Diffusion d'un faisceau laser par une fibre optique

par Henri GAGNAIRE

Université Jean Monnet - Faculté des Sciences et Techniques 23, rue du Docteur Paul Michelon, 42023 Saint-Etienne Cedex 2

Une expérience qui n'a jamais été décrite dans cette revue et qui pourtant est simple à réaliser consiste à éclairer une fibre optique dénudée par un faisceau laser perpendiculaire à l'axe de la fibre. La lumière est diffusée dans un plan perpendiculaire à la fibre. Pour interpréter de manière correcte le diagramme de rayonnement obtenu, il faudrait utiliser la méthode de Mie déduite de la théorie électromagnétique de la lumière. Cette méthode est décrite de manière sommaire dans [1] et est reprise plus en détail en [2] pour la diffusion de la lumière par une fibre d'indice uniforme. Elle permet de calculer l'intensité de la lumière diffusée tout autour de la fibre quand on connaît le diamètre et l'indice de celle-ci. Calculs et expériences sont en excellent accord [2]. Par contre, il est impossible d'utiliser cette méthode pour faire l'opération inverse c'est-à-dire connaître les caractéristiques de la fibre à partir du diagramme de rayonnement. Nous allons voir qu'on peut atteindre ce but avec une théorie beaucoup plus simple, aisément compréhensible par des étudiants du premier cycle de l'enseignement supérieur.

DIAGRAMME DE RAYONNEMENT DE LA FIBRE

Le diagramme de rayonnement de la fibre est très contrasté lorsque la polarisation du faisceau incident est parallèle à l'axe de la fibre. Il est symétrique par rapport au faisceau incident et peut être décomposé arbitrairement en cinq parties. Lorsque l'angle θ de diffusion par rapport au faisceau incident augmente de 0 à 180°, on trouve successivement :

− la diffraction du faisceau incident par la fibre ($0 < \theta < \approx 10^{\circ}$).

– une alternance de franges sombres et brillantes que nous appellerons phénomène d'interférence dans la suite et que nous étudierons plus particulièrement ($\approx 10^{\circ} < \theta < \approx 80^{\circ}$).

– une «accumulation» de lumière lorsque θ est voisin de 100°. C'est l'équivalent pour une fibre optique éclairée par une lumière monochromatique du deuxième arc-en-ciel «atmosphérique».

- une zone où l'intensité diffusée est très faible. C'est l'équivalent de la bande noire d'Alexandre.

– une «accumulation» de lumière lorsque θ est voisin de 150°. C'est l'équivalent du premier arc-en-ciel «atmosphérique» [3].

Pour appréhender qualitativement le diagramme de rayonnement, phénomène de diffraction exclu, on peut considérer les différents rayons secondaires issus du même rayon incident (figure 1). Le nombre de réflexions à l'intérieur de la fibre est limité à deux. Il est facile de calculer la déviation des différents rayons en fonction de l'angle d'incidence i ou du paramètre d'impact X = sin i du rayon incident (figure 2). Les déviations des rayons R₁ et R₂ possèdent des extrema respectivement pour $\theta = 153^{\circ}$ et $\theta = 101^{\circ}$ (valeurs calculées pour n = 1,457, indice de la silice quand $\lambda = 633$ nm). Ces rayons sont donc responsables du premier et du deuxième arc en ciel. De la position de ces arcs-en-ciel on peut, a priori, déduire l'indice de la fibre [4].



Figure 1 : La figure montre les quatre rayons secondaires issus du même rayon incident.



La figure 2 montre qu'entre 101° et 153°, il n'existe que le rayon réfléchi d'où une assez faible quantité de lumière diffusée dans cette zone.

Par contre lorsque θ est inférieur à 80°, il existe deux rayons, l'un Re est réfléchi à la surface de la fibre, l'autre T est réfracté. Ces deux rayons ne correspondent pas à la même valeur des paramètres d'impact donc pas au même rayon incident (figure 3). Les ondes partielles associées à ces deux rayons peuvent interférer à l'infini. Les amplitudes que l'on doit associer à ces ondes partielles dépendent de la valeur des coefficients de réflexion et de transmission de Fresnel à l'interface fibre-air. Lorsque le faisceau incident est polarisé parallèlement à l'axe de la fibre, les amplitudes des deux ondes sont équivalentes [2]. Ceci explique le bon contraste des franges.



Figure 3 : La figure montre la différence de marche entre les deux rayons R_e et T déviés dans la même direction.

La différence de marche géométrique entre les deux ondes s'écrit en fonction de θ et de n.

$$\delta = D.f(n, \theta)$$

où D est le diamètre de la fibre

et
$$f(n,\theta) = \sin \theta/2 + (n^2 + 1 - 2n \cos \theta/2)^{1/2}$$

Le nombre N de franges entre deux angles θ_m et θ_M donnés $(\theta_m < \theta_M)$ est donc tel que :

$$N \lambda = D\left[f\left(n, \theta_{M}\right) - f\left(n, \theta_{m}\right)\right]$$

Nous avons vérifié que ce nombre N est identique à celui que l'on peut calculer à l'aide de la méthode de Mie [2]. Par conséquent il est ainsi possible de déterminer le diamètre D de la fibre, si son indice est connu, en comptant le nombre de franges entre deux angles donnés.

EXPÉRIENCES

Le dispositif expérimental est schématisé sur la figure 4. L'élément principal est un goniomètre BOUTY utilisé pour déterminer l'angle et l'indice d'un prisme. Pour cette expérience le collimateur qui permet d'obtenir un faisceau de rayons parallèles et la plateforme qui supporte le prisme ne sont pas nécessaires. Seuls sont conservés la lunette réglée sur l'infini et le dispositif de mesure des angles.



Figure 4 : Schéma du dispositif expérimental.

L'échantillon de fibre est maintenu dans le mandrin d'une mini perceuse ou plus simplement avec de la pâte à modeler. Il est éclairé par le faisceau d'un laser Hélium Néon de 2 mW, perpendiculaire à l'axe de la fibre. Le polariseur P₂ permet de rendre la polarisation de l'onde incidente parallèle à l'axe de la fibre. L'orientation du polariseur P₁ modifie la quantité de lumière reçue par la lunette. Quand les deux polariseurs sont pratiquement croisés, il est possible d'observer le phénomène d'interférence sans dommage pour l'œil. L'utilisation de lunettes de protection n'est pas nécessaire.

Dans un premier temps, on repère l'abscisse angulaire α_o du maximum de diffraction qui correspond à la direction du faisceau incident (ATTENTION : pas de visée directe dans ce cas. La valeur de α_o peut être déterminée en observant la lumière sur un écran situé après la lunette). Ensuite on repère les abscisses angulaires α_m et α_M de deux

franges sombres et le nombre N de franges entre α_m et α_M . Pour calculer D on utilise la relation précédente dans laquelle $\theta_M = \alpha_M - \alpha_0$ et $\theta_m = \alpha_m - \alpha_0$.

Nous avons étudié une fibre dont le diamètre nominal est 200 μ m. Le nombre de franges entre $\theta_m = 18,73^\circ$ et $\theta_M = 74,68^\circ$ est 257.

La valeur du diamètre est :

$$D = 192,7 \ \mu m$$

L'incertitude relative sur le diamètre est :

$$\Delta D / D = \left(\Delta f(\theta_{M}) + \Delta f(\theta_{m}) \right) / \left(f(n, \theta_{M}) - f(n, \theta_{m}) \right)$$

où Δf est l'incertitude sur la fonction $f(n,\theta)$ due à une incertitude de mesure sur $\theta.$

$$\Delta f = df/d\theta \ \Delta \theta$$

En première approximation, la fonction $f(n,\theta)$ varie linéairement avec θ entre 20° et 70°. On peut donc écrire :

$$f(n, \theta_M) - f(n, \theta_m) \approx K(\theta_M - \theta_m)$$

et

$$\Delta f = K.\Delta \theta$$

où K est une constante.

D'autre part l'expérience montre que l'incertitude de mesure $\Delta \theta$ sur la position angulaire d'une frange repérée dans la lunette est de l'ordre du sixième de l'interfrange.

L'interfrange moyen vaut $\theta_M - \theta_m/N$

donc

$$\Delta \theta \approx (\theta_{\rm M} - \theta_{\rm m}) / 6 {\rm N}$$

En définitive, la précision sur le diamètre est approximativement :

$$\Delta D/D \approx 1/3N$$

Elle est d'autant plus faible que N est grand. Pour la fibre que nous avons étudiée :

$$\Delta D/D \approx 0.15$$
 %

et nous pouvons écrire :

 $D = (192,7 \pm 0,3) \ \mu m$

Le nombre de franges est proportionnel au diamètre de la fibre. Pour éviter une expérience trop pénible, on peut étudier une fibre utilisée pour les télécommunications dont le diamètre extérieur est 125µm. L'indice d'une telle fibre n'est pas uniforme mais la différence d'indice entre le cœur et la gaine est suffisamment faible pour que les calculs précédents soient valables.

CONCLUSION

Nous avons montré qu'il est possible d'expliquer de manière assez simple le diagramme de rayonnement d'une fibre optique éclairé par un faisceau laser perpendiculaire à son axe.

Pour les angles de diffusion compris entre 10° et 80° la fibre optique peut être considérée comme un interféromètre.

D'autre part, une étude plus approfondie du phénomène d'interférence nous montre qu'il est possible de déterminer les défauts de circularité de la section d'un fibre. Il suffit d'enregistrer le déplacement très faible d'une frange donnée lorsqu'on fait tourner la fibre sur son axe. Il est possible de connaître la forme exacte de la section de la fibre [2].

De plus, le diamètre d'une fibre (supposée cette fois parfaitement circulaire) n'est pas constant le long de l'axe de la fibre. On peut connaître les variations du diamètre en comptant le nombre de franges qui défilent devant une direction donnée. Ce principe a permis de construire un appareillage permettant de détecter des variations de diamètre de $0,1 \mu m$ lors de la fabrication de la fibre [2].

BIBLIOGRAPHIE

- [1] H.C. VAN DE HULST, *Light scattering by small particles* (1957) New-York : John Wiley.
- [2] H. GAGNAIRE, Thèse d'État (1985) Saint-Étienne.

718 BULLETIN DE L'UNION DES PHYSICIENS

- [3] H.M. NUSSENZWEIZ, Scientific American (1977) nº 4, p. 116.
- [4] H.M. PRESBY, J. Opt. Soc. Am. (1974) : 64, p. 280.