

FIBRES OPTIQUES

B. AMANA et J.-L. LEMAIRE

A/ THEORIE

I – INTRODUCTION

Nous allons présenter ici les notions de base ainsi que les relations nécessaires à la réalisation du TP « Fibres Optiques ».

Le concept de communications optiques remonte loin dans l'histoire. L'envoi de messages par la lumière est certainement aussi vieux que les signaux de feu ou de fumée et a continué dans notre ère moderne si on tient compte de l'utilisation de lampes dans les communications entre bateaux en mer. Cependant, ces méthodes de transmission dépendent de l'état de l'atmosphère comme milieu de transmission.

Un guide d'onde fabriqué à partir d'un matériau non conducteur qui transmet la lumière (diélectrique), tel que le verre ou le plastique pourrait être un milieu de transmission idéal, parce qu'il n'est pas sujet aux variations atmosphériques. Les recherches entreprises dans ce sens aboutissent aux fibres optiques actuelles avec des pertes de puissance de lumière relativement faibles sur de longues distances.

Nous sommes aujourd'hui dans une période où le développement des réseaux Internet est en pleine croissance et le moyen le plus rapide pour transmettre une information est bien sûr la lumière. La transmission sans perturbation d'une information d'un point A à un point B s'effectue à l'aide d'un guide de lumière (fibre optique). La fibre optique est au photon ce que le câble coaxial est à l'électron !

Les fibres optiques sont également utilisées en spectroscopie et en photométrie. Les impératifs ne sont plus alors les mêmes qu'en communication (utilisation à longueur d'onde unique en général) puisqu'elles doivent transmettre la bande spectrale la plus large possible et présenter une grande homogénéité du matériau sur tout le diamètre.

Dans les deux cas l'ouverture optique de la fibre joue un rôle important.

La fibre optique est un guide d'onde cylindrique composé d'au moins deux milieux de réfraction différents.

Nous distinguerons deux grands types de fibres, les fibres multimodes (à saut ou à gradient d'indice) et les fibres monomodes. Les fibres multimodes sont des fibres utilisées pour des applications « bas de gamme » (courte distance), tandis que les fibres monomodes sont surtout utilisées pour des applications télécoms et donc sur de longues distances.

La figure 1 nous montre les différents types de fibre.

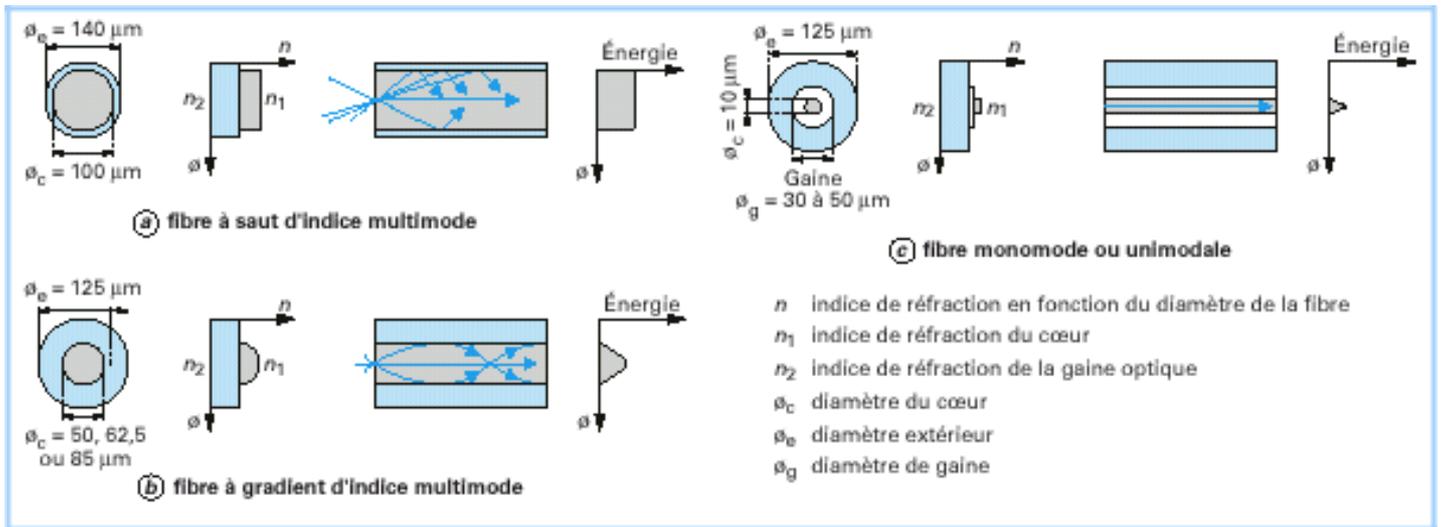


Figure 1 – Différents types de fibre optique.

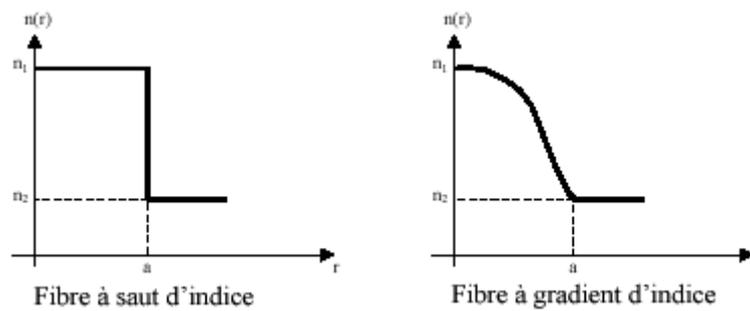


Figure 2 – Exemple de deux types de profil d'indice.

II – RAPPELS SUR LA REFRACTION

Considérons deux milieux d'indice différents $n_1 < n_2$ séparés par une surface plane (Figure 3), le milieu n_1 est éclairé par une onde plane monochromatique (λ_0) défini par son vecteur d'onde :

$$\vec{k}_1 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot n_1 \cdot \vec{u}_1 ; \quad k_{1x} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot n_1 \cdot \cos(i_1) , \quad k_{1z} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot n_1 \cdot \sin(i_1)$$

Avec λ_0 , longueur d'onde dans le vide et u_1 vecteur unitaire pris suivant la direction d'incidence.

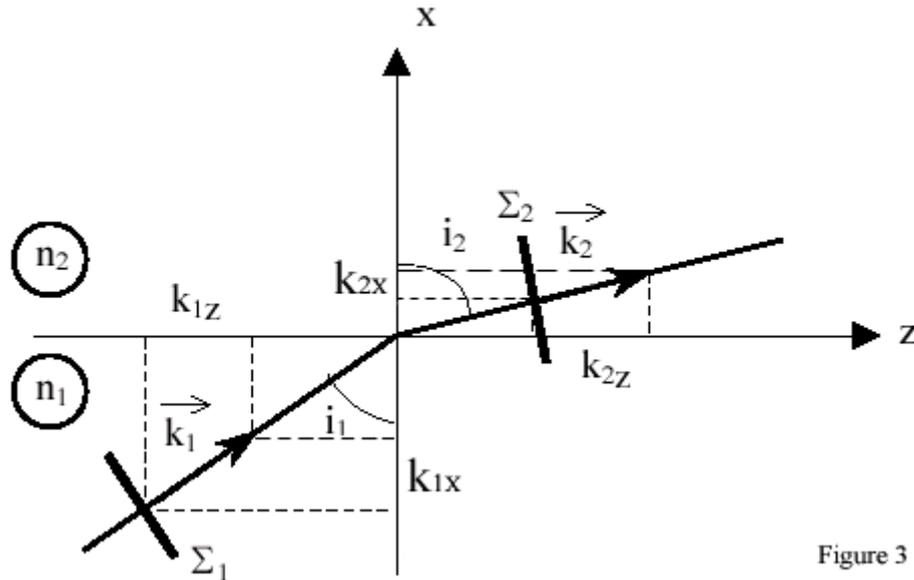


Figure 3

Après réfraction sur la surface plane, l'onde se propage dans le milieu n_2 selon l'angle d'émergence i_2 avec un vecteur d'onde :

$$\vec{k}_2 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot n_2 \cdot \vec{u}_2 ; \quad k_{2x} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot n_2 \cdot \cos(i_2) , \quad k_{2z} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot n_2 \cdot \sin(i_2)$$

Avec u_2 vecteur unitaire pris suivant la direction d'émergence.

La relation de Descartes s'écrit : $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$

En multipliant les deux termes par $\frac{2\pi}{\lambda_0}$, on obtient : $\frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot n_1 \cdot \sin(i_1) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot n_2 \cdot \sin(i_2)$

ou $k_1 \cdot \sin(i_1) = k_2 \cdot \sin(i_2)$ soit : $k_{1z} = k_{2z}$

On peut donc en conclure qu'au cours d'une réfraction sur un dioptre plan, il y a conservation de la projection des vecteurs d'ondes incident et réfracté sur la surface de séparation.

III – CONDITION DE GUIDAGE DANS UNE FIBRE

III.1 Fibre à saut d'indice

On suppose que la face d'entrée de la fibre est éclairée par un rayon de lumière monochromatique (λ_0) faisant un angle θ avec la normale. Nous allons chercher quelle valeur donner à θ pour qu'il y ait guidage (figure 4).

A l'entrée de la fibre on a : $n_0 \sin \theta = n_1 \sin \alpha = n_1 \cos \beta = n_1 \cdot \sqrt{1 - \sin^2 \beta}$.

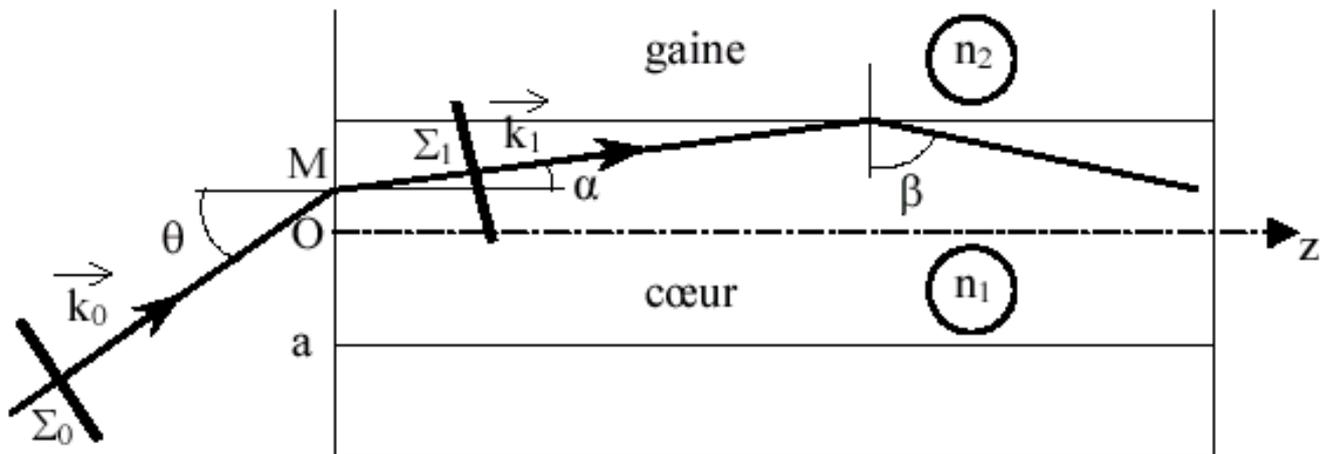


Figure 4

Pour que le guidage soit possible, il faut que les rayons soient injectés dans la fibre sous un angle θ tel que l'angle β à l'interface cœur/gaine soit supérieur à l'angle limite β_{lim} défini par :

$$n_1 \sin \beta_{lim} = n_2 \sin \frac{\pi}{2}.$$

$$\text{Soit : } \sin \beta_{lim} = \frac{n_2}{n_1}$$

Le guidage est possible lorsque : $\beta > \beta_{lim} \Rightarrow \sin^2 \beta \geq \sin^2 \beta_{lim} \Rightarrow n_1 \cdot \sqrt{1 - \sin^2 \beta_{lim}}$

$$n_0 \text{ étant en général l'air } (n_0 = 1) \Rightarrow \sin \theta \leq n_1 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}$$

$$\text{Condition de guidage : } \sin \theta \leq \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

L'angle limite θ_{lim} défini par : $\sin \theta_{lim} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ représente **l'angle d'acceptance** de la fibre

Il y a donc guidage si $|\theta| \leq \theta_{lim}$

III.2 Fibre à gradient d'indice

Au point d'incidence M (figure 5) on a : $\sin \theta(M) = n(M) \sin \alpha_1$

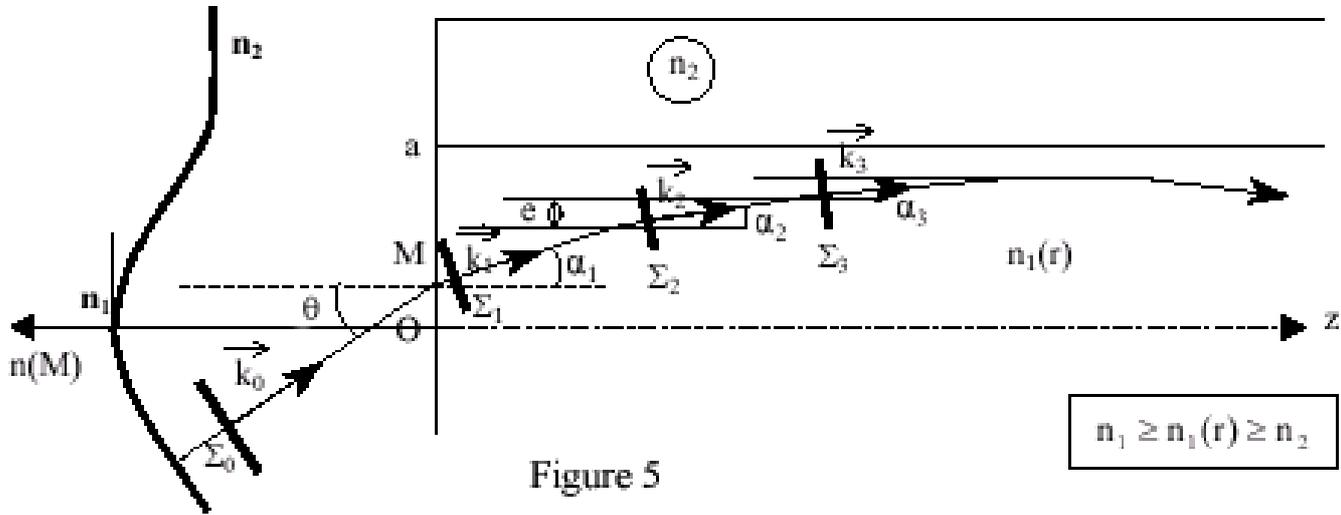


Figure 5

k_1 vecteur d'onde associé à l'onde plane locale Σ_1 : $\vec{k}_1 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot n(M) \cdot \vec{u}_1$ fixé,

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot n_2 \leq \|\vec{k}_1\| \leq \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot n_1$$

En considérant la fibre à gradient comme un empilement de couches concentriques de faible épaisseur e , d'indice décroissant, la propagation est ramenée à une succession de réfraction sur des surfaces localement planes.

D'après le paragraphe précédent, le rayon s'incurve et tend à devenir parallèle à l'axe Oz de la fibre. D'autre part, à l'intérieur de chacune des couches, la projection sur l'axe Oz du vecteur k est conservée :

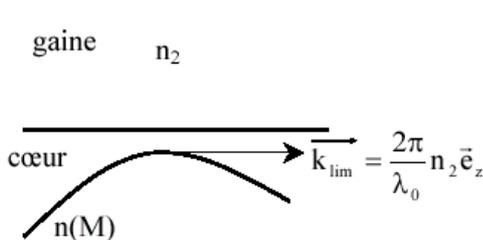
$$k_1 \cos \alpha_1 = k_2 \cos \alpha_2 = \dots = k_i \cos \alpha_i = k \cdot e_z = \text{cste}$$

La quantité $\beta = k \cdot e_z$, est appelée constante de propagation. Pour un point d'injection M fixé, elle ne dépend que de l'inclinaison initiale $\theta(M)$ du rayon incident et de l'indice local $n(M)$:

$$\beta = \vec{k} \cdot \vec{e}_z = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot n(M) \cdot \cos \alpha_1 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot n(M) \cdot \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_1} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{n(M)^2 - \sin^2 \theta(M)}$$

Elle est indépendante du trajet suivi par le rayon et peut se calculer en un point quelconque de celui-ci. Pour que le guidage soit possible, il faut que la trajectoire du rayon puisse devenir parallèle à l'axe Oz avant d'atteindre l'interface cœur/gaine (sinon, ce rayon passe dans la gaine et est perdu pour le guidage). La situation extrême dans laquelle la trajectoire devient tangente à l'interface cœur/gaine constitue la limite inférieure β_{min} de β au-delà de laquelle le guidage n'est plus assuré.

Cette situation correspond à :



$$\beta_{min} = k_{lim} \cdot e_z$$

soit : $\beta_{min} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot n_2$

En conclusion, un rayon sera guidé en M si : $\frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot n(M) \geq \beta \geq \beta_{min}$ soit $n(M)^2 \geq (n_2^2 - \sin^2 \theta) \geq n_2^2$

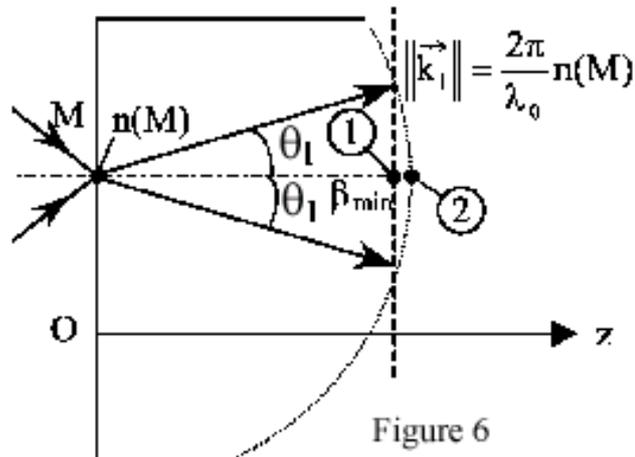
ou encore $|\sin \theta(M)| \leq \sqrt{n(M)^2 - n_2^2}$

Pour une fibre à gradient d'indice, l'angle d'acceptance local (ou ouverture numérique locale) est défini par :

$$\sin \theta_{lim}(M) = \sqrt{n(M)^2 - n_2^2}$$

Remarque 1: Le raisonnement du paragraphe précédent sur la fibre à gradient d'indice est évidemment applicable aux fibres à saut d'indice, dans ce cas on a : $n(M) = n_1$ et $\sin \theta \leq \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$

Remarque 2 : A l'angle limite $\theta_{lim}(M)$ correspond un angle α_{lim} à l'intérieur de la fibre (figure 6)



$$\cos \alpha_{lim} = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_{lim}} = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_{lim}(M)}{n^2(M)}} = \sqrt{1 - \frac{n^2(M) - n_2^2}{n^2(M)}}$$

$$\cos \alpha_{lim} = \frac{n_2}{n(M)} = \frac{\text{point 1}}{\text{point 2}}$$

Les rayons injectés dans la fibre au point M seront donc guidés si leurs angle d'inclinaison dans le cœur est inférieur à α_{lim} .

IV – OUVERTURE NUMERIQUE D'UNE FIBRE

Elle correspond à la valeur maximale que peut prendre le sinus de l'angle d'acceptance :

$$\text{fibre à saut d'indice} \quad \Rightarrow \quad ON = \sin \theta_{lim} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$$\begin{aligned} \text{fibre à gradient d'indice} \quad \Rightarrow \quad ON = \sin \theta_{lim} &= \sqrt{n(M)^2 - n_2^2} \\ &= \sqrt{n_1^2 - n_2^2} ; \sin \theta_{lim} \text{ est maximal sur l'axe} \end{aligned}$$

Donc, quel que soit le type de fibre : $ON = \sin \theta_{lim} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$

$\Delta n = n_1 - n_2$ étant très petit, il est possible d'écrire $n_1 + n_2 = 2n_1$,

$$\text{d'où : } ON = \sqrt{(n_1 + n_2)(n_1 - n_2)} \approx \sqrt{2n_1 \Delta n}$$

Remarque 1 : Compte tenu de l'uniformité axiale de la fibre, les rayons guidés dans le cœur émergent par la face de sortie dans un cône dont le demi-angle au sommet est égal à l'angle d'acceptance. On peut donc déterminer l'ouverture numérique d'une fibre en mesurant le sinus du demi-angle au sommet du cône de rayonnement le plus souvent observé en sortie de fibre.

Remarque 2 : Pour une fibre à gradient d'indice, on définit l'ouverture numérique locale $ON(M)$ telle que :

$$ON(M) = \sin \theta(M) = \sqrt{n(M)^2 - n_2^2}$$

V – PROFIL D'INDICE D'UNE FIBRE

Le profil d'indice est une représentation de la variation d'indice dans le cœur de la fibre. Dans une fibre multimode, la puissance lumineuse acceptée en un point de sa section droite est proportionnelle à l'ouverture numérique locale (donc proportionnelle à la différence entre l'indice au point M et l'indice de la gaine).

Le profil lumineux $P(M)$ en sortie de la fibre représente donc le profil d'indice.

Dans la mesure où l'on peut assimiler le sommet du cône de sortie à une source lambertienne de surface S et de luminance axiale L_0 , on peut évaluer la puissance $P(M)$ injectée au point M avec la loi suivante :

$$P(M) = L_0 \cdot S \cdot \Omega(M),$$

Avec $\Omega(M) = 2\pi \cdot [1 - \cos \theta(M)] \rightarrow$ Angle solide correspondant au cône lumineux qui sera guidé dans le cœur. Si l'angle d'acceptance $\theta(M)$ est assez petit on a :

$$\cos \theta(M) \approx 1 - \frac{\theta^2(M)}{2} \approx 1 - \frac{\sin^2(\theta(M))}{2} \approx 1 - \frac{ON^2(M)}{2}$$

$P(M) = \pi \cdot L_0 \cdot S \cdot ON^2(M)$ ou encore avec $ON(M) \approx 2 \cdot n_1 \cdot [n(M) - n_2]$, on arrive à :

$$P(M) = 2\pi \cdot L_0 \cdot S \cdot [n(M) - n_2] \cdot n_1 \quad \text{avec} \quad 2\pi \cdot L_0 \cdot S \cdot n_1 = \alpha$$

avec, $n(M)$ indice au point M ,

$P(M)$ puissance lumineuse en sortie au point M ,

n_2 indice de la gaine.

La calibration de l'échelle des indices (détermination de α) s'effectue à partir de la connaissance de Δn .

Dans une fibre à gradient d'indice, l'indice diminue de manière continue de n_1 (valeur de l'indice sur l'axe optique) jusqu'à n_2 (indice de la gaine).

Le profil d'indice dans le cœur peut s'écrire sous la forme : $n(r) = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^p}$

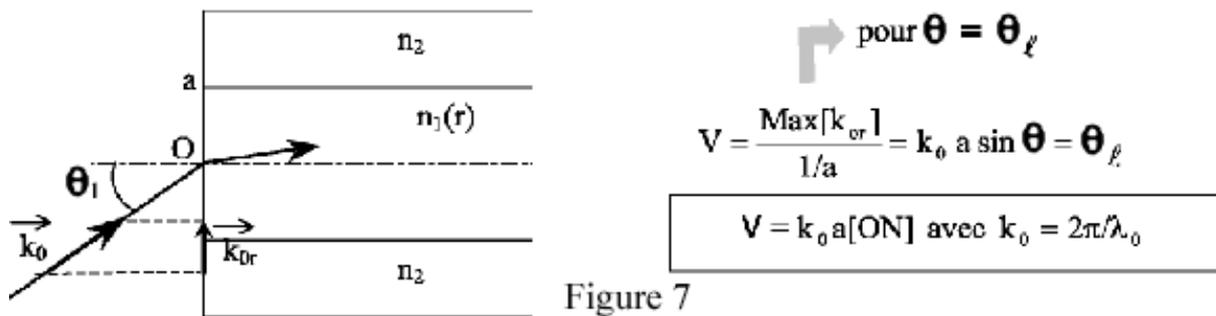
Avec :
$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_2}$$

a : le rayon du cœur

p : exposant de profil ($p = 1$ pour un profil triangulaire ; $p = 2$ pour un profil parabolique).

VI – FRÉQUENCE SPATIALE NORMALISÉE

Ce paramètre, noté v , représente la plus grande composante radiale du vecteur d'onde incident correspondant à un rayon guidé, rapporté à la dimension $1/a$ (figure 7).



La fréquence spatiale normalisée est un nombre sans dimension qui permet de prévoir à partir de quelle longueur d'onde une fibre optique fonctionne en régime **unimodal** ou **multimodal**.

On peut montrer à l'aide de la théorie électromagnétique de la lumière et des équations de Maxwell, que l'angle α (figure 6) ne peut prendre que des valeurs discrètes en nombre limité.

Chaque valeur discrète de α correspond à une configuration de champ électromagnétique qui reste invariante au cours de la propagation, que l'on appelle **mode de propagation**, caractérisé notamment par sa constante de propagation β .

Une fibre peut donc être **monomode** ou **multimode suivant le nombre de modes qu'elle accepte de propager**.

On montre qu'une fibre fonctionne en régime multimodal

Le changement de régime se fait si : $v > 2,405$ pour une fibre à saut d'indice

et si $v > 3,518$ pour une fibre à gradient d'indice.

Exemple 1 : fibre à saut avec $a = 5\mu\text{m}$ et $ON = 0,3$

Pour quel λ change-t-on de régime ?

- fonctionnement en régime multimodal si $\frac{2\pi}{\lambda_0} \times 5 \cdot 10^{-6} \times 0,3 > 2,405$

C'est à dire si $\lambda_0 < 3,9 \cdot 10^{-6}\text{m}$.

- fonctionnement en régime unimodal si $\lambda_0 > 3,9 \cdot 10^{-6}\text{m}$.

Exemple 2 : fibre à gradient, unimodale pour $\lambda_0 = 600\text{nm}$.

Quelle valeur peuvent prendre a et ON ?

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot a \cdot ON < 3,518 \Rightarrow a \cdot ON < \frac{3,518 \cdot \lambda_0}{2\pi} = 0,336 \cdot 10^{-6} \mu\text{m}$$

Les fibres unimodales pour les longueurs d'onde visibles auront un cœur de quelques microns et une ouverture numérique faible ($\Delta n = n_1 - n_2$ de quelques centièmes).

On peut également à partir de ce paramètre calculer le nombre approximatif de modes N_m

circulant dans la fibre :

$$N_m = \frac{v^2}{4}$$

VII – PERTES / ATTENUATION DANS UNE FIBRE

Trois phénomènes, explicités ci dessous et dont les effets se cumulent, participent à l'atténuation de la lumière dans une fibre optique :

-L'absorption

-Les pertes (Diffusion, couplage des modes, imperfections de la fibre)

-Les pertes d'insertion

VII.1 L'absorption

Sous l'influence d'un photon d'énergie suffisante, un électron peut être porté à un niveau d'énergie supérieur à celui où il se trouvait. Une partie de l'énergie du rayonnement incident est ainsi absorbée par le matériau.

Cette interaction rayonnement-matière s'applique au matériau constituant la fibre (absorption intrinsèque), mais aussi aux impuretés qu'elle contient et qui sont la conséquence du mode de fabrication (ion Fe^{3+} , OH^- , etc.) (absorption extrinsèque). A titre d'exemple, un taux d'impuretés de quelques ppm d'ions Fe^{3+} entraîne, à 850 nm, une atténuation de 130 dB/km ; on comprend donc la nécessité d'utiliser des matériaux qui soient les plus purs possible pour la fabrication de fibre optique.

VII.2 Pertes

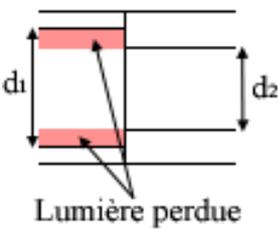
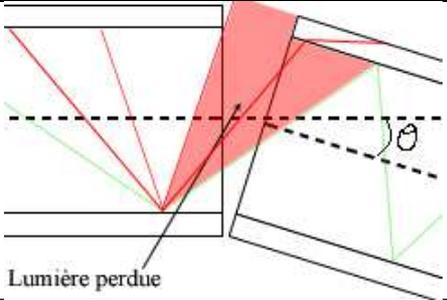
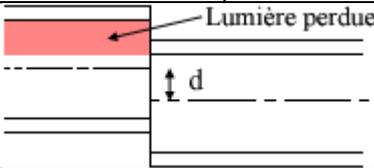
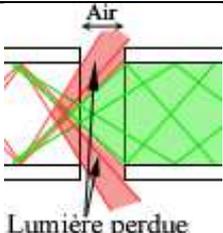
- Diffusion de RAYLEIGH : Elle provient des variations de l'indice de réfraction du matériau sur des longueurs inférieures à la longueur d'onde de la lumière ; elle se traduit par une perte de puissance lumineuse inversement proportionnelle à λ^4 (loi de Rayleigh).
- Défaut de la fibre : Les variations locales du diamètre du cœur, micro-courbures, vont faire qu'un certain nombre de rayons vont subir une réfraction dans la gaine, entraînant une perte d'énergie. Cette perte d'énergie est d'autant plus grande que les rayons sont plus inclinés par rapport à l'axe ; on définit "l'atténuation différentielle" comme la différence d'atténuation entre un rayon axial et un rayon incliné de θ par rapport à l'axe.
- Couplage de modes : Il s'agit de l'ensemble des phénomènes qui entraînent des échanges d'énergie entre les différentes directions de propagation des rayons. Prenons par exemple un rayon qui arrive avec l'inclinaison θ dans une zone où existent des micro-courbures ; il peut alors se réfléchir suivant un angle θ' différent de θ . En pratique, tous les rayons échangent de

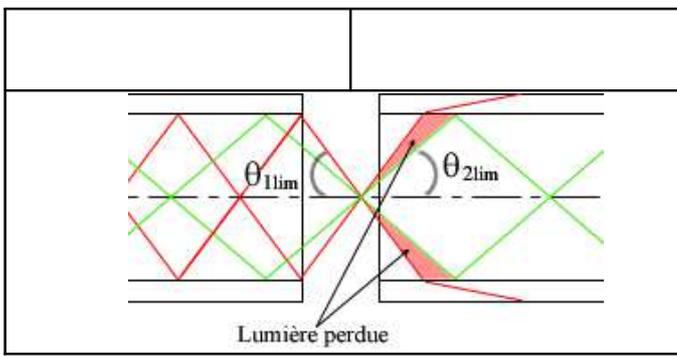
l'énergie entre eux, en particulier les rayons guidés et non guidés, d'où un facteur d'atténuation supplémentaire.

VII.3 Pertes d'insertion/de connections

Une liaison à fibre optique nécessite toujours un couplage source-fibre ou fibre-détecteur ; celui ci est réalisé par des connecteurs. Une liaison peut également nécessiter le raccordement de fibres entre elles. Cette connexion peut être démontable (connecteurs fibre à fibre) ou permanente (soudure). Toute interconnexion doit causer le minimum de pertes.

Tableau récapitulatif des principales causes de pertes par connection :

<p>Diamètre de cœur différents</p>	$A(dB)=10 \cdot \log \dots$	<p>Désalignement angulaire</p>	$A(dB)=20 \cdot \log \frac{1-\cos \theta}{1-\cos \alpha}$ <p>, avec $\sin \alpha_a = ON$</p>
			
<p>Désalignement radial</p>	<p>L'atténuation est liée aux conditions d'injection dépendant ici de l'excentrement d</p>		<p>Séparation longitudinale</p>
			
<p>ON différentes</p>	$A(dB)=10 \cdot \log \dots$		



La détermination des pertes sur un tronçon de fibre s'obtient généralement en calculant la différence entre la puissance en entrée de la fibre et la puissance en sortie.

$$\eta_{\text{fibre}} = P_{e(\text{dBm})} - P_{s(\text{dBm})} = 10 \cdot \log(P_{e(\text{mW})}) - 10 \cdot \log(P_{s(\text{mW})})$$

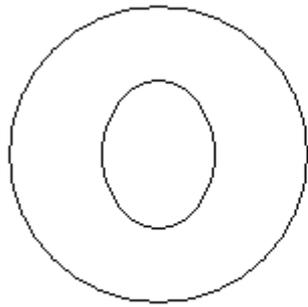
VIII – POLARISATION

Dans l'absolu, on ne réalise pas de fibre parfaite ; le problème auquel nous nous intéressons ici est la polarisation de la lumière dans la fibre.

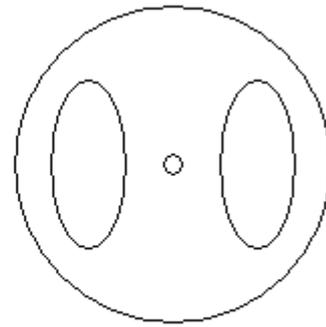
Les imperfections de fabrication produisent un cœur de forme plutôt elliptique. De plus, à l'utilisation, les courbures déforment aussi la fibre ; on a alors un milieu anisotrope : au vu du faisceau, il existe des indices différents selon la direction. Dans la fibre, on constate une biréfringence : un rayon non polarisé incident est décomposé en deux rayons (extraordinaire et ordinaire) polarisés linéairement mais l'un en mode transverse magnétique [TM] et l'autre en mode transverse électrique [TE].

Plusieurs corrections existent :

- Un système électrique peut, de loin en loin sur la fibre, capter le signal et après analyse émettre le signal comme à son origine. On perd ici l'efficacité du traitement tout optique.
- Des fibres à maintien de polarisation comme les fibres à cœur elliptique ou les fibres PANDA ou TIGER.



fibre à coeur elliptique



fibre PANDA

Avec ces fibres, on peut contrôler la polarisation le long de la fibre .

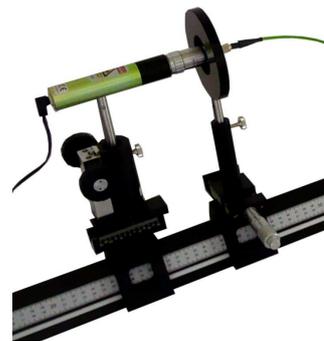
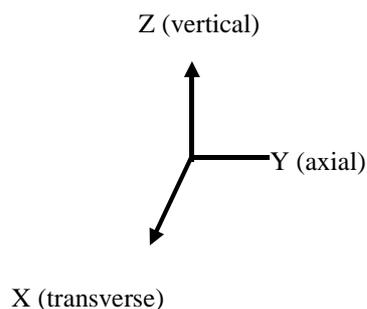
La perte de polarisation est utile pour l'utilisation des fibres comme capteurs : par exemple, lorsque la fibre subit des contraintes, le signal est modifié et il est possible de l'analyser pour remonter à la valeur de la contrainte.

B/ PARTIE EXPERIMENTALE

Le but du TP proposé est d'étudier différentes caractéristiques d'une fibre optique sans avoir besoin d'instruments performants et onéreux (type analyseur de spectre ou réflectomètre).

Dans tout le document, les directions suivantes seront considérées :

- X : face à l'utilisateur (perpendiculaire au banc optique)
- Y : parallèle au banc optique (axe optique)
- Z : verticale



I-MATÉRIELS NÉCESSAIRES AU TP

Poste	Désignation	Qté
1	Banc prismatique (L = 200 cm) avec jeu de pieds	1
2	Cavalier standard pour banc optique	3

	prismatique	
3	Cavalier pour banc prismatique, platine à déplacement Y sur 60 mm -Z sur 40 mm	2
4	Cavalier pour banc prismatique, platine à vernier 25 mm X	1
5	Cavalier pour banc prismatique, platine à déplacement latéral 60 mm X	1
6	Pack laser compact vert 532nm (3-5 mW) Classe III avec bague extenseur	1
7	Objectif achromatique de précision 20X / ON 0,4	2
8	Objectif achromatique de précision 10X/ON 0,25	1
9	Porte objectif sur tige	1
10	Fibre optique multimode 100/140 à gradient d'indice : 2m	1
11	Connectique FC/PC pour fibre optique sur disque diam. 40 mm	2
12	Porte composant protégé diamètre 40 mm (accepte 42 mm)	2
13	Lanterne très haute luminosité 12V 75W	1
14	Alimentation 12V/75W à douilles de sécurité	1
15	Micromètre objet : 1mm divisé en 100 graduations	1
16	Porte lame mince largeur 20mm sur tige	1
17	Décalage d'axe sur tige	1
18	Polarisants linéaires en verre sur monture à bille	2
19	Ecran blanc 200x200, une face quadrillée, une face neutre	1
20	Mesureur de puissance portable	1
21	Lunette d'alignement et protection laser 532 nm jusque 100 mW (OPTION)	2
		1

INFORMATIONS * : CLASSES ET DANGERS DES LASERS (A LIRE)

Depuis son invention en 1960, le laser n'a cessé de se développer et de rencontrer de nouvelles applications (laboratoire, industrie, militaire,...). En conséquence, le nombre d'accidents dus au rayonnement laser a aussi augmenté. Dans la plupart des accidents laser, c'est l'œil qui est atteint...

☛ **Classe 1** : lasers non dangereux pour l'œil quelles que soient les conditions d'observation.

☛ **Classe 2** (lumière Laser visible de moins d'1 mW) : lasers émettant dans le visible et pour lesquels le réflexe palpébral (réflexe de clignement de l'œil égal à 250 ms) intervient pour protéger l'œil d'une exposition accidentelle au laser. Cette classe 2 prolonge la classe 1 et les lasers visibles de cette classe sont non dangereux pour l'œil, si celui-ci n'est pas maintenu dans le faisceau plus de 250 ms.

☛ **Classe 3A (lumière Laser visible entre 1 mW et 5mW) : cette classe regroupe les lasers non dangereux pour l'œil nu, mais potentiellement dangereux si on les observe à travers une optique grossissante.**

☛ **Classe 3B (lumière Laser visible entre 5 mW et 500 mW) : lasers dangereux pour l'œil nu (et encore plus si le laser passe par une optique grossissante), mais les réflexions diffuses (rayonnement diffusé par un obstacle situé sur le trajet du faisceau) du laser sont sans danger. La lésion cutanée est prévenue par une sensation de picotement ou d'échauffement.**

☛ **Classe 4** : lasers les plus intenses qui sont très dangereux pour l'œil nu y compris en réflexion diffuse, ainsi que les lasers pouvant induire des dommages sur la peau.



Les utilisateurs doivent avoir conscience que le laser utilisé est de classe 3A, il est dangereux pour l'œil nu.

II-MANIPULATIONS

II-1. Mesure de l'ouverture numérique

- Placez le laser dans un cavalier à déplacement vertical et axial à une extrémité du banc (habituellement à gauche – cf photo). Orientez le faisceau et centrez le par rapport à une cible placée sur l'axe optique (ex : écran).
- Sur le laser, vissez la bague porte objectif puis l'objectif 20X.

Après avoir consulté la notice d'utilisation du mesureur de puissance optique, mesurer la puissance (P_0) du Laser directement en sortie de l'objectif. Cette mesure sera nécessaire pour déterminer les pertes d'injection.

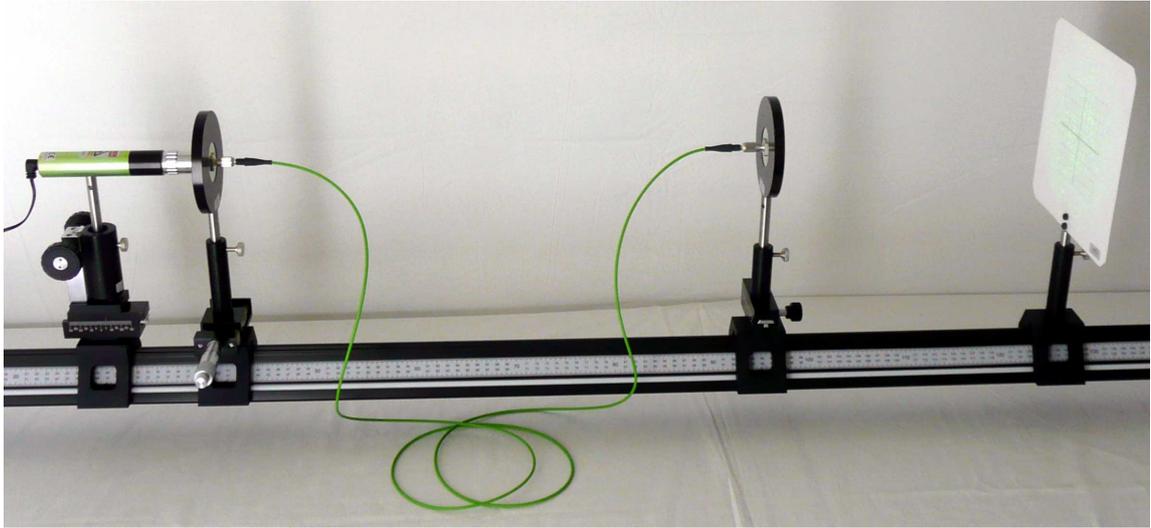
- Disposez le support + disque avec connecteur fibre dans le cavalier à vernier. Ramenez l'ensemble à environ 1 cm de l'objectif de microscope. Agissez alors sur les déplacements Z (Laser) et X (Fibre) pour centrer le faisceau sur l'entrée de la fibre optique. Optimisez ce réglage en observant le signal sortant de l'extrémité de la fibre.
- Connectez l'autre extrémité de la fibre à son support et positionnez-la à quelques cm de l'écran.
- Si l'injection dans la fibre est correctement réalisée, vous devriez observer une tache lumineuse en sortie de fibre, sur un écran par exemple.
- Pour améliorer la qualité de l'injection, translatez la platine supportant le Laser dans la direction axiale Y afin de faire coïncider le point focal de en sortie d'objectif avec l'entrée de la fibre. **Attention de ne pas toucher la pupille de sortie de l'objectif avec l'extrémité de la fibre.**

Lorsque l'éclairement en sortie de fibre est maximal, l'injection pourra être considérée comme optimale.

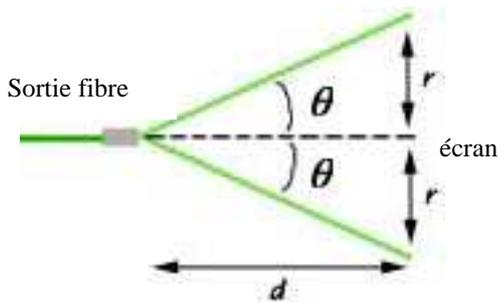
Remarque : lorsque vous translatez le Laser, vous pourrez observer une diminution de la puissance en sortie de fibre (désalignement) ... jouez alors sur les directions Z (Laser) et X (Fibre) pour retrouver un alignement optimum. Répéter cette opération jusqu'à obtenir une puissance maximale en sortie de fibre.

Mesurer la puissance (P_1) en sortie de fibre lorsque votre réglage d'injection est optimal.

Le montage final est le suivant :



Mesure de l'ouverture numérique :



QUESTIONS :

1/ Calculer la valeur de l'ouverture numérique de la fibre à partir des mesures de r et d . Vous prendrez comme valeurs $d = 10$ cm (tout le quadrillage de l'écran) et 20 cm (tout l'écran).

2/ Calculez alors la variation d'indice Δn entre le cœur et la gaine ($\Delta n = n_1 - n_2$) sachant que le fabricant de la fibre donne $n_1 = 1,488$. En déduire la valeur de l'indice de la gaine.

II.2. Evaluation des pertes

- Le montage est toujours identique à celui de départ.
- La mesure des pertes s'obtient par la mesure de la puissance maximale transmise (P_1) et de puissance injectée en entrée de fibre (P_0).

QUESTIONS :

1/ Vous avez préalablement déterminé P_0 et P_1 pour l'objectif 20X. En déduire les pertes en dB.

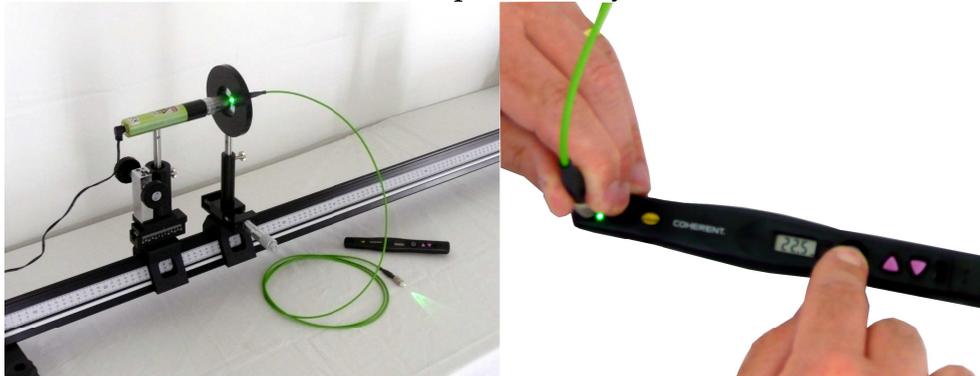
-
- 2/ Si le temps le permet et si votre enseignant vous le recommande, vous pouvez recommencer l'opération avec l'objectif 10X.
- 3/ Quel est la principale origine des pertes enregistrées en sortie de fibre ?

II-3. Détermination du profil d'indice

La technique consiste à déplacer le point de focalisation d'un faisceau lumineux à travers un objectif de microscope sur la face d'entrée d'une fibre optique. La mesure de la puissance en sortie de la fibre en fonction de la position du point de focalisation à l'entrée permet de déterminer le profil d'indice.

La partie théorique permet de mieux comprendre l'objet de la mesure.

- Le montage précédent est inchangé.
- Dévissez la fibre de sortie, assemblez-la à l'embase FC/PC qui sera positionnée devant la surface active du détecteur. Si vous n'utilisez pas cette embase, veillez à ne pas toucher la surface silicium du détecteur, au risque de la rayer.



- Utilisez la butée micrométrique de précision pour translater dans la direction transverse la face d'entrée de la fibre jusqu'à ce que la puissance mesurée en sortie soit de quelques microwatts.

QUESTIONS :

1/ A partir du point précédent (point de départ $\approx 1\mu\text{W}$), balayez le diamètre de la fibre en relevant tous les $10\mu\text{m}$ (1 graduation = $10\mu\text{m}$) la puissance $P(M)$ en mW. Lorsque les variations de puissances seront importantes ($>100\mu\text{W}$), utilisez un pas de $5\mu\text{m}$ pour une mesure plus précise.

Relevez de manière précise la valeur $P(M)$ maximale ainsi que la position correspondante.

2/ A partir de cette valeur maximale et du Δn obtenu précédemment, déterminez le facteur α reliant la puissance optique à une variation d'indice. Quelle est son unité ?

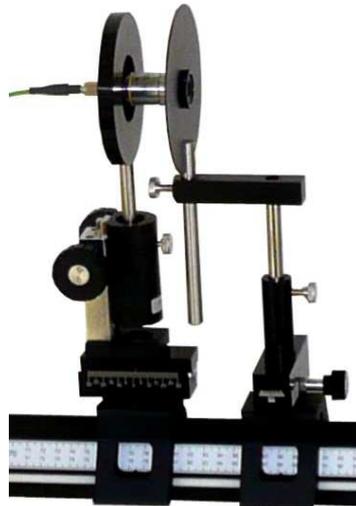
3/ Tracez alors le profil d'indice du cœur de la fibre. De quel profil s'agit-il ?

4/ Sachant que le diamètre du cœur de la fibre peut s'obtenir à partir de la largeur à 3 dB de la courbe précédente, donnez approximativement le diamètre du cœur.

II-4. Mesure du diamètre du cœur

- La partie injection reste inchangée.
- L'autre extrémité de la fibre optique est placée sur son support lui-même monté sur une platine translation YZ.
- Positionnez la face de sortie de la fibre devant le deuxième objectif (X10) monté sur le porte objectif, lui-même maintenu dans le système à décalage d'axe sur tige. Le tout est fixé dans un cavalier à déplacement latéral.
- Ajustez la hauteur (Z) de la fibre ainsi que la position (X) de l'objectif pour obtenir un faisceau de sortie le plus lumineux possible.

Le montage obtenu devient alors :



-En déplaçant la face de sortie de la fibre suivant Y, formez sur l'écran, placé à une distance D (entre 60 cm et 100 cm) de l'objectif, l'image du cœur de la fibre. **Attention à de ne pas toucher la face de sortie de la fibre avec l'objectif.**

-Le réglage est correct lorsque la tache sur l'écran est de diamètre minimal, on a alors l'image du cœur de la fibre.



QUESTION :

1/ A l'aide de l'écran quadrillé, mesurez le diamètre $2a'$ de l'image du cœur à la distance D de l'objectif.

Pour remonter au diamètre réel $2a$ du cœur de la fibre il est indispensable de déterminer le grandissement γ de l'objectif utilisé : $\gamma = \frac{2a'}{2a}$

Pour déterminer ce grandissement :

- Retirez tous les éléments du banc sauf l'écran, l'objectif et son cavalier. **Il est primordial de ne pas toucher au positionnement de l'objectif et de l'écran.**
- A la place du Laser, disposez la lumière blanche.
- A la place de l'extrémité de sortie de fibre (avant l'objectif), placez le micromètre objet et son support sur le cavalier à translation YZ.

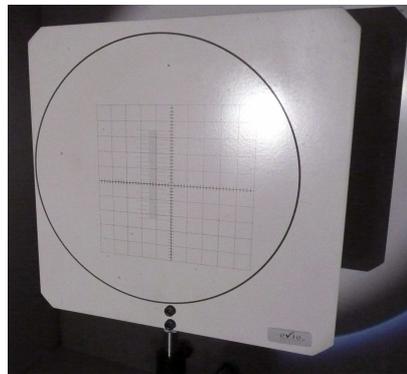
Le montage final se présente sous cette forme :



- Déplacez le chariot de positionnement de l'ampoule de la lampe blanche afin de focaliser la lumière sur l'entrée de l'objectif.



- Réalisez la mise au point de l'objectif par rapport à la lame micromètre à l'aide de la translation Y afin d'avoir une image nette du micromètre sur l'écran placé à la distance D.
- Vous devrez observer sur l'écran, l'image nette du micromètre objet qui est en fait un trait d'1 mm divisé en graduations.



2/ Mesurer la taille des graduations sur l'écran et en déduire le grandissement γ de l'objectif.

3/ Calculez alors le diamètre $2a$ du cœur de la fibre.

4/ Si le temps le permet et si votre enseignant vous le recommande, vous pouvez recommencer l'opération avec l'objectif 20X ou bien changer la distance D.

5/ A partir du rayon du cœur de la fibre, calculez la fréquence spatiale normalisée de celle-ci à la longueur d'onde $\lambda = 532$ nm, ainsi que le nombre approximatif N_m de modes se propageant dans cette fibre à cette longueur d'onde.

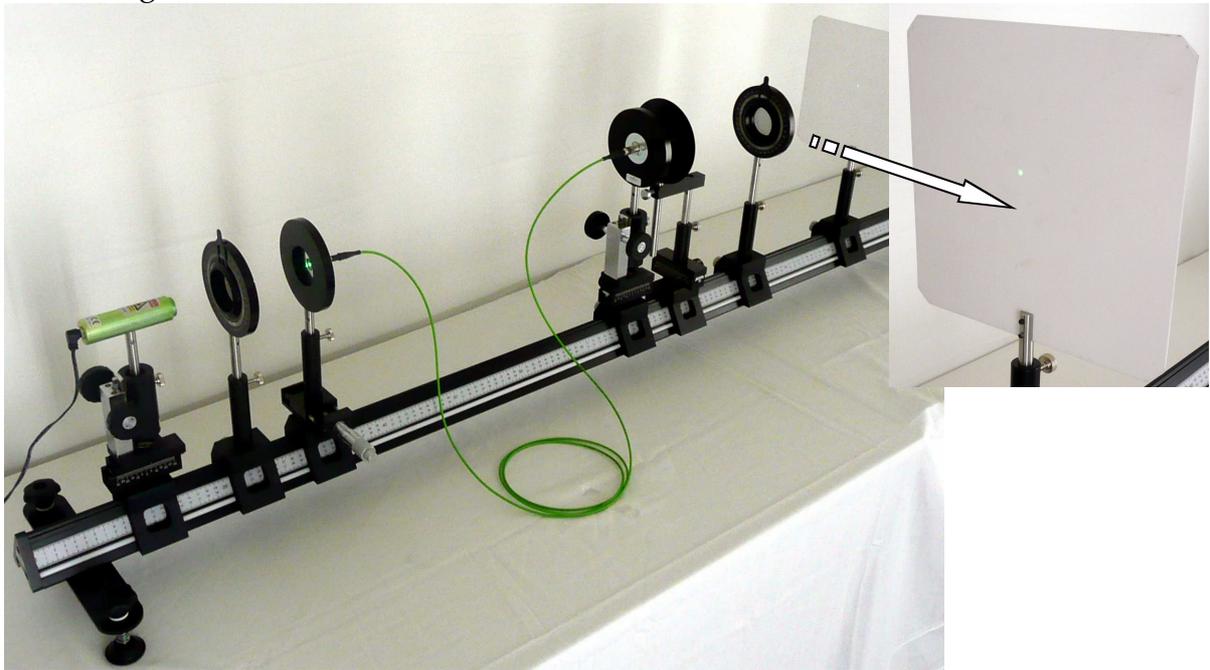
6/ Calculer la longueur d'onde de coupure pour laquelle cette fibre passera en régime monomode.

II-5. Dépolarisation dans une fibre

Cette manipulation a pour but de mettre en évidence le comportement de la fibre par rapport à une lumière polarisée rectilignement.

- Le Laser est placé sur son cavalier de translation ZY. L'objectif de microscope est retiré...vous enverrez directement le faisceau Laser vers le cœur de la fibre.
- Positionnez et centrez l'entrée de la fibre optique par rapport au faisceau Laser avec les réglages Z (Laser) et X (Fibre) dont vous disposez.
- Reprenez la configuration du montage précédent pour l'autre extrémité de la fibre optique qui est placée sur son support de translation YZ : Positionnez la face de sortie de la fibre devant le deuxième objectif (X10) monté sur une translation à déplacement transverse (X). Ajustez la hauteur (Z) ainsi que la position (X) de la fibre par rapport à l'objectif afin d'obtenir un faisceau collimaté.
- Insérez le polariseur P_1 entre le laser et la fibre et l'analyseur P_2 entre l'objectif et l'écran.

Le montage obtenu devient alors :



1/ Tourner le polariseur P_2 et observez sur l'écran le comportement de la lumière en sortie de l'objectif. Quels sont vos commentaires sur la polarisation en sortie de fibre ?

2/ Quelle observation aurait été attendue si la fibre n'avait pas été présente (propagation dans l'air) ?

C/ ANNEXE

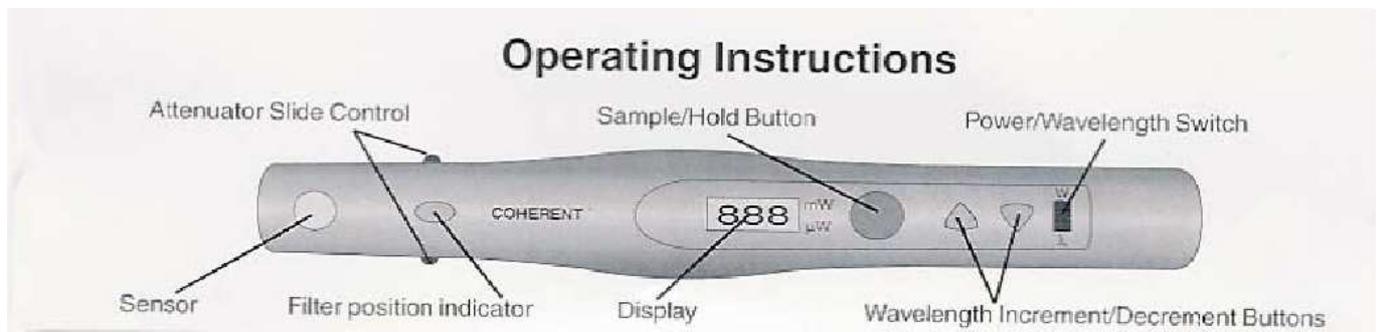
Mesureur de puissance portable



Specifications

Sensor Type	Silicon Cell
Built-in Attenuator	1 mm - thick NG - 10
Aperture Size	8 mm
Wavelength Range	400 - 1064 nm
Accuracy	$\pm 5\%$
Max. CW Power	10 mW
Max. CW Power with Built-in attenuator	1 W
Min. CW Power	0.5 μ W
Min Power Resolution	0.01 μ W
Displayed Power Ranges	9.99 μ W to 999 mW
Max. Power Density	0.5 W / cm ²
Max. Power Density with Built-in Attenuator	30 W / cm ²
Measurement Display	3 - digit LCD with power unit indicator

Notice du mesureur de puissance portable :



Mesure de puissance :

- 1.) Mettre le commutateur sur W.
- 2.) Si la puissance à mesurer attendue est $>10\text{mW}$ glisser la tige de contrôle de l'atténuateur vers le capteur. L'indicateur de position du filtre est noir lorsque l'atténuateur est en place et jaune lorsque l'atténuateur est inactif.
Ne pas dépasser $0,5\text{W}/\text{cm}^2$ sans l'atténuateur et $30\text{W}/\text{cm}^2$ avec l'atténuateur.
- 3.) Appuyer sur le bouton Sample/Hold durant 2 à 3 secondes pour prendre la mesure.
- 4.) Positionner le capteur dans l'axe du faisceau à mesurer pendant au moins 2 secondes en s'assurant que le capteur est en incidence normale pour avoir la meilleure précision possible. Si l'appareil émet un bip et si l'affichage indique "---", cela signifie que la puissance maximale admissible est dépassée.
- 5.) Relâcher le bouton Sample et écarter l'appareil du faisceau.
- 6.) La puissance mesurée est alors affichée durant 10 secondes.

Réglage de longueur d'onde :

- 1.) Mettre le commutateur sur λ .
- 2.) Régler la longueur d'onde entre 400 et 1064 nm avec les flèches situées sur le dessus de l'appareil (au-delà de 999 nm l'affichage indiquera de 000 à 064 pour les longueurs d'ondes comprises entre 1000 et 1064 nm). Ce réglage reste en mémoire et il est inutile de le refaire tant que l'on conserve la même source.

