

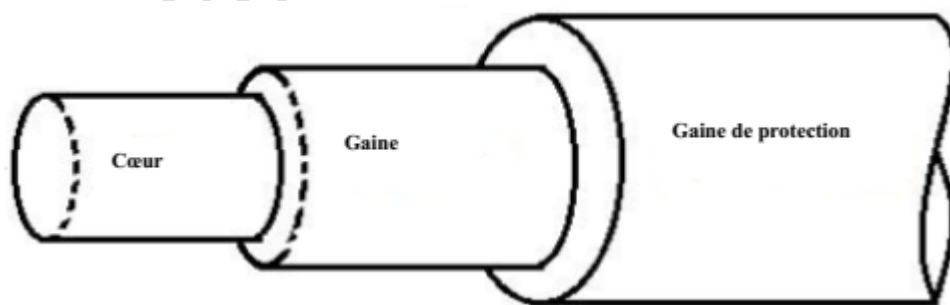


# Propagation de la lumière dans une fibre optique

L'énergie lumineuse peut être modélisée sous trois formes différentes qui relient un modèle particulier de lumière au contexte dans lequel il est parlé. La lumière peut être caractérisée dans l'un des modèles suivants:

- Modèle de rayon
- Modèle d'onde
- Modèle quantique

Dans le contexte le plus simple possible, la lumière est traitée comme un rayon et les différents phénomènes présentés par la lumière sont expliqués en termes de modèle de rayon de la lumière. Certains phénomènes présentés par la lumière ne sont pas suffisamment expliqués par le modèle de rayon de la lumière. Dans ce cas, nous recourons à la nature plus avancée de la lumière comme le modèle d'onde et le modèle quantique. Dans cette section, nous traiterons principalement du modèle de rayon de la lumière et nous allons tenter d'expliquer la propagation de la lumière dans la fibre optique traitant la lumière comme un rayon. Sur le plan de la construction, une fibre optique est une tige de verre cylindrique solide appelée cœur, à travers laquelle se propage la lumière sous forme de signaux optiques. Cette tige est entourée d'une autre coque cylindrique coaxiale en verre d'indice de réfraction plus faible appelée gaine. Cette composition de base qui guide la lumière sur de longues distances est illustrée à la figure 1.

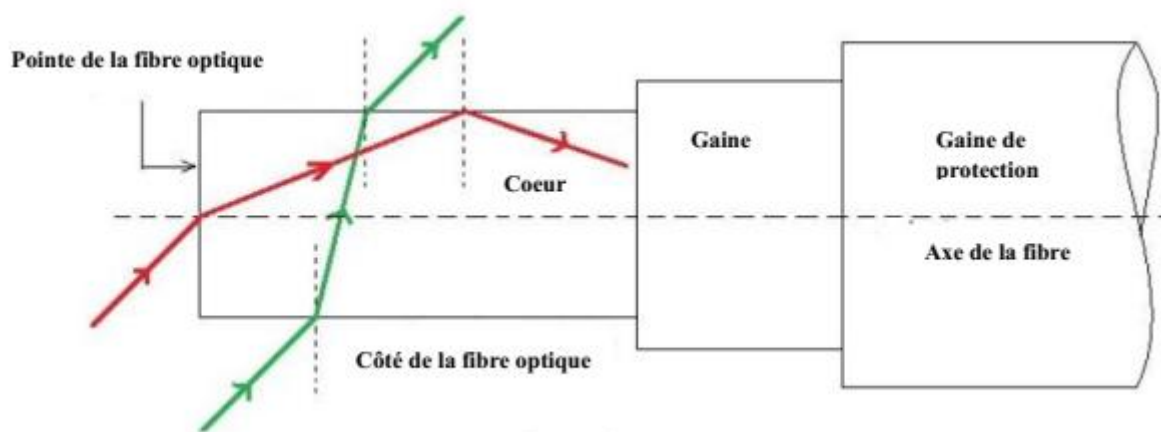


**Fig.1: Détails de construction d'une fibre optique**

Le diamètre de la gaine est de l'ordre de 125  $\mu\text{m}$  et le diamètre de cœur est encore plus petit que cela. Il s'agit donc d'une tige de verre très fine et cassante. Afin de fournir une résistance mécanique à cet agencement de cœur-gaine, d'autres enveloppes coaxiales appelées couches de revêtement et de protection sont fournies. Ils ne jouent aucun rôle dans la propagation de la lumière à travers la fibre optique, mais

sont uniquement présents pour fournir une résistance mécanique et un support à la fibre. L'énergie lumineuse sous forme de signaux optiques se propage à l'intérieur de l'agencement de coeur-gaine et sur toute la longueur de la fibre par un phénomène appelé réflexion totale interne (RTI) de la lumière. Ce phénomène ne se produit que lorsque l'indice de réfraction du coeur est supérieur à l'indice de réfraction de la gaine. Par de multiples réflexion totale interne à l'interface coeur-gaine, la lumière se propage à travers la fibre sur de très longues distances avec une faible atténuation.

Nous allons maintenant discuter les exigences essentielles de la propagation de la lumière à travers une fibre optique, sur des longues distances avec une perte minimale, en détail. La figure 2 montre un coupe du coeur d'une fibre optique. Si un rayon de lumière est incident sur le coeur d'une fibre optique de côté, le rayon se réfracte simplement à partir de la fibre de l'autre côté. Le rayon montré sur la figure 2 (en vert) montre la situation.

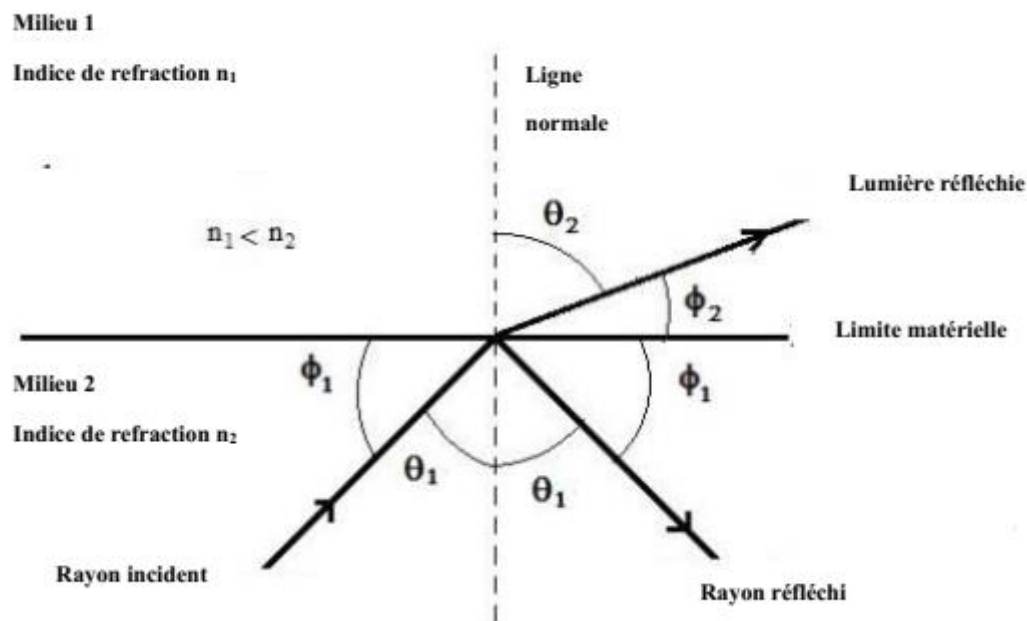


**Fig.2: Lancement de la lumière dans une fibre optique.**

Quel que soit l'angle d'incidence de la lumière, toute lumière qui pénètre latéralement dans la fibre ne se propage pas le long de la fibre. La seule option ainsi disponible chez nous est de lancer la lumière par le bout de la fibre. C'est-à-dire que pour guider la lumière le long de la fibre, la lumière doit être incidente depuis l'extrémité de la fibre optique. Le rayon de lumière rouge de la figure 2 explique cette situation. En d'autres termes, si la pointe de la fibre optique n'est pas exposée à la lumière, aucune lumière n'entrera dans la fibre. Bien qu'il puisse y avoir de la lumière ambiante, tant que la pointe est protégée, aucune lumière provenant des côtés ne se propage le long de la fibre. De même, s'il y avait propagation de la lumière à travers la fibre, aucune lumière n'émergerait des côtés de la fibre. Cette caractéristique de la fibre optique confère l'avantage de la sécurité de l'information à la technologie de communication à fibre optique. À ce stade, une question fondamentale qui peut venir à l'esprit du lecteur est de savoir si une

réflexion partielle à l'interface cœur-gaine suffit à propager la lumière le long de la fibre sur de longues distances? La réponse à cette question est très clairement non. La raison en est qu'à chaque réflexion, une partie de l'énergie optique lancée dans la fibre optique serait perdue et après une certaine distance sur le long de la fibre optique la puissance optique serait négligeable pour être utile. Ainsi, une réflexion totale interne est une nécessité absolue à chaque réflexion pour une propagation soutenue de l'énergie optique sur une longue distance le long de la fibre optique. C'est précisément la seule raison pour laquelle la lumière est projetée dans la fibre selon des angles particuliers, de sorte que l'énergie lumineuse se propage le long de la fibre par de multiples réflexions internes totales au niveau à l'interface cœur-gaine.

Nous avons déjà déclaré que pour expliquer la propagation de la lumière dans une fibre optique, le modèle de rayon doit être utilisé. Le modèle de rayon obéit aux lois de Snell. La figure suivante illustre une situation d'un phénomène de réfraction typique se produisant à l'interface de deux milieux optiquement différents ayant des indices de réfraction  $n_1$  et  $n_2$



$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2$$

**Fig.3: Réfraction de la lumière à une interface média**

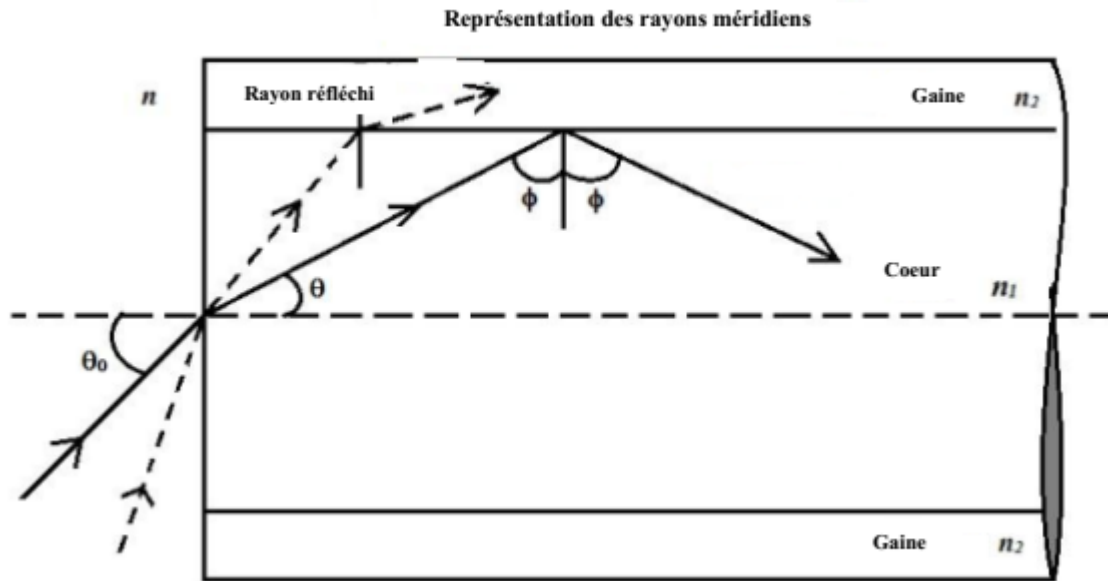
Les angles mesurés dans l'expression de la loi de Snell sont mesurés par rapport à la normale à limite material au point d'incidence. Si  $n_2 > n_1$ , alors l'angle de réfraction est supérieur à l'angle d'incidence et le rayon réfracté se serait éloigné de la normale. Si l'angle d'incidence ( $\theta_1$ ) est encore augmenté, l'angle de réfraction ( $\theta_2$ ) augmente également conformément à la loi de Snell et à un angle d'incidence particulier,

l'angle de réfraction devient  $90^\circ$  et le rayon réfracté **broute** le long de l'interface du média. Cet angle d'incidence est appelé angle d'incidence critique ( $\theta_c$ ) du milieu 2 par rapport au milieu 1. Il convient de noter ici que l'angle critique est relative au support. Cela signifie que le même milieu optiquement plus dense peut avoir des angles critiques différents par rapport à différents milieux optiquement plus rares. Si  $\theta_1$  est augmenté au-delà de l'angle critique, il n'y a pas de rayon réfracté et le rayon lumineux incident est ensuite renvoyé dans le même milieu. Ce phénomène est appelé réflexion totale interne de la lumière. Le mot «total» signifie que toute l'énergie lumineuse qui était incidente sur l'interface média est reflétée dans le même milieu. La réflexion totale interne (RIT) obéit aux lois de la réflexion de la lumière. Ce phénomène montre que l'énergie lumineuse peut être amenée à rester confinée dans le même milieu lorsque l'angle d'incidence est supérieur à l'angle de réflexion. Ainsi, nous pouvons voir qu'il y a deux exigences de base pour qu'un RIT se produise:

1. Le milieu à partir duquel la lumière est incidente doit être optiquement plus dense que le milieu auquel il est incident. Dans la figure 3  $n_2 > n_1$ .
2. L'angle d'incidence dans le milieu plus dense doit être supérieur à l'angle critique du milieu plus dense par rapport au milieu plus rare.

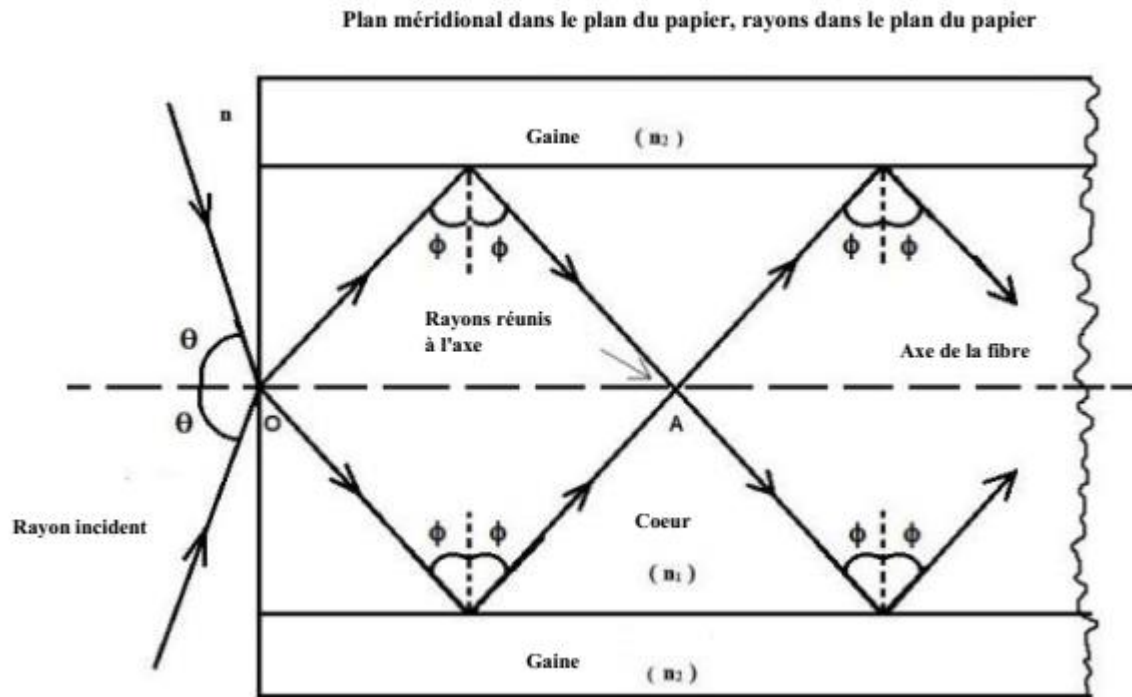
## LANCEMENT DE LA LUMIÈRE DANS UNE FIBRE OPTIQUE

Avant de plonger dans des calculs mathématiques rigoureux, voyons d'abord comment l'énergie lumineuse peut être lancée dans une fibre. La figure 4 montre l'une des possibilités de lancer de la lumière dans une fibre optique où le rayon lumineux se trouve dans un plan contenant l'axe de la fibre optique. De tels plans qui contiennent l'axe des fibres sont appelés plans méridiens et, par conséquent, les rayons se trouvant dans un plan méridien sont appelés rayons méridiens. Les rayons méridiens restent toujours dans le plan méridien respectif.



**Fig.4: Lancement des rayons méridionaux**

Il peut y avoir un nombre infini de plans qui passent par l'axe de la fibre et par conséquent il y a un nombre infini de plans méridiens. Cela indique indirectement qu'il existe également un nombre infini de rayons méridiens, qui sont incidents sur la pointe de la fibre faisant un angle avec l'axe des fibres, comme le montre la figure ci-dessus. Ces rayons méridiens qui sont totalement réfléchis à l'intérieur à l'interface cœur-gaine se rencontrent à nouveau sur l'axe de la fibre optique comme le montre la figure 5 ci-dessous. Sur la figure, le plan méridien est le plan du papier qui passe par l'axe de la fibre et les rayons incidents, les rayons réfractés et les rayons réfléchis se trouvent sur le plan du papier. Bien que seuls deux rayons soient représentés sur la figure par souci de clarté, en pratique, il y aurait un nombre de rayons qui seraient convergents au même point. Les rayons méridiens sont classés en rayons liés et non liés. Les rayons qui subissent RIT à l'intérieur du cœur de fibre restent à l'intérieur du cœur à tout moment le long de la propagation et sont appelés rayons liés. Les rayons qui ne subissent pas de RIT à l'intérieur du noyau sont perdus dans la gaine et sont appelés rayons non liés. Le rayon en pointillé montré sur la figure 4 est un rayon méridien non lié.

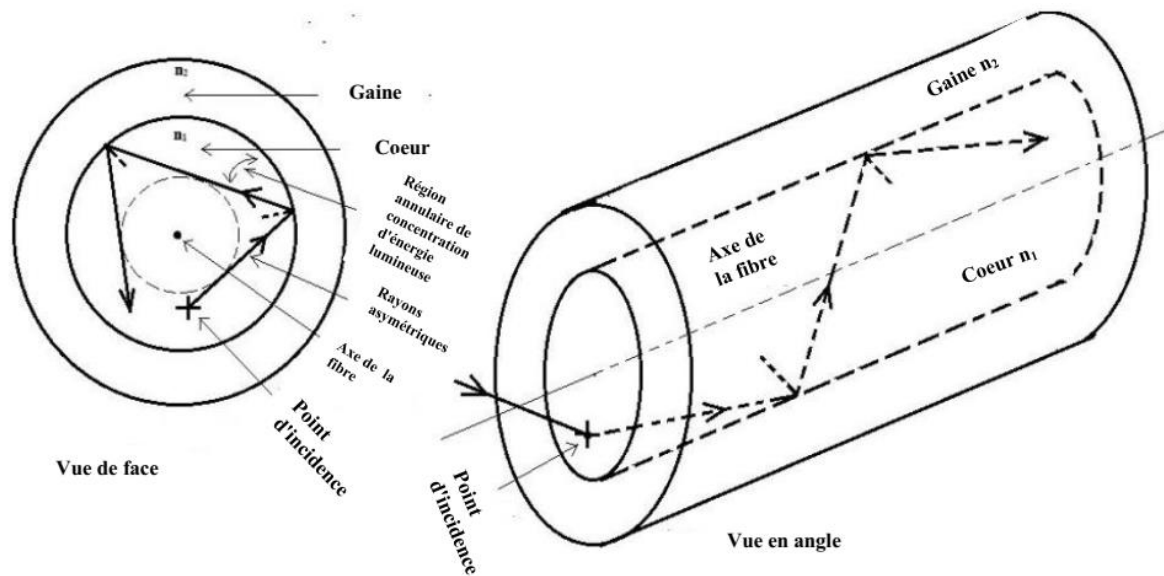


**Fig.5: Rayons méridionaux se rencontrant sur l'axe.**

Comme tous les rayons réfléchis se rencontrent au même point, une région de forte intensité optique est générée à ce point (point A sur la figure 5). Étant donné que ces rayons subissent de RIT à l'interface cœur-gaine, ils se rencontrent à plusieurs reprises sur l'axe à des intervalles réguliers le long de la fibre. Cela provoque plusieurs régions d'intensité maximale le long de l'axe de la fibre. De plus, différents rayons incidents des ensembles auraient des angles de réflexion différents à l'interface cœur-gaine et, par conséquent, auraient différents points d'intensité maximale le long de l'axe de la fibre. Ainsi, il peut être facilement visualisé qu'à l'extrémité de sortie de la fibre optique, l'intensité maximale sera dans la région axiale du cœur de la fibre et l'intensité diminuera progressivement à mesure que nous nous éloignons de l'axe vers la périphérie du noyau.

Une autre façon de lancer un rayon lumineux dans une fibre optique est de le lancer de telle sorte qu'il ne se trouve dans aucun plan méridional. Ces rayons sont appelés rayons asymétriques. Une représentation imagée du lancement d'un rayon oblique est illustrée dans la figure 6 ci-dessous.





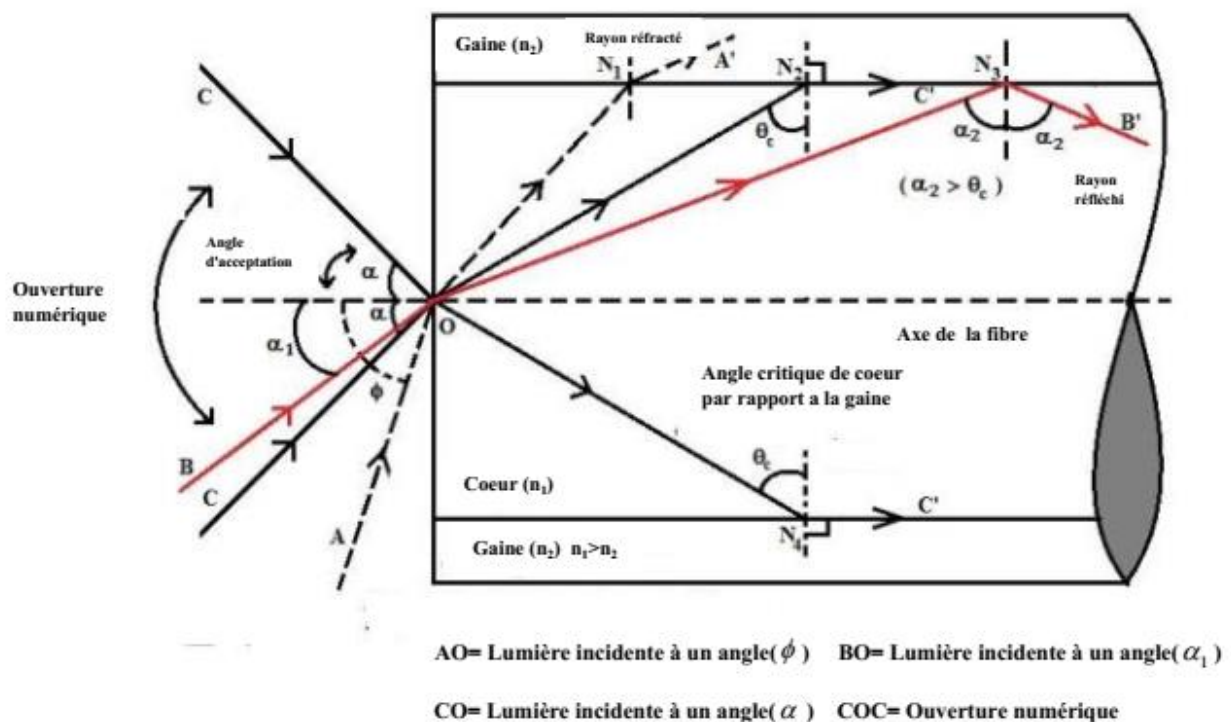
**Fig.6: Lancement des rayons obliques**

Les rayons asymétriques se propagent sans passer par l'axe central de la fibre. En fait, les rayons asymétriques continuent de tourner en spirale autour de l'axe de la fibre optique. L'énergie lumineuse qu'ils transportent est effectivement confinée à une région annulaire autour de l'axe comme le montre la figure 6. Par conséquent, en sortie, les rayons asymétriques auront une énergie minimale sur l'axe de la fibre optique et augmenteront progressivement vers le périphérie du coeur. Ainsi, lorsque l'énergie lumineuse est lancée dans une fibre optique, il se produit deux distributions d'énergie possibles; l'un, qui a une intensité maximale à l'axe en raison des rayons méridiens et l'autre, qui a une intensité minimale à l'axe en raison des rayons asymétriques. Ainsi, dans l'ensemble, il existe deux façons de lancer la lumière dans une fibre optique; la lumière peut être lancée sous forme de rayons méridiens ou asymétriques.

En supposant que la lumière est lancée sous forme de rayons méridiens dans la fibre optique, effectuons maintenant une analyse simple. Pour cela, concentrons-nous sur la figure 7 ci-dessous. La figure montre une coupe transversale d'une fibre optique avec un noyau d'indice de réfraction  $n_1$  et une gaine d'indice de réfraction  $n_2$ . Le rayon incident AO (représenté par une ligne pointillée) est incident à un angle  $\phi$  avec l'axe de la fibre. Le rayon réfracté pour AO dans le coeur (ligne pointillée ON1) ne parvient pas à être incident à un angle supérieur ou égal à l'angle critique à l'interface coeur-gaine et donc réfracte hors du coeur et est perdu pour le revêtement. En d'autres termes, l'angle d'incidence d'un rayon réfracté à l'interface coeur-gaine dépend à son tour de l'angle initial auquel le rayon entrant a été lancé dans la fibre. Si cet angle de lancement (avec l'axe des fibres) est diminué, l'angle d'incidence que fait le rayon réfracté



à l'interface cœur-gaine augmente. Si cette augmentation est telle qu'elle dépasse l'angle critique de l'interface cœur-gaine, puis une réflexion totale interne du rayon réfracté a lieu et la lumière reste dans le cœur et est guidée le long de la fibre. Le rayon CO est lancé dans la fibre à un angle « $\alpha$ » tel que son rayon réfracté est incident à l'interface cœur-gaine à son angle critique « $\theta_c$ ». Si un rayon lumineux est lancé à un angle supérieur à  $\alpha$ , le rayon réfracté se réfracte simplement vers la gaine, car l'angle d'incidence de son rayon réfracté à l'interface cœur-gaine est inférieur à l'angle critique. Ainsi l'angle  $\alpha$  est indicatif de l'angle de lancement maximum possible d'un rayon lumineux accepté par la fibre. Par conséquent, l'angle  $\alpha$  est appelé angle d'acceptation du cœur de fibre.



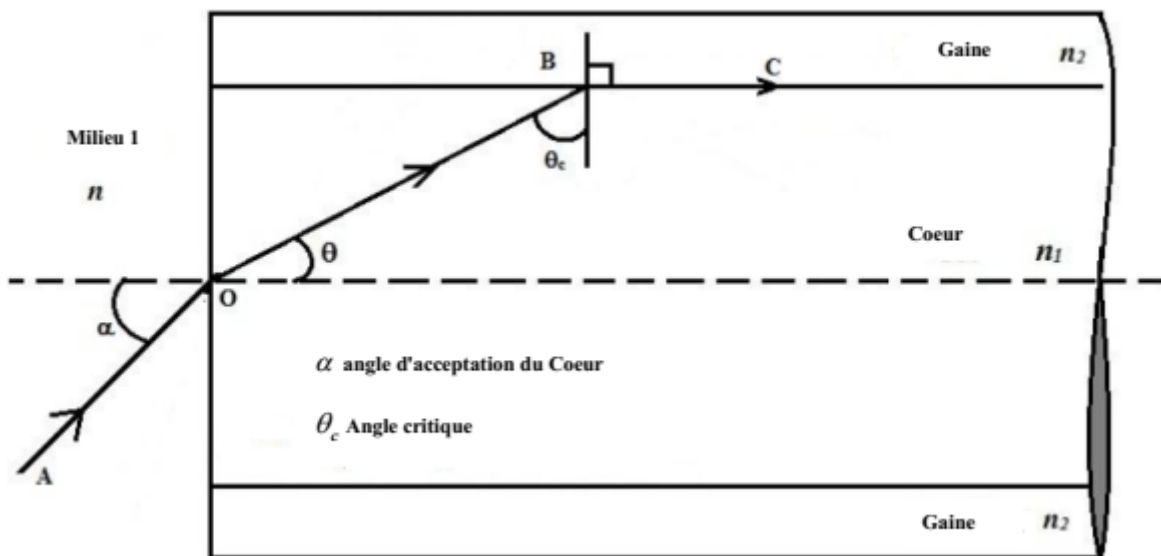
Fig,7: Lancement de la lumière dans une fibre optique

La fibre optique étant symétrique par rapport à son axe, il est très clair que tous les rayons lancés, qui font un angle  $\alpha$  avec l'axe, considérés ensemble, forment une sorte de cône. Ce cône d'acceptation est appelé **ouverture numérique** de la fibre comme le montre la figure ci-dessus. Tout rayon lancé qui se trouve à l'intérieur de ce cône est accepté par la fibre et la lumière de ce rayon est guidée le long de la fibre grâce à de multiples RIT comme le montre le rayon rouge BO sur la figure 7.

## OUVERTURE NUMÉRIQUE DE LA FIBRE OPTIQUE

Avec la même hypothèse initiale de lancement méridien de la lumière dans une fibre optique, considérons la figure 8 ci-dessous. La figure 8 montre une coupe transversale d'un coeur d'indice de réfraction  $n_1$  et d'une gaine d'indice de réfraction  $n_2$  qui entoure le noyau en verre. Un rayon incident AO est incident à partir du milieu 1 à la pointe de la fibre faisant un angle  $\alpha$  avec l'axe de la fibre, qui est l'angle d'acceptation de la fibre. Le rayon réfracté de ce rayon incident dans le coeur est alors incident à l'interface coeur-gaine à l'angle critique  $\theta_c$  du coeur par rapport à la gaine. L'angle de réfraction pour l'angle d'incidence critique est de  $90^\circ$  et le rayon réfracté broute ainsi le long de la limite de gaine centrale le long de BC, comme le montre la figure 8. Selon les lois de Snell, les rayons incident et réfractés se trouvent dans le même plan méridien, qui est le plan du papier dans ce cas. En appliquant la loi de Snell à l'interface coeur-gaine, nous obtenons:

$$n \sin(\alpha) = n_1 \sin(\theta) \quad (1)$$



figure

D'après la figure, il est clair que  $\theta = \frac{\pi}{2} - \theta_c$  équation (3.1), on obtient:

$$\sin \alpha = \frac{n_1}{n} \cos \theta_c \quad (2)$$

À partir des rapports trigonométriques de base,

$$\cos \theta_c = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_c} \quad (3)$$

En appliquant la loi de Snell à l'interface cœur-gaine, nous obtenons:

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

Donc:

$$\cos \theta_c = \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} \quad (4)$$

En substituant l'équation (4) à l'équation (2), nous obtenons:

$$\sin \alpha = \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n}}$$

Puisque le milieu initial 1 à partir duquel la lumière est lancée est de l'air la plupart du temps,  $n = 1$ . L'angle  $\alpha$  est indicatif de la capacité d'acceptation de la lumière de la fibre optique.

Plus la valeur de  $\alpha$  est élevée, plus la lumière est acceptée par la fibre optique. En d'autres termes, la fibre optique agit comme une sorte d'ouverture qui n'accepte qu'une partie de l'énergie lumineuse totale qui y est incidente. L'efficacité d'acceptation de la lumière de cette ouverture est donc indiquée par  $\sin \alpha$  et, par conséquent, cette quantité est appelée ouverture numérique (O.N.) de la fibre optique. Ainsi, pour une fibre optique dans l'air, avec un indice de réfraction de cœur  $n_1$  et un indice de réfraction de gaine  $n_2$  et ayant un angle d'acceptation de  $\alpha$  est donné par

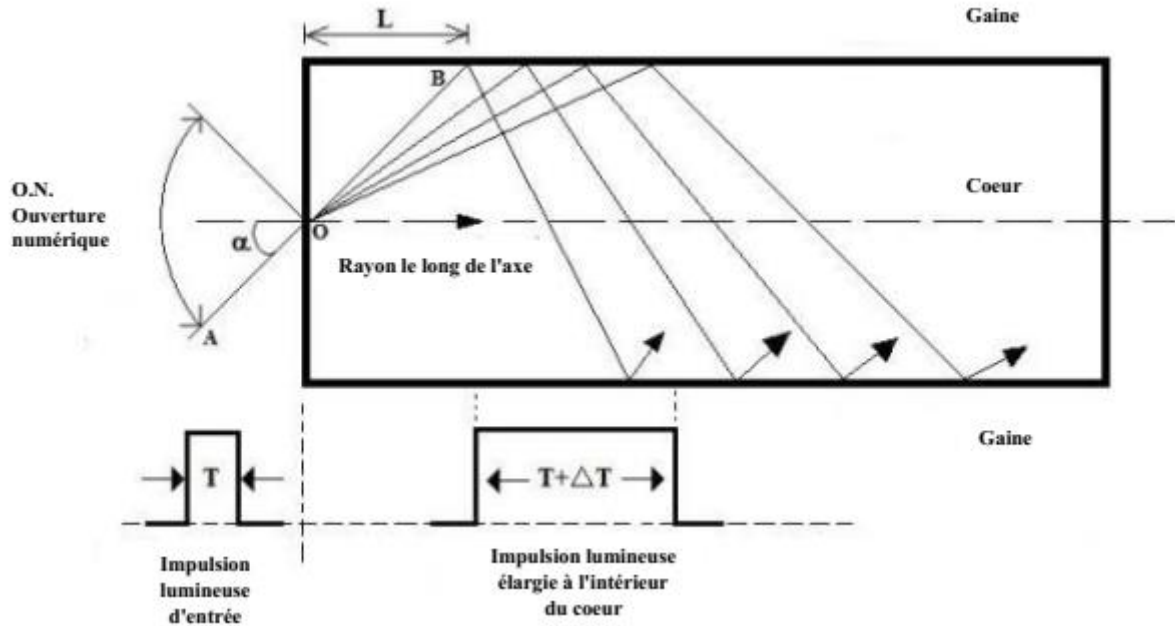
$$O.N. = \sin \alpha = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (5)$$

L'ouverture numérique est l'une des quantités les plus fondamentales d'une fibre optique. Il indique l'efficacité de collecte de lumière d'une fibre optique. Plus la valeur de O.N. est grande, meilleure la fibre. Pour des valeurs supérieures de O.N., la différence sur le côté droit de l'équation 5 doit être maximisée. Pour maximiser la différence, soit l'indice de réfraction du noyau ( $n_1$ ) doit être augmenté, soit l'indice de réfraction de la gaine ( $n_2$ ) doit être réduit. Le cœur utilisée étant toujours en verre, la valeur de son indice de réfraction  $n_1$  est donc fixe (environ 1,5). La seule option ainsi disponible chez nous est de réduire la valeur de  $n_2$ . Mais il a aussi une limitation de la valeur la plus basse de 1 pour l'air car jusqu'à ce jour aucun matériau n'est connu qui a un indice de réfraction inférieur à cela. Si nous faisons  $n_2 = 1$ , nous obtiendrions alors le N.A. maximum possible pour une fibre optique. Mais alors nous parlons essentiellement de retirer le revêtement car, s'il y a un revêtement, la valeur de  $n_2$  sera toujours supérieure

à 1. Ainsi, on peut clairement dire que du point de vue de l'efficacité d'acceptation de la lumière, la présence d'un revêtement n'est pas souhaitable.

La discussion ci-dessus suggère que, bien que la fibre optique soit composée d'un cœur et d'une gaine, la présence du gaine n'est pas souhaitable car elle réduit l'efficacité d'acceptation de la lumière de la fibre optique. Cependant, avec une réflexion approfondie, on peut se rendre compte que la préoccupation principale derrière une recherche prolongée sur les fibres optiques n'était pas seulement de mettre la lumière à l'intérieur d'une fibre optique avec la meilleure efficacité mais aussi de propager la lumière sur de longues distances avec le moins d'atténuation. Cela signifie que si nous avons une source de signal optique et une fibre optique avec le plus haut rendement d'acceptation de la lumière mais incapable de propager la lumière acceptée; la fibre optique n'est d'aucune utilité malgré sa haute O.N. Il serait donc très inapproprié de juger de la nécessité d'un gainage uniquement sur la base de l'efficacité de lancement de la lumière. En d'autres termes, l'efficacité de lancement de la lumière n'est qu'un des aspects caractéristiques clés d'une fibre optique. Il existe également d'autres attributs qui doivent être pris en compte lors de la détermination de la qualité d'une fibre optique. L'un de ces attributs d'une fibre optique est sa largeur de bande. De larges bandes passantes sont souhaitables pour des débits de transmission élevés.

Lorsque la fibre optique est utilisée pour la transmission d'informations, le signal lumineux qui y est lancé ne peut pas être de nature continue. Pour qu'un signal porteur transporte des informations, une ou plusieurs de ses caractéristiques doivent être modifiées en fonction du signal de données. Dans une fibre optique, la lumière est lancée sous forme d'impulsions optiques pour transmettre les informations requises. L'énergie lumineuse lancée dans la fibre peut être considérée sous la forme de nombreux rayons voyageant conformément au modèle des rayons. Ces rayons parcourent différents chemins à l'intérieur du cœur d'une fibre optique car différents rayons lumineux sont incidents sur la pointe de la fibre optique à différents angles à l'intérieur du cône d'acceptation lui-même. Cela fait que différents rayons lumineux dans le cône d'acceptation se déplacent le long de différents chemins dans le cœur de la fibre optique et prennent en conséquence différents intervalles de temps pour parcourir également une distance donnée, ce qui conduit à un phénomène d'élargissement des impulsions à l'intérieur du cœur de la fibre optique. Ainsi, l'impulsion de lumière qui pouvait à l'origine être de largeur  $T$  secondes maintenant pourrait être de  $T + \Delta T$  secondes à l'intérieur du cœur de fibre. La figure 3.9 ci-dessous décrit une description illustrée de la façon dont l'impulsion lumineuse s'élargit à l'intérieur du cœur de la fibre.



**Fig.9: élargissement d'impulsion à l'intérieur du cœur de la fibre optique**

Tout rayon incident qui se trouve dans le cône d'acceptation est guidé à l'intérieur de la fibre optique grâce à de multiples réflexions internes totales. Etant donné que l'angle de réfraction, les différents rayons incidents sont différents, ils se déplacent le long de différents chemins dans la fibre optique, comme indiqué sur la figure ci-dessus. Cela provoque l'élargissement de l'impulsion lumineuse étroite initialement lancée, comme illustré dans la figure 9. La quantité d'élargissement est mesurée en termes d'augmentation de la largeur de temps d'impulsion et est notée  $\Delta T$ . la valeur de  $\Delta T$  est donnée par:

$$\Delta T = \frac{L}{c} \frac{n_1 (n_1 - n_2)}{n_2} \quad (6)$$

Où,  $\Delta T$  = élargissement d'impulsion;  $c$  = vitesse de la lumière dans l'espace libre;

La quantité  $L$  est la distance horizontale parcourue avant de subir la première réflexion totale interne par le rayon réfracté  $OB$  qui correspond au rayon incident  $AO$ , incident à l'angle d'acceptation comme illustré sur la figure. La quantité d'élargissement d'impulsion est effectivement la différence de temps de déplacement entre le rayon se déplaçant le long de l'axe et le rayon incident  $AO$ . Cet effet d'élargissement d'impulsion signifie que si une deuxième impulsion est maintenant lancée dans la fibre dans l'intervalle de temps  $T + \Delta T$ , les deux impulsions se chevauchent et aucune donnée identifiable ne sera obtenue sur la sortie. Ainsi, pour une longueur  $L$  donnée, il y aurait une valeur correspondante de  $\Delta T$  (de l'équation 6) qui limiterait la vitesse à laquelle des impulsions lumineuses peuvent être lancées dans la fibre optique. En d'autres termes, il limite la vitesse à laquelle les données peuvent être transmises le long de la fibre.

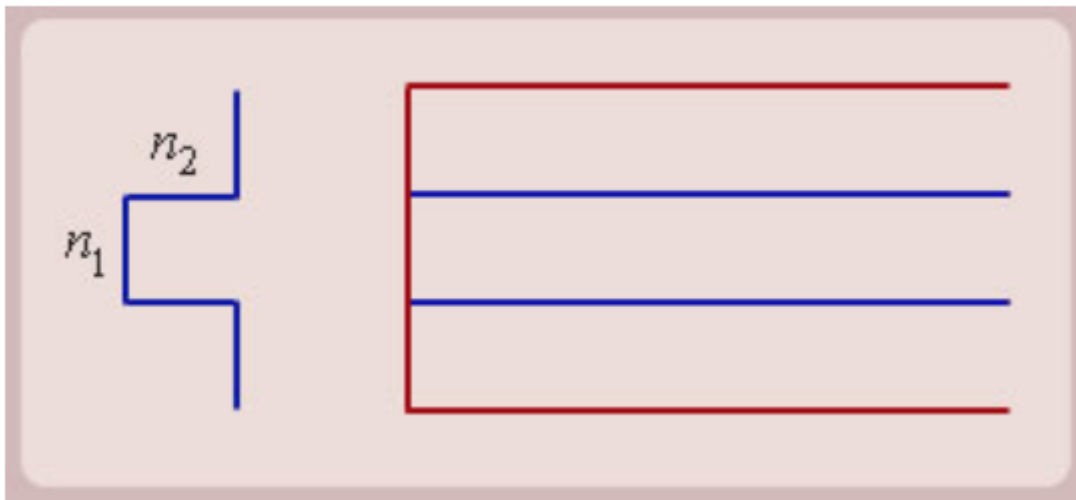
Cela limite indirectement la bande passante disponible sur la fibre. On peut donc dire que plus l'élargissement d'impulsion diminue la bande passante. C'est:

$$B.P. \approx \frac{1}{\Delta T} \quad (7)$$

L'équation 7 suggère que pour une plus grande largeur de bande de transmission, l'élargissement d'impulsion,  $\Delta T$  devrait être aussi bas que possible. Dans l'équation 6, nous voyons que la valeur de  $\Delta T$  dépend de la valeur de  $L$ , de la différence  $(n_1 - n_2)$  ainsi que de la valeur de  $n_1 / n_2$ . Mais réduire la valeur de  $L$  signifierait la réduction de la longueur de la fibre optique, ce qui n'est pas souhaitable. Comme  $1 < n_2 < n_1$ , le rapport,  $n_1 / n_2$  est très proche de 1. Ainsi, pour les faibles valeurs  $\Delta T$ , la seule option disponible avec nous est de diminuer la valeur  $(n_1 - n_2)$  ou en d'autres termes, d'augmenter l'indice de réfraction de la gaine  $n_2$ . On peut maintenant remarquer qu'une situation contradictoire a été générée quant à savoir si le revêtement doit être retiré pour un O.N. élevé ou pour utiliser un revêtement de grande valeur d'indice de réfraction pour une bande passante plus élevée? La réponse à cette requête est purement spécifique à l'application. Cela signifie que si une fibre optique est utilisée comme capteur (par exemple), où la lumière la plus faible possible doit être acceptée, nous utilisons une fibre avec de faibles valeurs  $n_2$ . Lorsque la fibre optique est utilisée pour la communication de données, des fibres avec des valeurs élevées de  $n_2$  sont utilisées. À des fins de communication pratique, la valeur de  $(n_1 - n_2)$  est de l'ordre d'environ  $10^{-3}$  à  $10^{-4}$ . Si la gaine est retirée, la valeur de  $n_2$  devient 1 et la valeur de la différence ci-dessus devient environ 0,5. La bande passante correspondant à cette valeur de  $n_1 - n_2$  est de l'ordre de quelques kilohertz, ce qui est bien pire que celle d'une paire torsadée normale. Ainsi, le gainage est une exigence extrêmement importante pour la fibre optique lorsque la bande passante est la principale préoccupation de l'application et son indice de réfraction est rendu aussi proche de celui du cœur que la technologie disponible le permet, mais pas égal. Cela est dû à la variation de la quantité de dopage dans une seule tige de verre. Les régions dopées différemment ont des indices de réfraction différents et servent de cœur et de gaine à la fibre optique.

## Différents types de fibres

### Fibre à saut d'indice



**Fig.10: fibre à saut d'indice (profil d'indice de réfraction)**

Pour cette fibre, l'indice de réfraction du coeur est constant (voir figure 10). Étant donné que le profil d'indice de réfraction ressemble à une impulsion ou à un pas, ce type de fibre est appelé fibre à gradient d'indice. Cette structure est utile pour analyser la propagation de la lumière à l'intérieur d'une fibre optique. Généralement ce n'est pas utilisé en pratique car le taux de transfert de données dans cette fibre est le plus bas.

Tout comme un petit exercice que nous pouvons demander, quel type d'élargissement d'impulsion se produit dans une fibre à indice de pas si nous n'utilisons pas de gaine?

Prenons 1Km de la fibre optique. sachant que  $n_1 = 1.5$  et  $n_2 = 1$  et  $L = 1000m$

$$\begin{aligned} \Delta t &= \frac{L}{c} \cdot \frac{n_1}{n_2} (n_1 - n_2) \\ &= \frac{10^3}{3 \times 10^8} \cdot \frac{1.5}{1} (1.5 - 1) \\ &= .25 \times 10^{-5} \text{ sec} \end{aligned}$$

la bande passante



$$\text{Bandwidth} \approx \frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{2.5 \times 10^{-6}} = 4 \times 10^5 \text{ Hz}$$

**Conclusion importante** : la gaine est une partie essentielle d'une fibre optique. Il ne fournit pas seulement le support mécanique mais augmente la bande passante de la fibre.

Nous pouvons observer à partir de l'expression d'élargissement d'impulsion que  $\Delta t \propto L$  tous les autres paramètres restent constants.

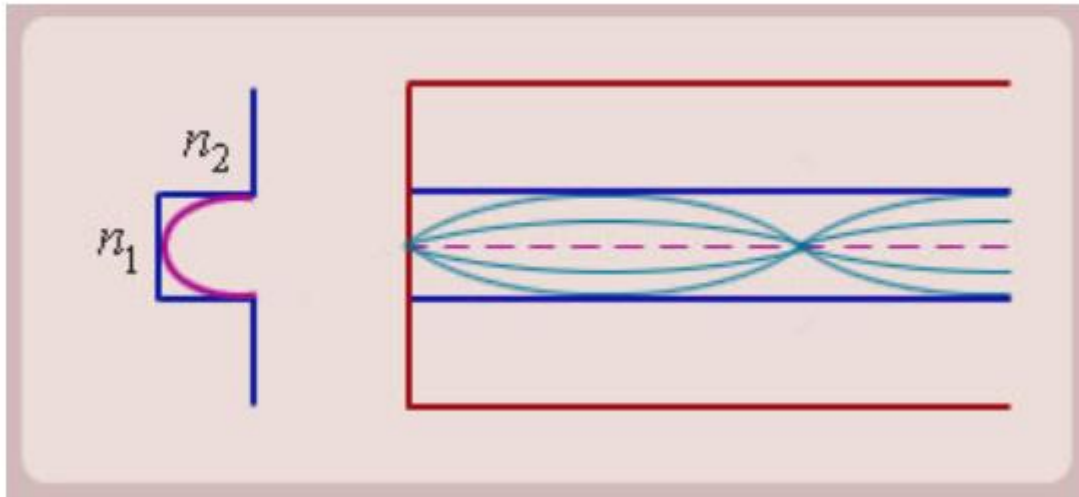
Puisque  $BW \sim 1/\Delta t$ , on obtient  $\Rightarrow BW \times L = \text{const}$

**Important** : nous pouvons échanger la bande passante contre la longueur et vice versa. Autrement dit, nous pouvons envoyer des signaux à faible débit binaire sur de longues distances et des signaux à débit binaire élevé uniquement sur de courtes distances.

### Fibre à gradient d'indice

Dans une fibre à gradient d'indice, puisque l'indice de réfraction est constant à l'intérieur du cœur, la vitesse de tous les rayons est constante et il y a donc une différence de temps de parcours entre les différents rayons. Si nous développons un système où les rayons qui parcourent de plus longues distances voyagent avec des vitesses plus élevées et les rayons qui parcourent des distances plus courtes voyagent avec des vitesses plus faibles, l'étalement de l'impulsion sur la fibre peut être réduit et par conséquent la bande passante peut être augmentée.

Le rayon qui est à un angle plus élevé doit accélérer et le rayon qui est le long de l'axe de la fibre doit se déplacer avec la vitesse la plus lente possible. La vitesse étant inversement proportionnelle à l'indice de réfraction, elle peut être manipulée en modifiant l'indice de réfraction du cœur. L'indice de réfraction des couches externes du cœur doit être plus petit que celui des couches internes, de sorte que les rayons qui vont dans les couches externes voyagent plus rapidement. On constate donc que pour réduire la dispersion, l'indice de réfraction au centre doit être maximal et il doit progressivement diminuer du centre vers l'interface cœur-gaine. Les rayons qui vont à des angles plus élevés accélèrent et la dispersion est réduite. Dans cette fibre, nous évaluons le profil d'indice de réfraction du cœur et par conséquent, on l'appelle fibre à gradient d'indice. Une fibre à gradient d'indice et la propagation des rayons sont illustrées sur la figure 11:

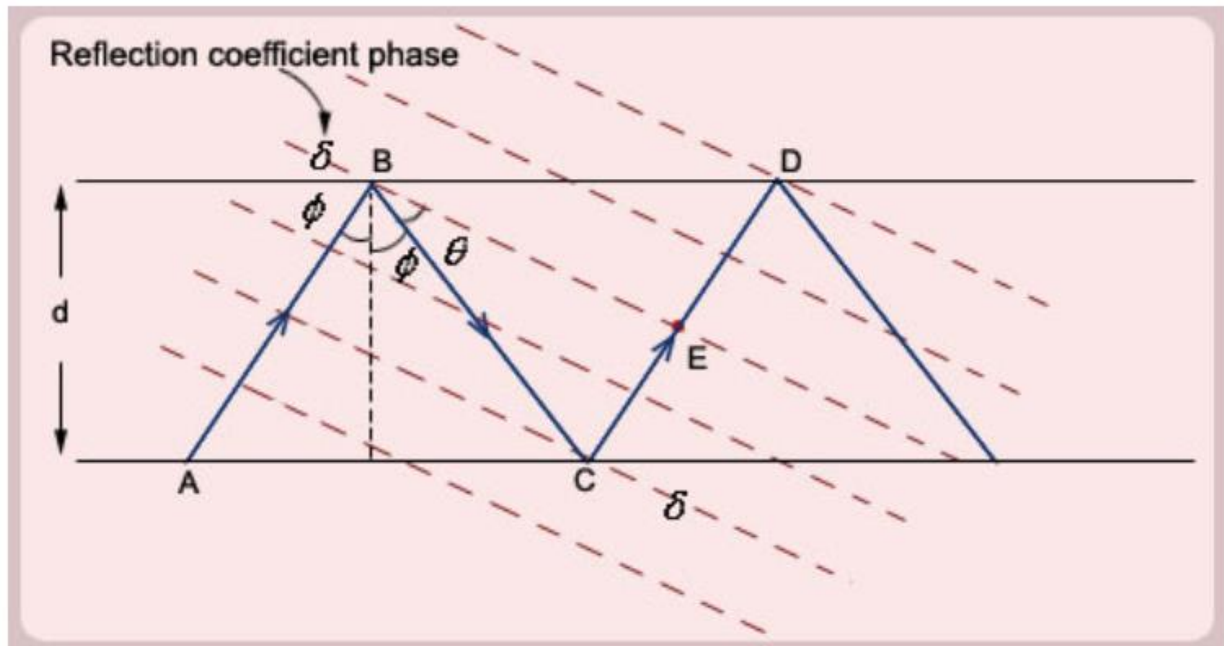


**Fig.11: fibre à gradient d'indice**

Si nous effilons le profil de manière optimale, nous obtenons la réduction de dispersion par rapport à celle d'une fibre à saut d'indice, même par un facteur de mille. Le débit de données d'une fibre à gradient d'indice typique est typiquement 10 à 100 fois plus élevé par rapport à une fibre à indice d'étape. Par conséquent, en pratique, même pour les réseaux locaux, nous utilisons des fibres à gradient d'indice au lieu de fibres à saut d'indice.

### **Fibre optique monomode**

La lumière se compose essentiellement de fronts d'onde. Une ligne perpendiculaire à un front d'onde s'appelle le rayon. La lumière est une onde électromagnétique et quand on dit qu'elle se déplace comme un rayon, c'est un ensemble de fronts d'onde qui bougent, prenons une fibre optique avec des rayons lumineux qui s'y propagent. Les rayons et les fronts d'ondes qui sont perpendiculaires aux rayons, sont comme indiqué sur la figure 7:



**Fig.11: Cœur de fibre optique, rayons avec fronts d'onde**

Considérons un front d'onde correspondant au rayon AB et passant par le point B. Ce front d'onde rencontre également le rayon CD au point E. En d'autres termes, la phase du rayon en B (juste avant la réflexion) est la même que celle du rayon en point E. C'est-à-dire que le changement de phase correspondant à la distance BCE ajoutée à la phase  $\delta$  du coefficient de réflexion aux points et doit être un multiple de  $2\pi$ . C'est ce qu'on appelle la condition de l'interférence constructive.

De simples considérations géométriques nous avons

$$\theta + 2\phi = \pi/2$$

$$BC = d \sec \phi$$

$$CE = BC \sin \theta = d \sec \phi \cdot \sin(\pi/2 - 2\phi)$$

$$= d \sec \phi \cos 2\phi$$

Changement de phase de B à est E

$$\begin{aligned}\Phi &= \frac{2\pi}{\lambda} \cdot n_1 (BC + CE) + 2\delta \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} n_1 \{d \sec \phi + d \sec \phi \cos 2\phi\} + 2\delta\end{aligned}$$

Pour les interférences constructives, le changement de phase doit être multiple de  $2\pi$

$$\Rightarrow \Phi = 2m\pi$$

En simplifiant les équations, nous obtenons une condition pour une propagation soutenue des rayons lumineux à l'intérieur du noyau comme

$$\frac{2\pi n_1 d \cos \phi}{\lambda} + \delta = m\pi$$

on peut noter que pour  $\phi = \pi/2$  (c'est-à-dire le rayon le long de l'axe de la fibre),  $\delta = 0$  et la condition est satisfaite pour  $m = 0$  toute valeur de  $n_1$ ,  $d$  et  $\lambda$ .

Au fur et à mesure des augmentations de  $(n_1 d / \lambda)$  (soit en raison de l'augmentation du diamètre du cœur ou de l'indice de réfraction du cœur, soit de la diminution de la longueur d'onde), plus de valeurs de  $m$  satisfont la condition et on a donc une propagation soutenue à l'intérieur de la fibre.

La condition de phase ci-dessus ne peut être satisfaite que par des rayons discrets entrant dans la structure, c'est-à-dire que des rayons à un nombre fini d'angles sont acceptés par la fibre optique. L'ensemble des rayons entrant à un angle spécifique de l'axe de la fibre donne des distributions d'intensité optique discrètes. Ceux-ci sont appelés les **modes d'une fibre optique**.

A partir de l'expression de la condition de correspondance de phase, nous constatons que lorsque  $d$  augmente, le nombre de rayons acceptés par la fibre optique augmente et que  $d$  diminue, le nombre de rayons diminue.

La dispersion étant due à la présence de plusieurs rayons (modes), si un seul rayon est amené à se propager à l'intérieur de la fibre, il n'y a pas de dispersion. Donc, si nous prenons une valeur de

$d$  suffisamment petite pour qu'elle ne satisfasse à la condition de phase que la valeur la plus basse de  $m$ , un seul mode sera se propager à l'intérieur de la fibre.

La fibre optique dans laquelle un seul rayon se déplace le long de l'axe de la fibre est appelée **fibre optique monomode**.

Dans une communication longue distance, nous utilisons une fibre optique monomode, alors que dans les LAN, nous utilisons généralement une fibre optique à gradient d'indice.

**Remarque :** pour une fibre optique monomode, cependant, nous devons utiliser une source comme le laser car le diamètre de la fibre est très petit et sans un faisceau hautement collimaté.

#### Diamètres de cœur des fibres optique

Monomode	5-10 $\mu\text{m}$
Gradient d'indice	50-60 $\mu\text{m}$
Saut d'indice	50-60 $\mu\text{m}$

**Remarque:** le diamètre de gaine pour tous les types de fibres a été normalisé à 125  $\mu\text{m}$

#### Limitations du modèle de rayon

- 1) Le modèle de rayon donne l'impression que pendant la réflexion interne totale, l'énergie est confinée au cœur uniquement. Mais ce n'est pas le cas. En réalité, l'énergie optique se propage également dans la gaine.
- 2) Le modèle de rayon ne parle pas des modèles de champ discrets pour la propagation à l'intérieur d'une fibre.
- 3) Le modèle de rayon se décompose lorsque la taille de la gaine devient comparable à la longueur d'onde de la lumière. Le modèle de rayon n'est donc pas tout à fait justifié pour une fibre monomode. Les limitations du modèle de rayons sont surmontées dans le modèle d'onde discuté dans le chapitre suivant.