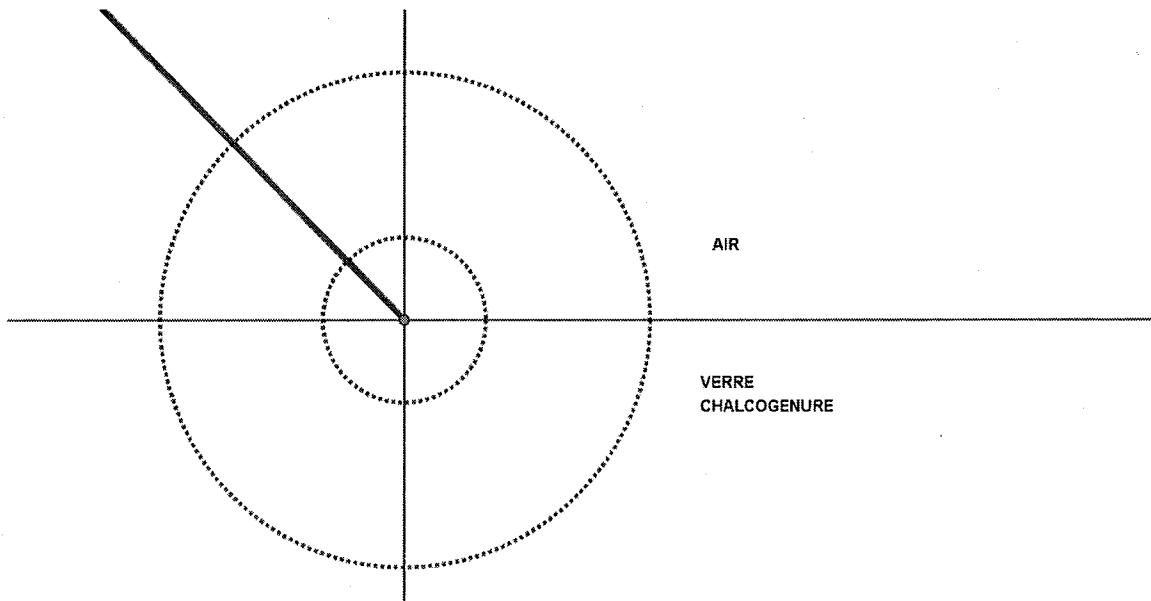
**A – Tracé des rayons réfractés**

**2 points**

**P2A.1)** On souhaite tracer le rayon transmis par la méthode graphique de Huygens. Quelle surface caractéristique cette méthode met-elle en jeu ? 0.25 pt

*La méthode de Huygens met en jeu la surface des*

**P2A.2)** On a tracé sur la figure ci-dessous en pointillés ces deux surfaces. Identifiez celle liée au verre de chalcogénure et celle liée à l'air. 0.25 pt



**P2A.3)** Tracez les rayons transmis et réfléchi. Vous laisserez apparents les traits de construction. 1.5 pt

**B – Réflexions sur les faces de fibre**

**2.5 points**

Nous considérons maintenant le cas où le rayon incident arrive en incidence normale sur la face d'entrée de la fibre optique.

**P2B.1)** Quel est le coefficient de réflexion (en intensité)  $R_1$  sur la face d'entrée de la fibre ? Quel est le coefficient de réflexion  $R_2$  sur la face de sortie de la fibre ? 0.75 pt

	$R_1 =$	<i>expression littérale</i>
$R_1 =$	<i>résultat numérique</i>	$R_2 =$
		<i>résultat numérique</i>

**P2B.2)** Quelle est la précaution à prendre expérimentalement vis-à-vis du laser utilisé ? Quel dispositif optique permet de régler le problème ? (si vous avez oublié le nom du dispositif à utiliser, vous pouvez donner à défaut le principe physique sur lequel il se base). 0.5 pt

*Précaution à prendre vis-à-vis du laser :*

*Dispositif optique à utiliser (ou principe physique utilisé dans ce dispositif) :*

**P2B.3)** Si on considère à la fois la présence de réflexion forte sur la face d'entrée et sur la face de sortie, de quel dispositif peut-on rapprocher cette fibre optique ? Si on considère une fibre de longueur  $L$  de 1 m, quel est alors l'intervalle spectral libre qui peut être associé ? 0.75 pt

*Dispositif similaire :*

*Intervalle spectral libre :* *(expression analytique)*

*(valeur numérique)*

**P2B.4)** Il est possible d'inclure dans une fibre optique des éléments chimiques spécifiques, appelés dopants, qui permettent de générer potentiellement du gain optique tout au long de la fibre. Dans ce cas, que peut devenir la fibre passive quand le gain apporté devient supérieur aux pertes ? 0.5 pt

**C – Traitement anti-reflet**

**3.5 points**

Nous souhaitons éliminer le reflet sur la face d'entrée. Pour cela, un traitement couche mince sera appliqué sur cette face. On considère alors une couche mince d'indice  $n_c$  sur le substrat de chalcogénure, le milieu incident étant de l'air.

On rappelle que les champs électromagnétique et magnétique au niveau de l'interface air-couche mince peuvent être exprimés à partir des champs au niveau de l'interface couche-mince / chalcogénure grâce à une matrice  $M$  :

$$\begin{pmatrix} E_I \\ H_I \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} E_{II} \\ H_{II} \end{pmatrix}$$

dont les éléments sont

$$M = \begin{pmatrix} \cos(k_0 h) & -i \sin(k_0 h) / Y_C \\ -i \sin(k_0 h) Y_C & \cos(k_0 h) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix}$$

avec  $k_0 = 2\pi / \lambda$ ,  $h$  la différence de marche optique entre les deux interfaces considérées et  $Y_C$  l'admittance de la couche mince donnée pour la situation étudiée par :

$$Y_C = Y_0 n_c \cos(\theta) ,$$

avec  $Y_0$  l'admittance du vide et  $\theta$  l'angle du faisceau par rapport à la normale dans le milieu.

**P2C.1)** On considère qu'on a une couche mince quart d'onde et que l'incidence est normale. Comment alors se simplifie la matrice  $M$  ? 1 pt

$M =$

Le coefficient de réflexion de l'empilement est donné par :

$$r = \frac{Y_i m_{11} + Y_i Y_s m_{12} - m_{21} - Y_s m_{22}}{Y_i m_{11} + Y_i Y_s m_{12} + m_{21} + Y_s m_{22}}$$

Avec  $Y_i$  et  $Y_s$  étant respectivement les admittances de l'air et du substrat de chalcogénure et  $m_{ij}$  les valeurs de  $M_T$ .

**P2C.2)** Exprimez  $r$ , avec les hypothèses précédemment réalisées sur  $M$ , en fonction des indices optiques impliqués  $n_c, n$  et 1. 1 pt

$r =$

**P2C.3)** Déduisez de  $r$  la condition sur l'indice  $n_c$  qui doit être remplie pour obtenir un empilement anti-reflet idéal ? 0.75 pt

$n_c =$  \_\_\_\_\_ (expression littérale) = \_\_\_\_\_ (valeur numérique)

**P2C.3)** Est-ce que le même traitement peut être utilisé sur la face de sortie de la fibre pour éviter une réflexion parasite de la lumière en provenance de la fibre ? 0.25 pt

OUI  NON

**P2C.4)** On suppose qu'on dispose du matériau ad-hoc et que la couche idéale a été déposée sur la face d'entrée. Plutôt que de travailler à  $2 \mu\text{m}$ , on cherche à tester la fibre aux longueurs d'onde des lasers Nd-YAG (autour de  $1 \mu\text{m}$ ), que devient l'efficacité du traitement anti-reflet ? (on néglige les changements d'indice optique des différents matériaux impliqués). Justifiez votre réponse. 0.5 pt

Le traitement reste relativement adapté  Le traitement devient inadapté

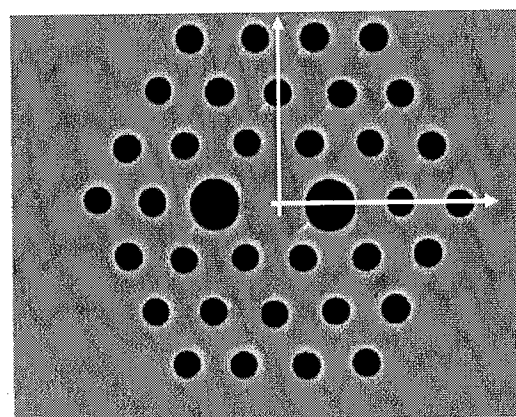
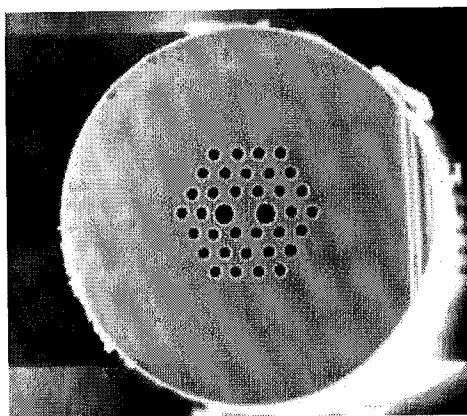
Raison = \_\_\_\_\_

**Partie 3 : Propriétés de biréfringence de la fibre**

**3.5 points**

chapitre de cours associé : 7

Les derniers progrès de la fabrication des fibres optiques permettent de créer une structure de trous d'air entourant le cœur de la fibre optique. Si cette structure est asymétrique comme c'est le cas dans pour la fibre de chalcogénure présentée ci-dessous, la fibre optique se comporte comme un matériau anisotrope et présente une biréfringence. La lumière envoyée au sein de la fibre verra donc un indice différent suivant que sa polarisation est orientée horizontalement ou bien verticalement (ces deux directions correspondent aux axes neutres de la fibre). L'axe rapide sera l'axe horizontal et l'axe lent est l'axe vertical. La biréfringence de la fibre ici est relativement faible :  $\Delta n = 10^{-4}$  à la longueur d'onde de travail considérée.



Détails de la structure d'une fibre optique de chalcogénure dotée d'une microstructuration <sup>4</sup>

<sup>4</sup> Chalcogenide-glass polarization-maintaining photonic crystal fiber for mid-infrared supercontinuum generation, by A N Ghosh, M Meneghetti, C R Petersen, O Bang, L Brilland, S Venck, J Troles, J M Dudley and T Sylvestre, J. Phys. Photonics 1 044003

**P3.1)** On considère une polarisation rectiligne de la lumière incidence. Exprimez le vecteur de Jones  $\vec{J}_\theta$  qui peut être associé à cette polarisation dans le cas où la polarisation de la lumière fait un angle  $\theta$  avec l'horizontale. Que devient ce résultat lorsque la polarisation est rectiligne à 45° ? 0.5 pt

$\vec{J}_\theta =$   $\vec{J}_{45^\circ} =$

**P3.2)** Dans le cas plus général, la polarisation observée en sortie devient : 0.25 pt

linéaire à 45°     linéaire verticale     linéaire horizontale     circulaire     elliptique

**P3.3)** Exprimez le déphasage  $\Delta\varphi$  apparaissant entre les composantes horizontale et verticale de polarisation après une propagation dans une fibre de longueur  $L$  : 0.5 pt

$\Delta\varphi =$

On considère le cas particulier où le tronçon de fibre considéré a une longueur  $L$  de 2.5 cm

**P3.4)** Quelle est la valeur du déphasage introduit ? A quel type de lame d'onde le court morceau de fibre s'apparente-t-il ? 0.5 pt

$\Delta\varphi =$   
*Le segment de fibre se comporte comme*

Nous rappelons l'expression générale de la matrice de Jones caractéristique d'une lame de phase constituée d'un matériau anisotrope uniaxe de biréfringence  $\Delta n$  et d'épaisseur  $L$  dont l'orientation de l'axe rapide fait un angle  $\alpha$  avec l'horizontale et dont le déphasage introduit est  $\Delta\varphi$  :

$$M_{WP} = \begin{pmatrix} \cos^2 \alpha + e^{-i\Delta\varphi} \sin^2 \alpha & (1 - e^{-i\Delta\varphi}) \cos \alpha \sin \alpha \\ (1 - e^{-i\Delta\varphi}) \cos \alpha \sin \alpha & \sin^2 \alpha + e^{-i\Delta\varphi} \cos^2 \alpha \end{pmatrix}$$

**P3.5)** Comment peut-on simplifier cette matrice dans le cas que nous considérons ici ? (c'est-à-dire  $\alpha = 0$ ) 0.5 pt

$M_{WP} =$

**P3.6)** Que devient cette matrice quand on prend en compte la valeur particulière du déphasage trouvé dans la question P3.4 ? 0.5 pt

$M_{WP} =$

P3.7) Calculez le vecteur de Jones pour la polarisation de sortie, en supposant que la polarisation initiale est rectiligne à 45°. Quel type de polarisation obtient-t-on ?

0.75 pt

$$\vec{J}_{out,45^\circ} =$$

La polarisation résultante est :

**Partie 4 : Diffraction par un fil**

**3.25 points**

chapitre de cours associé : 5

Nous considérons maintenant une fibre chalcogénure plus classique (i.e. sans microstructure) utilisée pour déporter le faisceau laser et nous oublions les effets de polarisation. La sortie de la fibre est considérée comme ponctuelle et est placée au foyer d'une lentille. Le faisceau alors obtenu peut être, en première approximation, considéré comme une onde plane. Il est alors utilisé pour éclairer un fil totalement opaque d'une largeur  $l$  de 100  $\mu\text{m}$  (ces dimensions sont assez typiques de celles d'un cheveu). Le fil est orienté verticalement et est considéré comme infini suivant cette direction.

Les coordonnées transverses au niveau de l'objet sont notées  $x$  et  $y$  ( $x$  horizontal,  $y$  vertical) La figure de diffraction est alors enregistrée à une distance  $z_0$  de l'objet. Les coordonnées associées à l'observation sont  $x'$  et  $y'$ .

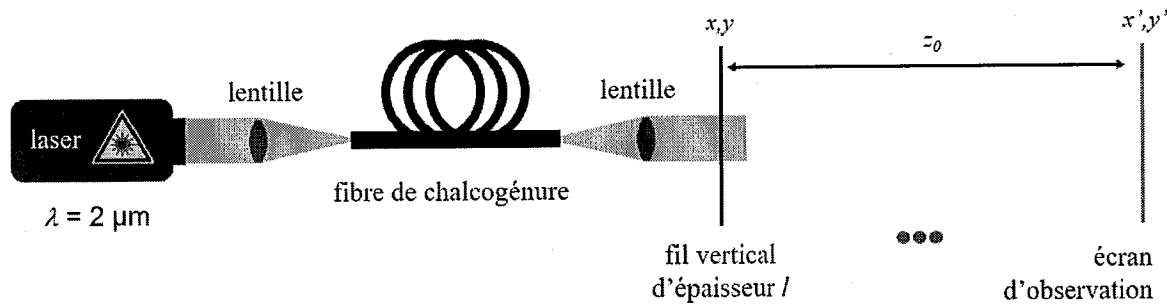


Schéma du montage utilisé

P4.1) Ecrire la fonction de transmission  $f_F(x,y)$  (i.e. la transparence pupillaire) qui peut être associée au fil considéré. On pourra pour cela utiliser la fonction porte  $\Pi$ . 0.5 pt

$$f_F(x,y) =$$

*expression littérale*

Il est possible de montrer que la figure de diffraction obtenue à partir d'un fil est identique, hors de l'image géométrique, à l'image de diffraction d'une fente.

P4.2) Comment s'appelle ce principe qui permet de confondre figure de diffraction de deux objets complémentaires ? 0.25 pt

Dans toute la suite de l'exercice, nous nous intéresserons donc, pour simplifier, à la figure de diffraction d'une fente de largeur  $l$ .

P4.3) Rappelez les deux régimes de diffraction usuellement distingués. Quel est le critère pour savoir dans quel régime on peut se placer ? (Rappelez la formule de ce critère) 0.5 pt

P4.4) On observe la figure de diffraction à une distance  $z_0$  de 0.5 m. Dans quel régime de diffraction se situe-t-on ? 0.25 pt

P4.5) Dans le cas général, considérons une ouverture de transparence pupillaire  $f(x,y)$  illuminée par une onde plane. Quelle est l'expression générale de l'intensité diffractée  $I(x',y')$  observée à grande distance  $z_0$  de l'objet ? (le résultat sera donné à un coefficient multiplicateur près). On pourra noter  $F$  la transformée de Fourier de  $f$ . 0.5 pt

$I(x',y') =$

P4.6) Appliquez cette formule au cas considéré (fente de largeur  $l$ ) pour en déduire la figure de diffraction observée à une distance  $z_0$ . 1 pt

On rappelle que  $\Pi(t) \xrightarrow{TF} \text{sinc}\left(\frac{\omega}{2}\right)$  avec sinc la fonction sinus cardinal.

$I(x',y') =$

P4.7) Déduisez-en la position des minima d'intensité  $x'_{min}$  en fonction des paramètres du système ( $z_0, \lambda, a$ ). 0.5 pt

$x'_{min} =$

P4.8) Si vous pouviez choisir entre votre propre œil et une caméra CCD pour détecter la position des minima dans le cadre de cette expérience, quelle solution aurait votre préférence ? 0.25 pt

œil     caméra

### **Partie 5 : Diffraction par un réseau de diffraction**

**2.25 points**

chapitre de cours associé : 4

Dans cette dernière partie, on remplace le fil unique par un réseau de diffraction composé de traits régulièrement espacés. Ce réseau est éclairé en incidence normale. Le nombre de traits par mm est de 200.

P5.1) Donnez le pas du réseau  $\Lambda$ . 0.25 pt

$\Lambda =$



**P5.2)** Donnez la loi générale des réseaux. Comment se simplifie-t-elle dans le cas que nous étudions ici ? 0.5 pt

*Loi générale des réseaux :*

*Dans le cas présent :*

**P5.3)** Calculez l'angle obtenu pour le premier ordre de diffraction. 0.5 pt

*Angle obtenu pour le premier ordre de diffraction :*

**P5.4)** Combien de taches de diffraction va-t-on pouvoir observer ? 0.25 pt

*Nombre de taches de diffraction observées :*

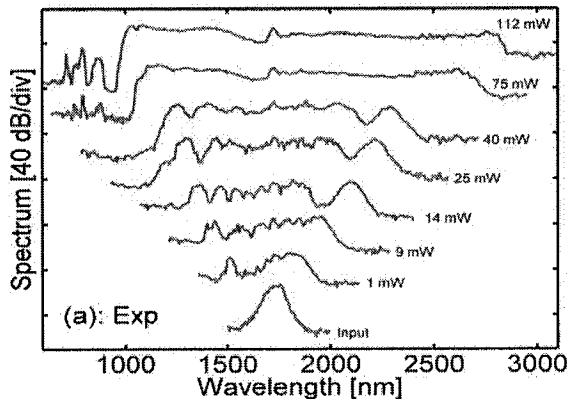
Lors de sa propagation dans la fibre optique, si la puissance optique est forte, le rayonnement laser va en fait générer de nouvelles longueurs d'ondes grâce à la non-linéarité. Il va se former un continuum de fréquences optiques que l'on va pouvoir analyser grâce au réseau de diffraction. Les chercheurs de Dijon (notamment Bertrand Kibler en collaboration avec le groupe verre de F. Smektala) ont ainsi pu démontrer des supercontinuum extrêmement larges.

**P5.5)** Rappelez la définition mathématique de la dispersion angulaire  $D_\theta$  d'un réseau. 0.25 pt

$D_\theta =$

Lorsque la puissance est augmentée, les supercontinuum générés sont tellement larges qu'ils couvrent alors plus d'une octave. L'octave est un terme bien connu en musique qui désigne un rapport de 2 entre la fréquence la plus haute et la fréquence la plus faible. Autrement dit, le spectre optique des supercontinuum a une longueur d'onde la plus basse qui est plus de deux fois plus faible que sa longueur d'onde la plus élevée.

**P5.6)** Quelle précaution particulière doit alors être prise au niveau de la figure de diffraction ? 0.5 pt



*Exemple de supercontinuum optique généré dans une fibre optique<sup>5</sup>*

<sup>5</sup> I. Savelli, O. Mouawad, J. Fatome, B. Kibler, F. Désévéday, G. Gadret, J-C Jules, P-Y Bony, H. Kawashima, W. Gao, T. Kohoutek, T. Suzuki, Y. Ohishi, and F. Smektala, "Mid-infrared 2000-nm bandwidth supercontinuum generation in suspended-core microstructured Sulfide and Tellurite optical fibers," Opt. Express 20, 27083-27093 (2012)

