Chapitre 2 : Endoscope et autres instruments optiques

La figure 2.1 illustre un endoscope. La fibre principale, composée en réalité d'un très grand nombre de fibres cohérentes (faisceau), est destinée à transporter l'image. Elle est entourée d'un faisceau de fibres incohérentes, destiné uniquement à éclairer les parois et tissus à visualiser. Chaque fibre individuelle a un diamètre de quelques microns. La figure 2.2 illustre la différence entre un faisceau de fibres cohérentes et un faisceau de fibres incohérentes.

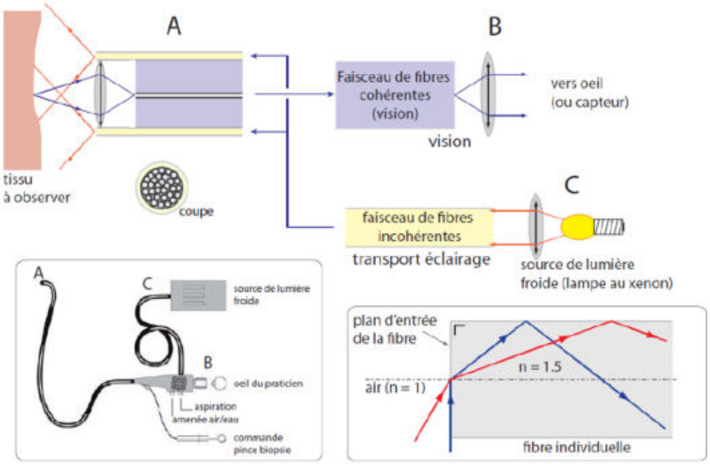


FIGURE *2.1* – Endoscope simplifié.

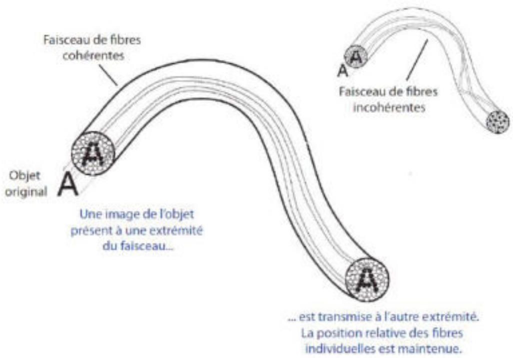


FIGURE *2.2* – Faisceau de fibres cohérentes et incohérentes.

Exercice 2.1 On s'intéresse dans un premier temps à une fibre individuelle simple telle qu'illustrée dans le cadre en bas à droite de la figure 2.1. Montrer que lorsqu'un rayon lumineux entre dans cette fibre au niveau du plan d'entrée, il est toujours transmis, quelque soit sa direction, pour autant que le plan d'entrée de la fibre soit perpendiculaire à l'axe de la fibre et que celle-ci soit utilisée dans l'air.

Rappels

Au passage d'un milieu d'indice de réfraction n_1 à un milieu d'indice de réfraction n_2, la direction de propagation de la lumière change selon la loi de Snell-Descartes :

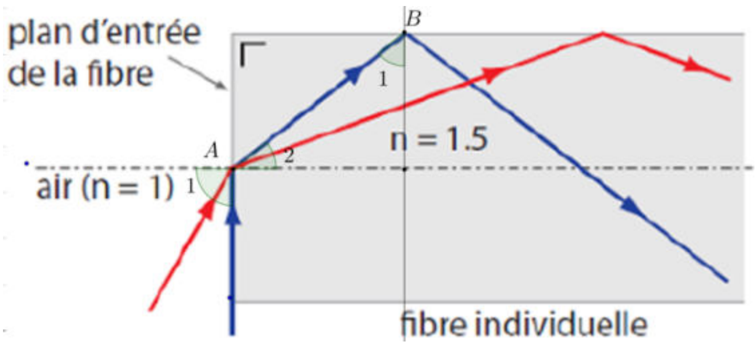
$$\boxed{n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2}$$

En passant d'un milieu plus réfringent (d'indice n_i) à un milieu moins réfringent (d'indice n_a), les rayons lumineux s'écartent de la normale. Lorsque l'angle d'incidence est égal à l'angle critique défini par :

$$\boxed{n_i \sin\theta_C = n_a}$$

l'angle de réfraction vaut 90°. Pour des valeurs supérieures de l'angle d'incidence, il y a réflexion totale

Solution



Si $A_1 = 90°$, alors $A_2 = \arcsin\dfrac{1}{1.5} = 41.8° \Rightarrow B_1 = 90° - A_1 = 90 - 41.2 = 48.2°$

Or l'angle limite verre/air est précisément de $41.8°$. Le rayon en B sera donc complètement réfléchi.

Exercice 2.2 Une fibre individuelle, placée dans un faisceau de fibres cohérentes, doit être entourée d'une gaine servant à la fois à la protéger et à éviter qu'un rayon ne se propage de fibre en fibre, annulant alors la cohérence. Cette configuration est illustrée à la figure 2.3.

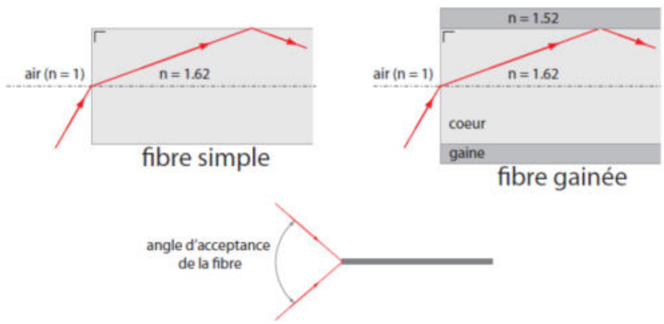


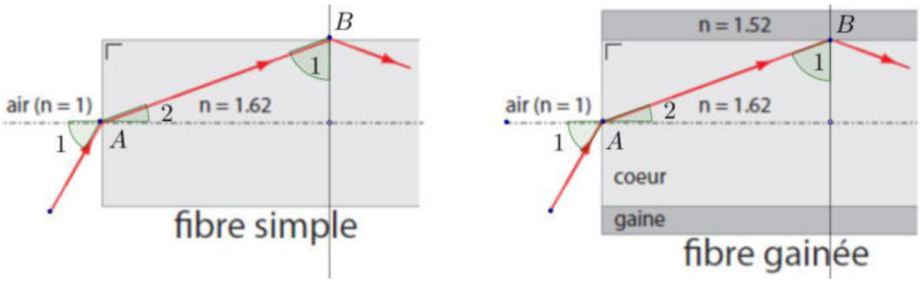
FIGURE 2.3 – Fibre simple et gainées - Angle d'acceptance (exercice 2.2).

1. Expliquer pourquoi un rayon pourrait se propager d'une fibre à l'autre en l'absence de gaine.
2. Comparer les valeurs relatives des indices de la gaine et du cœur.

L'angle d'acceptance d'une fibre est illustré à la figure 2.3. Il correspond à l'ouverture angulaire maximale vérifiant les conditions de réflexion totale.

1. Calculer l'angle d'acceptance d'une fibre simple d'indice 1.62. Cette fibre est utilisée dans l'air.
2. Calculer l'angle d'acceptance d'une fibre d'indice de cœur 1.62, entourée d'une gaine d'indice 1.52. Cette fibre est utilisée dans l'air.

Solution



1.1 Si il n'y a pas de gaine, et que les fibres sont collées l'une à l'autre, alors un rayon lumineux passera facilement de l'un à l'autre puisque'il reste dans le même milieu.

1.2 La gaine est plus réfringeante que le coeur.

L'angle limite coeur/gaine est : $\alpha_L = \arcsin\dfrac{1.52}{1.62} = 69.76°$.

Autrement dit pour avoir une réflexion totale, il faut que l'angle d'incidence soit $> 69.76°$

2.1 L'angle limite coeur/air est : $\alpha_L = \arcsin(1/1.62) = 38.12°$

Il faut donc que l'angle B_1 soit $\geq$ $38.12° \Rightarrow A_2 \leq 90° - 38.12° = 51.88°$

Ce qui est toujours vérifié car même si $A_1 = 90° \Rightarrow A_2 = \alpha_L = 38.12°$

L'angle d'acceptance est donc de 180°

2.2 En vertu de 1.2, il faut que l'angle $B_1 \geq 69.76°$. Donc l'angle $A_2 \leq 90° - 69.76° = 20.24°$.

On en déduit l'angle $A_1 = \arcsin(1.62 \sin 20.24) = 34°$

l'angle d'acceptance est alors de $2 \times 34° = 68°$

Exercice 2.3 Un chirurgien souhaite inspecter une cavité avec un endoscope utilisant une fibre optique. Cependant, la cavité est remplie d'un liquide clair, d'indice de réfraction identique à celui de l'eau ($n = 1,33$). Le chirurgien dispose d'un endoscope sans lentille à l'extrémité A (voir figure 2.1). Si cet instrument est composé de fibres gainées telles que décrites en figure 2.3 et qu'il a été conçu pour travailler dans l'air, quelles sont les conséquences lorsque le chirurgien se retrouve à devoir travailler dans un milieu tel que celui décrit ? Justifier.

Solution

En partant des résultats de l'exercice précédent, on a immédiatement :

$$A_1 = \arcsin\left(\frac{1.62}{1.32}\sin 20.24°\right) = 24.92°$$

L'angle d'acceptance est donc réduit à environ 50°

Exercice 2.4 Dessiner le schéma d'un petit miroir de dentiste, à fixer au bout d'une tige, pour pouvoir voir au fond de la bouche d'un patient. Les exigences sont (1) que le dentiste puisse voir une image redressée et (2) qu'il produise une image agrandie deux fois lorsqu'on le tient à 1,5 cm d'une dent.

Rappels

Dans l'approximation paraxiale, la distance objet p et la distance image q sont liées à la distance focale f d'un miroir sphérique par la formule des miroirs.

$$\boxed{\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}}$$

Les grandeurs réelles sont positives et les grandeurs virtuelles sont négatives.
La distance focale est égale à la moitié du rayon de courbure du miroir.

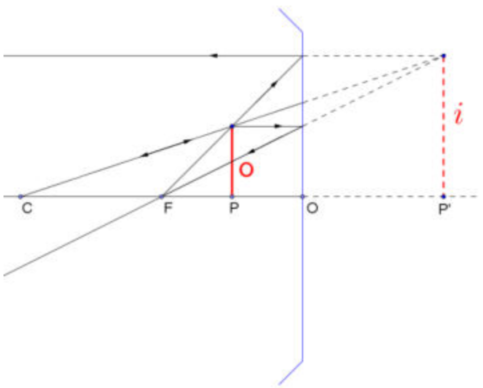
$$\boxed{f = \frac{R}{2}}$$

R est positif dans le cas d'un miroir concave et négatif dans le cas d'un miroir convexe.
Le grandissement transversal d'une image est donné par :

$$\boxed{m = \frac{y_i}{y_0}}$$

où y_i et y_o sont respectivement la hauteur de l'image et de l'objet.

Solution



Il faut un miroir sphérique concave

$$\frac{i}{o} = -\frac{p'}{p} \Rightarrow p' = -2p = -3 \text{ cm}$$

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f} \Rightarrow \frac{1}{1.5} - \frac{1}{3} = \frac{1}{f} \rightarrow f = 3$$

Conclusion : miroir sphérique concave de rayon $OC = 6$ cm