

Fibres optiques

Pierrot Lamontagne

Résumé

Notre but dans ce laboratoire est de caractériser les propriétés de 3 fibres optiques afin de les identifier correctement. L'une d'entre-elle est une fibre multimode pour laquelle nous avons trouvé une ouverture numérique de $NA_{exp} = 0.22 \pm 0.01$. Les deux autres sont des fibres monomodes A et B. La fibre A a une ouverture numérique de $NA_A = 0.122 \pm 0.009$ et nous avons observé 4 de ces modes. Nous en avons déduit qu'il s'agit de la fibre II. La fibre B a une ouverture numérique de $NA_B = 0.126 \pm 0.004$ et on a observé 3 de ses modes. On en conclue qu'il s'agit de la fibre I. Nous avons aussi observé une superposition de modes à haute énergie avec les deux fibres. Finalement, nous avons simulé des harmoniques sphériques afin de montrer que les modes inclinés ($l \geq m$) des fibres monomodes peuvent être décrites par ceux-ci.

1 Introduction

La fibre optique est un guide d'onde pour la lumière. Elle utilise le principe de réflexion totale interne pour transmettre un signal lumineux sur de longues distances. Elle connaît de nombreuses applications dans le monde moderne dont en télécommunications, en réseaux informatique et en médecine. Dans ce laboratoire, nous étudions deux types de fibre optique : la fibre multimode et la fibre monomode. Afin d'étudier ces fibres, il est nécessaire d'apprendre à les cliver correctement afin d'exposer le coeur. Dans le cas de la fibre multimode, on s'intéresse à déterminer son ouverture numérique et son nombre V en caractérisant son patron lumineux. Dans le cas des fibres monomode, notre but est de caractériser leurs propriétés en trouvant expérimentalement le nombre de modes LP qu'ils peuvent produire à une longueur d'onde donnée. Notre but est de déterminer l'ouverture numérique, le nombre V et le rayon du coeur de ces fibres monomodes afin de pouvoir les identifier correctement. Finalement, on essaiera de recréer les modes en simulant numériquement des harmoniques sphériques. On s'intéressera aux modes LP les plus difficiles à recréer et la raison derrière ce fait.

2 Théorie

Une fibre optique est composé d'un coeur entouré par une gaine optique d'indice de réfraction moindre et le tout est recouvert d'un revêtement de protection. Une fibre optique transmet un signal lumineux à travers le coeur en utilisant le principe de réflexion totale interne. Lorsqu'un rayon lumineux passe d'un milieu dense à un milieu moins dense, la lumière est totalement réfléchi si l'angle par rapport à la normale dépasse un angle critique donnée par l'équation (1)[1].

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

où n_1 et n_2 sont les indices de réfraction des milieux moins dense et plus dense respectivement. Ainsi, dans une fibre optique, si le faisceau incident entre dans la fibre dans un certain cône d'acceptance, la lumière peut se propager dans la fibre par une succession de ré-

flexions. Ce cône d'acceptance est caractérisée par l'ouverture numérique qui est donnée par l'équation (2).

$$NA = \sin \alpha \quad (2)$$

où α est l'angle d'acceptance. Au-delà de cet angle, la réflexion totale interne est impossible dans la fibre et la lumière ne se propage pas. Le nombre V est une quantité importante pour déterminer le nombre de modes possibles pour une fibre monomode donnée. Avec la figure 1, on peut déterminer le nombre de modes LP possibles pour un certain nombre V donné en traçant une ligne verticale et en comptant les intersections avec les courbes. Sinon, le nombre de modes guidés est donnée par $\frac{V^2}{2}$.

Il existe des fibres multimodes et des fibres monomodes. Ils se diffèrent en terme du rayon de leur coeur. Les fibres multimodes ont un coeur plusieurs fois plus large que les fibres monomodes et ils transmettent plusieurs modes lumineux à la fois. Ils sont utiles pour transmettre de grandes quantités d'information sur une courte distance puisque la grande quantité de modes peut stocker une grande quantité de données. Cependant, leur atténuation est importante. Les fibres monomodes eux transmettent un seul mode à la fois, car leur coeur est beaucoup plus petit. [2]

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} R_c \times NA \quad (3)$$

Le nombre V peut être déterminé par l'équation (3). De cette équation, on remarque que V dépend de la longueur d'onde de la lumière traversant la fibre. Ceci est dû au fait que de la lumière de différentes longueurs d'onde va emprunter des chemins variés dans la fibre et ainsi changer les modes excités. Afin de trouver les modes d'une fibre monomode, il est donc important de la sonder avec des lasers de longueur d'onde variables. Afin d'identifier une fibre monomode, il faut déterminer le rayon de son coeur. On peut isoler R_c dans l'équation (3) et trouver V avec le nombre de modes sondés et NA en étudiant le rapport $\frac{D}{R}$ de la fibre. Ici, il faut noter que nous nous intéressons uniquement aux modes

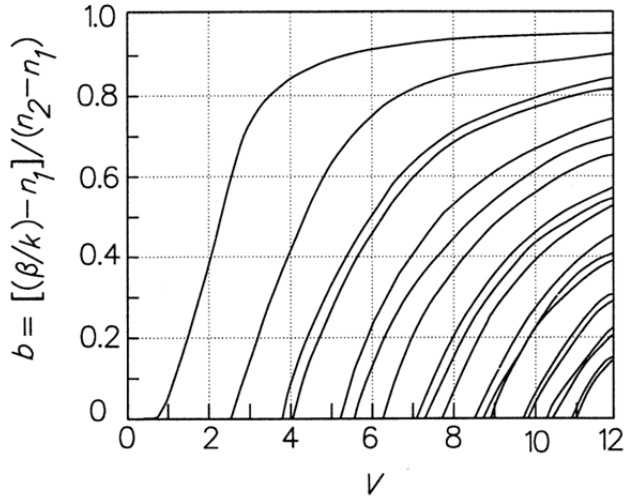


FIGURE 1 – Les modes LP possibles d'une fibre monomode pour un nombre V donné

LP (Linearly polarized) puisque les lasers que nous utilisons sont polarisés linéairement. Les seuls modes excités sont donc des modes LP .

Les harmoniques sphériques sont des objets mathématiques décrivant une symétrie sphérique et utilisant les pôlynômes de Legendre. Dans notre contexte, elle serviront à visualiser certains modes des fibres optiques. Elles sont décrites par l'équation (4).

$$Y_l^m(\theta, \phi) = \sqrt{\frac{2l+1}{4\pi} \frac{(l-m)!}{(l+m)!}} P_l^m(\cos\theta) e^{im\phi} \quad (4)$$

3 Montage et mesures

Afin d'exposer le coeur des fibres optiques, nous devons les cliver. Pour ce faire, nous enlevons la gaine de plastique en glissant délicatement une lame de rasoir sur la fibre optique. Par la suite, nous trempions la partie exposée dans l'acétone pour que le plastique se désagrège. Finalement, nous essuyons la fibre avec un tissu pour enlever la protection restante. Grâce à une lampe, un microscope et une télé cathodique, nous pouvons ensuite scruter l'extrémité de la fibre optique pour trouver le coeur et s'assurer qu'il est exposé sans être percé. Une fois que les fibres optiques sont prêtes, nous



FIGURE 2 – 1. Laser, 2. Lentille, 3. Fibre optique, 4. Détecteur CCD/CMOS, 5. Écran

pouvons les installer sur le montage montré à la figure

2. Le principe est de focaliser la lumière de différents laser dans la fibre optique grâce à une lentille. La lumière traverse ensuite l'entièreté de la fibre optique pour ressortir de l'autre côté où se trouve une caméra pour les fibres monomodes ou un écran pour la fibre multimode. Nous pouvons ensuite analyser le patron sortant soit sur l'écran, soit sur le logiciel de la caméra sur un ordinateur. En faisant varier l'alignement du laser par rapport à l'entrée de la fibre, nous excitions différents modes du système en variant la trajectoire du faisceau lumineux à l'intérieur de la fibre. Finalement, pour déterminer l'ouverture numérique de nos fibres, nous faisons varier la distance entre la sortie de la fibre et l'écran/caméra et nous mesurons le rayon du mode fondamental soit avec une règle sur l'écran ou avec un ajustement gaussien sur l'image de la caméra.

4 Résultats

4.1 Fibre multimode

Dans un premier temps, nous voulons caractériser les propriétés d'une fibre multimode. Dû à son coeur plus élargi, la fibre multimode transmet plusieurs modes à la fois. Il est question d'analyser les régimes modaux et de déterminer l'ouverture numérique. Afin de déterminer l'ouverture numérique, on veut trouver l'angle α de l'équation (2) expérimentalement. Pour ce faire, on modifie l'angle d'entrée du laser jusqu'à atteindre le patron illustré à la figure 3c. Ensuite, on mesure la distance entre la sortie de la fibre et l'écran puis le rayon du patron circulaire. On peut ensuite obtenir l'ouverture numérique en calculant l'angle avec la tangente du triangle rectangle $\alpha = \arctan(R/D)$. En effectuant cette mesure pour plusieurs valeurs de distances et de rayons, on le résultat suivant : $NA_{exp} = 0.22 \pm 0.01$. Ce qui est en concordance avec la théorie : $NA_{th} = 0.22$. Notre incertitude sur l'ouverture numérique provient de la mesure du rayon du patron qui pouvait dépendre de l'endroit choisi où le cercle devenait presque imperceptible.

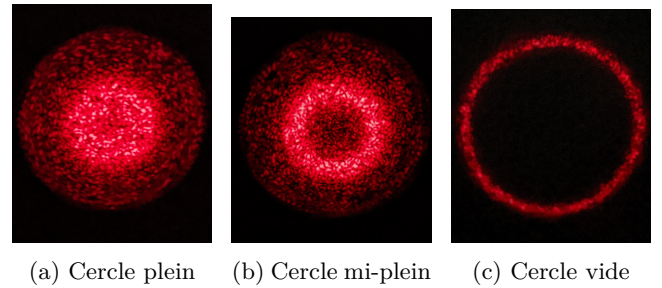


FIGURE 3 – Patrons de la fibre multimode

Dans la figure 3, on remarque que la variation de l'angle incident change le patron formé par la fibre optique. Ceci est dû au fait qu'on a à faire à un problème aux valeurs propres. En changeant l'angle incident α , on excite des modes différents. Lorsque α est petit, les

modes centraux sont excités (3a). Et plus on augmente α , plus les modes superficiels deviennent important (3c).

4.2 Fibres monomodes

La première étape est de déterminer l'ouverture numérique des fibres monomode A et B. Pour ce faire, on utilise la même technique que pour la fibre multimode, mais on mesure le rayon du patron avec les images du mode fondamental (6a et 7a). Pour y arriver, on évalue le profil d'intensité lumineuse et on prend les valeurs à 5% de luminosité d'un ajustement gaussien comme étant les extrémités (figure 4).

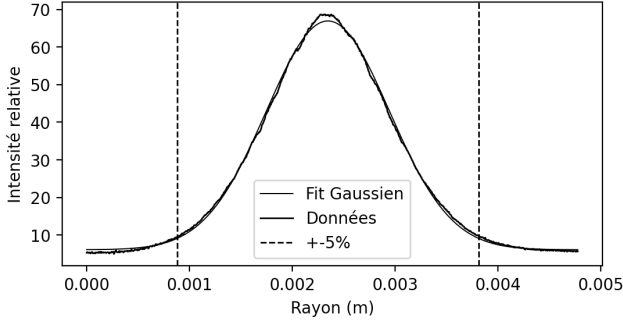


FIGURE 4 – Ajustement gaussien du mode fondamental

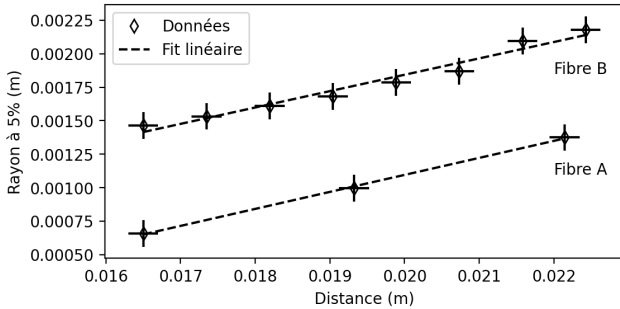


FIGURE 5 – Régression linéaire du rayon du patron en fonction de la distance pour trouver l'ouverture numérique. $R_A = 0.122D_A - 0.0014$ et $R_B = 0.126D_B - 0.0006$

On peut ensuite faire varier la distance en mesurant le rayon à chaque fois puis ajuster une droite sur un graphique de R en fonction de D (figure 5). La pente de cette droite nous permet de trouver l'ouverture numérique. On obtient les résultats de la table 1.

Fibres	Expérimental	Théorique
A	0.122 ± 0.009	0.13
B	0.126 ± 0.004	0.13

TABLE 1 – Ouvertures numériques des fibres monomode

Dans le cas de la fibre monomode, le coeur est beaucoup petit. Il est donc seulement possible d'exciter un

mode spécifique du système à la fois. En changeant les propriétés du montage et en utilisant des lasers de longueurs d'onde variables, on réussit à obtenir les modes illustrés à la figure 6 pour la fibre A. Rappelons nous qu'il est possible de déterminer le nombre de modes possibles à partir du nombre V avec la figure 1. Or, nous connaissons les propriétés de notre système et donc on peut déterminer des V_{th} pour les 3 rayons de coeur possibles avec l'équation 3 et ainsi identifier la fibre optique utilisée. En calculant V pour chaque rayon de coeur et à chaque longueur d'onde, on obtient les résultats de la table 2.

λ (nm)	R_c (μm)	V	Nombre de mode
633	1.75	3.5	2
	2.2	4.4	4
	1.8	3.6	3
532	1.75	2.7	2
	2.2	3.4	2
	1.8	2.8	2
405	1.75	2.3	1
	2.2	2.8	2
	1.8	2.3	1

TABLE 2 – Nombre de modes en fonction des paramètres expérimentaux

Pour la fibre A, nous avons obtenu une ouverture numérique de $NA = 0.122 \pm 0.009$ et avons photographié 4 modes. En se référant à la figure 2, on conclue donc que la fibre A a un rayon de coeur de $2.2 \mu m$ et correspond donc à la fibre II. Pour la fibre B, l'ouverture numérique est de $NA = 0.126 \pm 0.004$ et nous avons photographié 3 modes. On suspecte que la fibre B a un rayon de coeur de $1.75 \mu m$ et correspond à la fibre I, malgré le fait que nous avons obtenu un mode de plus que ce qui est prévu par la théorie. Ceci pourrait être dû au fait que le mode supplémentaire LP_{02} est en réalité une superposition de deux modes.

Il est important de noter que les modes 6e et 7d ne sont pas des états stationnaires du système, mais sont plutôt une superposition des états LP_{31} et LP_{21} . À haute énergie, avec le laser mauve, il est plus difficile de séparer les modes les un des autres puisque le nombre de trajectoire que peut prendre un faisceau lumineux de moindre longueur d'onde est plus élevé. Il n'est donc pas étonnant que deux modes peuvent être excités simultanément.

4.3 Harmoniques sphériques

La fibre optique est un système physique aux conditions frontières et aux valeurs propres. Les solutions à ce système peuvent être comparées à des harmoniques sphériques avec nombres quantiques l et m [3]. Dans la figure 8, on peut voir que les harmoniques sphériques simulées correspondent bel et bien à la forme

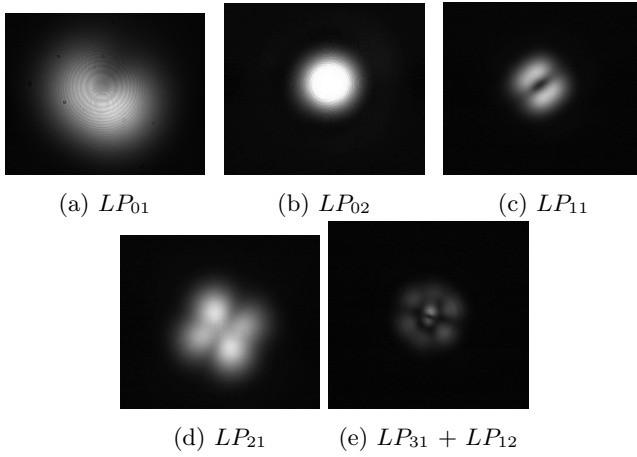


FIGURE 6 – Patrons de la fibre monomode A

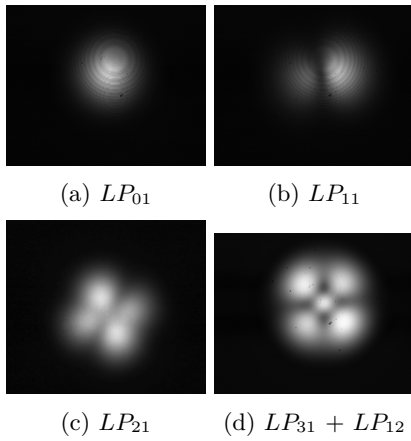


FIGURE 7 – Patrons de la fibre monomode B

des modes obtenus en laboratoire. Cependant, le formalisme d'harmoniques sphériques est seulement valide pour les modes créés par des faisceaux inclinés, i.e. des faisceaux qui font des réflexions rotationnelles successives autour de l'axe de la fibre. Pour les réflexions méridionales (dans l'axe de la fibre), les harmoniques sphériques ne sont plus aptes à recréer les modes correctement. De manière générale, un mode LP est méridional lorsque son second indice est supérieur à son premier, comme pour LP_{12} . Le problème est qu'avec les harmoniques sphériques le nombre m ne peut jamais dépasser le nombre l puisqu'il est confiné entre $-l$ et l . C'est pour cette raison qu'on ne peut pas simuler le mode illustré aux figures 6e et 7d.

5 Conclusion

En conclusion, il a été question de déterminer l'ouverture numérique d'une fibre multimode ($NA_{exp} = 0.22 \pm 0.01$) et de caractériser son patron de sortie en fonction de ses modes. De plus, nous avons réussi à identifier nos deux fibres optiques en déterminant leur ouverture numérique ($NA_A = 0.122 \pm 0.009$) et

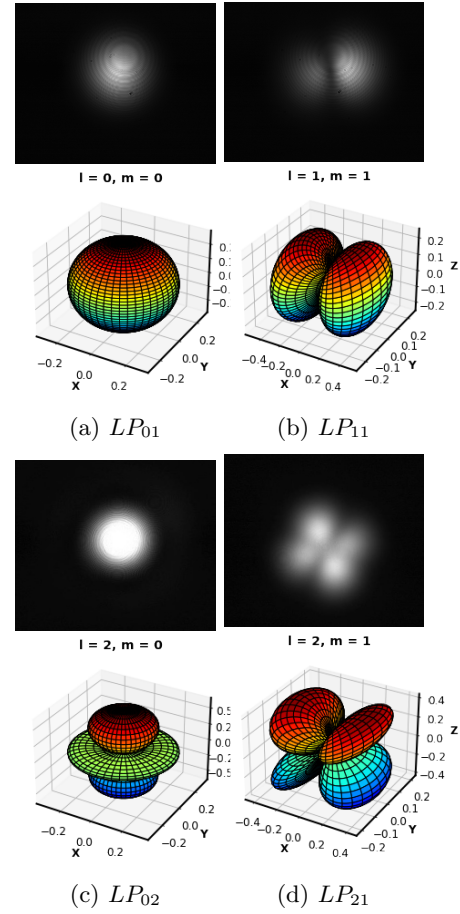


FIGURE 8 – Modes vs harmoniques sphériques [4]

($NA_B = 0.126 \pm 0.004$) et en trouvant le nombre de modes isolés que l'on pouvait exciter (**4 modes pour A et 3 modes pour B**). Finalement, nous avons démontré que plusieurs modes de la fibre optique pouvaient être simulés de manière satisfaisante avec des harmoniques sphériques, mais qu'il existait une limite pour les modes méridionales. Afin de pousser l'expérience plus loin, nous aurions pu nous intéresser à l'atténuation de la lumière dans la fibre optique.

Références

- [1] "Fiber Optic Basics." <https://www.newport.com/t/fiber-optic-basics>.
- [2] "What is the difference between single mode vs. multimode fiber? - TC Communications." <https://www.tccomm.com/Literature/Literature/Education/Single-mode-vs-multimode>.
- [3] D. R. Paschotta, "LP Modes." https://www.rp-photonics.com/lp_modes.html.
- [4] PyPhy, "Python," Sept., 2022. <https://github.com/PyPhy/Python/blob/f25a067db54589eb83ed1b03aa544a57db61601e/Physics/Harmonics.py>. original-date : 2019-10-20T13 :32 :39Z.