

Chapitre 1 – Fibre optique

La fibre optique est une ligne de transmission qui permet de transporter l'information d'un point à un autre. Nous en faisons tous l'expérience, peut-être sans le savoir, lorsque nous communiquons sur internet. La communication passera le plus souvent, pour partie, sur des liaisons cuivre et, pour partie, sur des liaisons à fibres optiques.

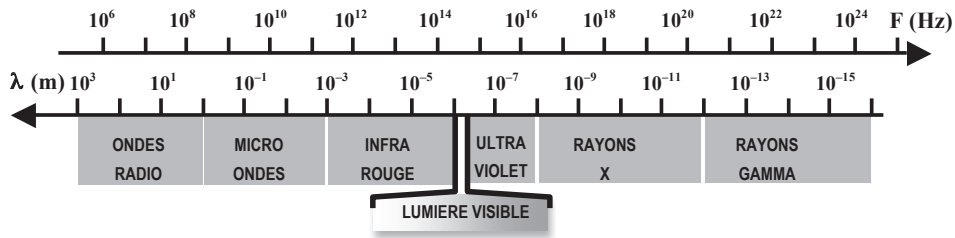
Ce transport d'information se fait sous la forme d'un transport d'énergie par l'intermédiaire d'une onde. Mais qu'est-ce qu'une onde ? C'est une perturbation qui se déplace sans transport de matière. Il ne faut pas confondre matière et énergie, l'onde ne transporte pas de matière, mais elle transporte de l'énergie. Chacun connaît les ondes mécaniques qui ne peuvent se déplacer que dans un milieu matériel élastique : nous pouvons citer, à titre d'exemples, les ondes utilisées dans les échographies ultrasonores médicales, ou dans le contrôle non destructif des matériaux et structures, ou encore les ondes sonores qui nous permettent d'entendre les bruits qui se produisent à distance. Chacun connaît aussi les ondes électromagnétiques qui, à la différence des ondes mécaniques, n'ont pas besoin de support matériel pour se déplacer : c'est le cas, par exemple, des ondes provenant des étoiles, ondes qui se déplacent dans le vide interstellaire. Font aussi partie des ondes électromagnétiques les rayons X, les ondes du four à micro-ondes, les ondes de la radio, les ondes du téléphone portable... Les exemples sont très nombreux de ces ondes qui rendent des services au quotidien.

Les ondes électromagnétiques peuvent être transmises en espace libre ou en espace guidé. Dans le cas de la transmission en espace libre, on parle de propagation libre : c'est le cas, par exemple, des ondes dans la transmission entre une antenne relais et un satellite, transmission sans obstacle et sans guidage. Dans le cas de la propagation avec guidage de l'énergie, on parlera de propagation guidée, c'est le cas des ondes dans la fibre optique.

Nous allons, dans ce chapitre, présenter le principe du guidage de l'énergie électromagnétique par la fibre optique, les propriétés générales des fibres optiques et aussi les différents types et les différentes catégories de fibres optiques répertoriées par les normes internationales.

I. Spectre électromagnétique et fibre optique

La fibre optique transmet des ondes électromagnétiques, mais elle n'utilise qu'une très petite partie du spectre électromagnétique constitué par les rayons gamma, les rayons X, l'ultraviolet, le visible, l'infrarouge, les microondes ou hyperfréquences et les ondes radio. Le diagramme qui suit donne un aperçu global du spectre électromagnétique avec les longueurs d'onde λ (lire lambda) données en mètre et les fréquences associées F données en Hertz.



Spectre électromagnétique

Sur les courtes distances, comme en communication industrielle par exemple, il est fait appel à des fibres en matière plastique (POF = Polymer Optical Fiber), utilisées dans la gamme des longueurs d'onde 520 à 650 nm sur des distances jusqu'à 50 m, ou encore à des fibres en verre enrobées de plastique (PCF = Polymer Cladded Fiber), utilisées dans la gamme des longueurs d'onde 650 à 800 nm sur des distances jusqu'à 100 m. Pour les plus grandes distances, il est fait appel à des fibres en verre (GOF = Glass Optical Fiber) fonctionnant à des longueurs d'onde dans la gamme de l'infrarouge de 850 à 1625 nm. Nous désignerons dorénavant les ondes électromagnétiques utilisées par les fibres optiques par le terme de lumière.

Le spectre du visible s'étend de $\lambda = 400$ à $\lambda = 750$ nm et le spectre de l'infrarouge de $\lambda = 750$ nm à $\lambda = 1$ mm. La longueur d'onde λ correspond à la distance parcourue par l'onde pendant une période temporelle T : $\lambda = cT$ où c désigne la vitesse de la lumière dans le vide. Nous pouvons donc, à partir de la connaissance de la longueur d'onde λ et de la vitesse c de la lumière dans le vide, calculer la période temporelle T et la fréquence F de l'onde correspondante.

Illustration : $\lambda = 1550$ nm donne $T = \lambda / c = 1550 \times 10^{-9} / 3 \times 10^8 = 517 \times 10^{-17}$ s et $F = 1 / T = 1 / (517 \times 10^{-17}) = 1,94 \times 10^{14}$ Hz = 194 THz (THz = TeraHertz). Il s'agit d'une fréquence très élevée.

Relation entre longueur d'onde λ , période T et fréquence F du signal optique :

$$\lambda = cT = \frac{c}{F} \text{ où } c \text{ désigne la vitesse de la lumière dans le vide (1 THz = } 10^{12} \text{ Hz).}$$

II. Conditions de transmission d'information par fibre

Le principe de base du guidage de la lumière par réflexion totale interne dans la fibre peut se comprendre facilement à partir de l'expérience du caillou lancé à la surface de l'eau. Si le caillou est lancé à la verticale sur l'eau, il pénètre sans difficulté dans l'eau pour finir sa course dans la vase accumulée au fond de l'eau. Si, au contraire, le caillou est lancé avec une incidence rasante sur la surface de l'eau, il rebondit une et quelquefois, avec un peu de chance, plusieurs fois. Il y a propagation par réflexions

successives à la surface de l'eau, propagation limitée bien entendu, car le caillou perd très rapidement, dans ses contacts avec la surface de l'eau et par frottement avec l'air, l'énergie communiquée lors du lancer. Nous allons ici préciser les conditions de propagation d'information dans une fibre optique, notamment la notion de réflexion totale interne et la notion de cône d'acceptance pour l'injection de la lumière dans la fibre au niveau de sa face d'entrée.

1. Vitesse de propagation et indice de réfraction

Dans le vide ou dans l'air, les ondes électromagnétiques se propagent à la vitesse de la lumière, environ 300000 km/s (dans le vide, de façon exacte 299792458 m/s). Dans les matériaux, les ondes sont ralenties : dans le verre, elles se propagent à une vitesse d'environ 200000 km/s. La grandeur physique qui permet de calculer la vitesse des ondes électromagnétiques dans un matériau à partir de la vitesse des ondes électromagnétiques dans le vide est l'indice de réfraction n du matériau défini comme le quotient de la vitesse des ondes électromagnétiques dans le vide, notée c , par la vitesse de ces mêmes ondes dans le matériau, notée v : $n = c / v$. L'indice de réfraction est bien entendu sans unité. Pour le verre, l'indice de réfraction est d'environ 1,5. Il est possible par dopage de faire varier légèrement cet indice de réfraction.

L'indice de réfraction n d'un matériau est $n = \frac{c}{v}$ avec c la vitesse de la lumière dans le vide et v sa vitesse dans le matériau considéré.

La connaissance de l'indice de réfraction d'un matériau permet de calculer la vitesse des ondes électromagnétiques dans ce matériau. Réciproquement, la connaissance de la vitesse des ondes électromagnétiques dans un matériau permet de calculer son indice de réfraction.

Illustration : un verre présente un indice de réfraction $n = 1,49$ à une certaine longueur d'onde : la vitesse de la lumière à cette longueur d'onde est donc

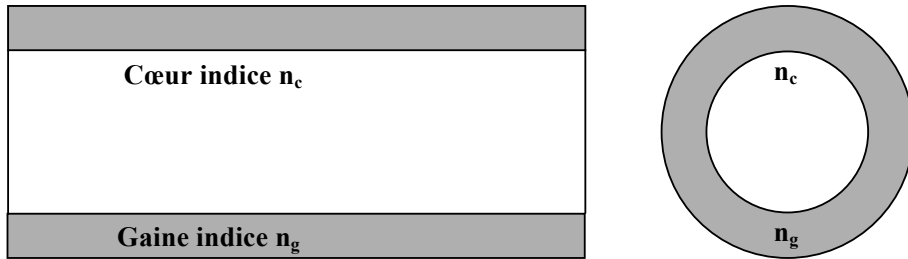
$$v = \frac{c}{n} = \frac{299792458}{1,49} = 201202992 \text{ m/s} .$$

2. Réflexion totale interne

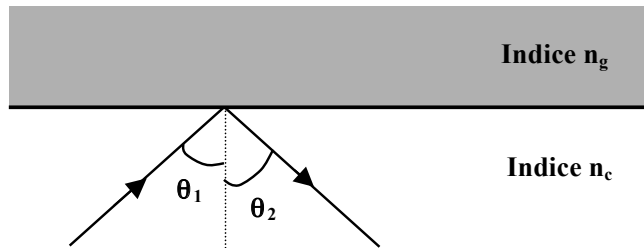
Précédemment, nous avons vu que, à l'interface air-eau, le caillou lancé avec une incidence rasante rebondit et ne pénètre pas dans l'eau. Le même phénomène se produit dans les fibres optiques et permet la propagation guidée des informations portées par l'onde, c'est-à-dire le transfert de ces informations de l'entrée de la fibre jusqu'à sa sortie. L'indice de réfraction, que nous avons défini précédemment, joue un rôle primordial pour permettre ce guidage.

La fibre optique est constituée d'un cœur, d'indice de réfraction n_c , et d'une gaine, d'indice de réfraction n_g , avec n_c très légèrement supérieur à n_g .

Le graphique ci-après présente, dans la partie gauche, une coupe longitudinale de la fibre et, dans la partie droite, une coupe transversale.



Intéressons-nous au rayon lumineux incident côté cœur sur l'interface cœur-gaine :



L'angle θ_1 repère la direction du rayon lumineux incident par rapport à la normale à l'interface cœur-gaine, l'angle θ_2 repère la direction du rayon lumineux réfléchi toujours par rapport à la normale à l'interface cœur-gaine. Les lois de la physique permettent d'établir que :

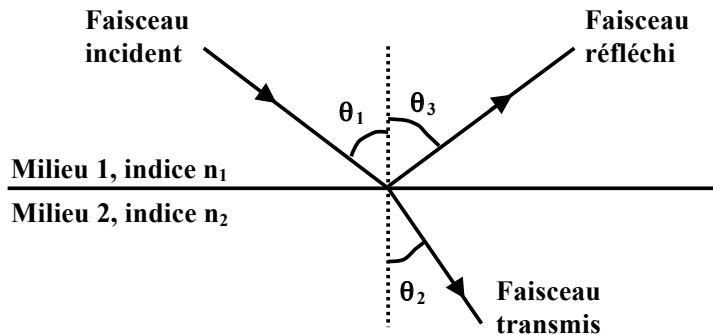
- ▶ la réflexion sur l'interface cœur-gaine se fait dans le plan d'incidence¹ avec un angle $\theta_2 = \theta_1$;
- ▶ la réflexion est totale (aucune transmission de lumière dans la gaine) si $\sin^{-1}(n_g / n_c) \leq \theta_1 \leq 90^\circ$. La valeur particulière $\theta_{\text{lim}} = \sin^{-1}(n_g / n_c)$ est appelée angle limite ;

Illustration : $n_c = 1,467$ et $n_g = 1,461$ donnent $\theta_{\text{lim}} = 84,8^\circ$. Seuls les rayons en incidence rasante sur l'interface cœur-gaine, $84,8^\circ \leq \theta_1 \leq 90^\circ$, vont être capables de se propager dans la fibre et vont transporter l'information de l'entrée vers la sortie de celle-ci sans perte. Pour les autres rayons, à chaque collision à l'interface cœur-gaine, la réflexion n'est pas totale, autrement dit une partie de l'énergie est réfléchie et une partie est transmise dans la gaine et est perdue par effet Joule, c'est-à-dire sous forme de chaleur : il y a propagation avec perte jusqu'à extinction de l'énergie lumineuse injectée dans la fibre lorsque l'intégralité de cette énergie a été transformée en chaleur.

¹ Le plan d'incidence désigne ici le plan défini par le rayon incident et la normale à l'interface cœur-gaine passant par le point d'impact du rayon incident sur l'interface.

L'angle limite de réfraction θ_{lim} à l'interface cœur-gaine est donné par $\sin(\theta_{lim}) = \frac{n_g}{n_c}$. La réflexion totale dans le cœur de fibre est obtenue pour $\theta_{lim} \leq \theta_1 \leq 90^\circ$.

La propagation de la lumière dans le passage d'un milieu matériel à un autre est régie par la loi de Snell-Descartes. Si n_1 désigne l'indice de réfraction du matériau 1 dans lequel la lumière est incidente avant de rencontrer l'interface entre les deux matériaux et n_2 l'indice de réfraction du matériau 2 dans lequel la lumière pénètre après sa traversée de l'interface, la loi de Snell-Descartes s'écrit $n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$. θ_1 et θ_2 désignent respectivement l'angle d'incidence dans le milieu 1 et l'angle de réfraction dans le milieu 2 selon le schéma ci-dessous :



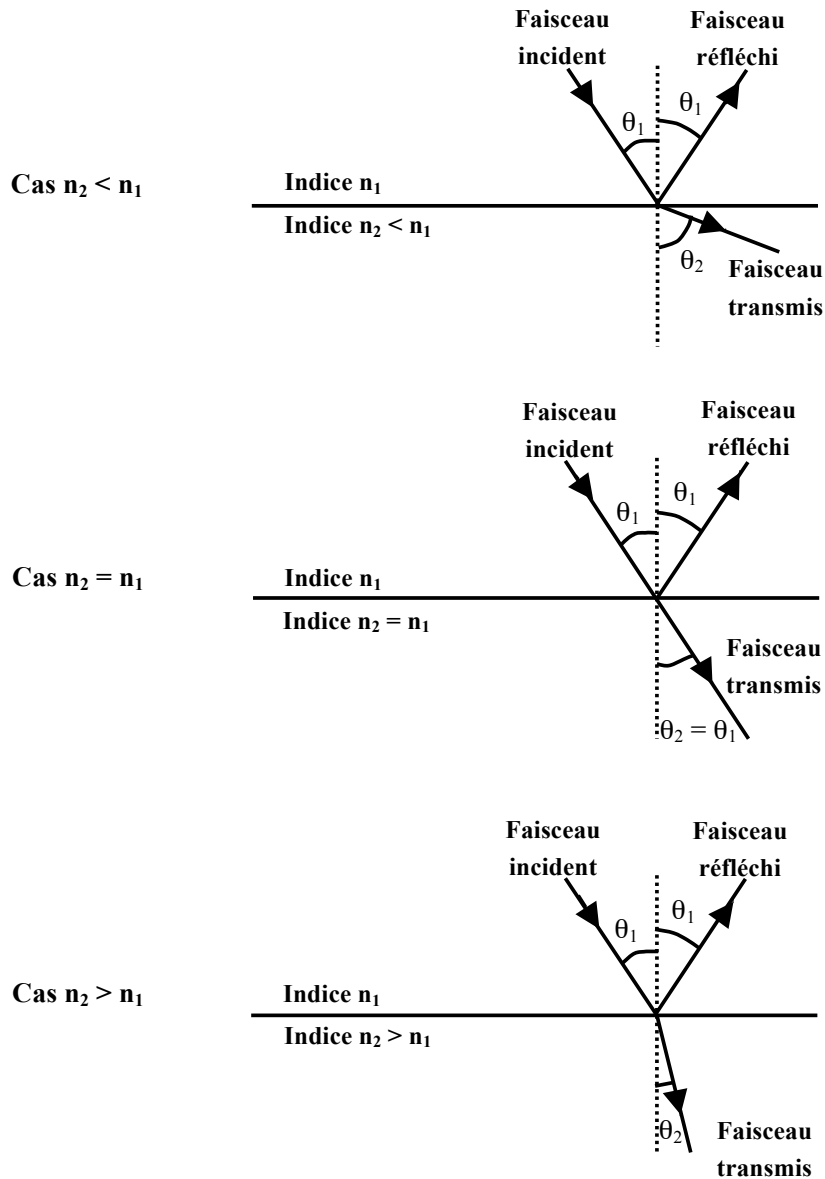
Les angles sont toujours repérés par rapport à la normale à l'interface (la normale à l'interface est représentée en trait discontinu sur le schéma ci-dessus). La réflexion se fait avec un angle réfléchi θ_3 égal à l'angle d'incidence θ_1 .

Illustration : les indices de réfraction $n_1 = 1,467$ et $n_2 = 1,461$ donnent, pour $\theta_1 = 45^\circ$, $\theta_2 = 45,24^\circ$ et $\theta_3 = 45^\circ$.

Loi de la réflexion : $\theta_3 = \theta_1$ et loi de la réfraction : $n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$.

La loi de Snell-Descartes permet donc, une fois le rayon incident connu, d'anticiper le changement de trajectoire de la lumière dans le passage d'un milieu à un autre. Regardons de plus près, en fonction des valeurs relatives des indices de réfraction n_1 et n_2 , les conséquences de cette loi de Snell-Descartes quant à la trajectoire du rayon transmis. Ceci nous permettra par la suite de préciser les conditions à remplir au niveau d'une fibre optique pour assurer un guidage des informations de l'entrée de la fibre vers sa sortie.

Les diagrammes ci-après illustrent les trois possibilités : $n_2 < n_1$, $n_2 = n_1$ et $n_2 > n_1$.



Si $n_2 < n_1$ alors $\sin(\theta_2) > \sin(\theta_1)$, le faisceau transmis s'écarte de la normale : $\theta_2 > \theta_1$.

Si $n_2 = n_1$ alors $\sin(\theta_2) = \sin(\theta_1)$, le faisceau est transmis sans modification de trajectoire : $\theta_2 = \theta_1$.

Si $n_2 > n_1$ alors $\sin(\theta_2) < \sin(\theta_1)$, le faisceau transmis se rapproche de la normale : $\theta_2 < \theta_1$.

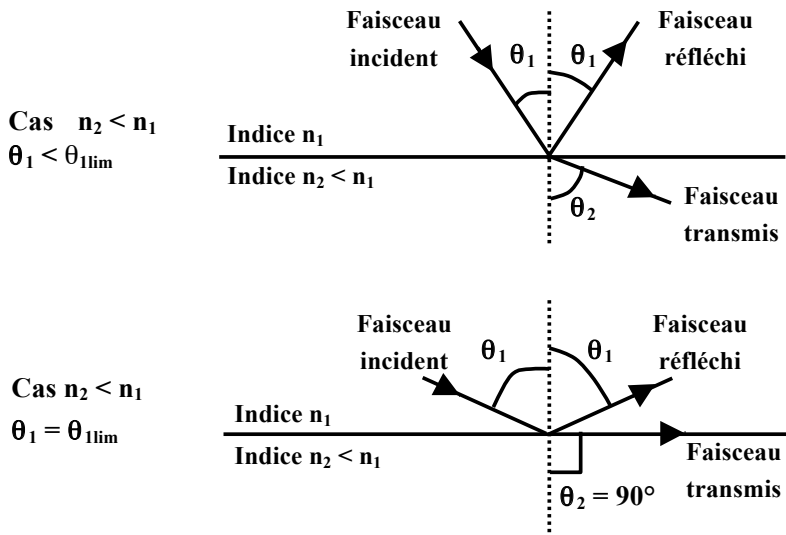
Pour la configuration particulière $n_2 < n_1$ pour laquelle le faisceau s'écarte de la normale, la valeur $\theta_2 = 90^\circ$ constitue une limite particulière où la loi de Snell-Descartes s'écrit $n_1 \sin(\theta_1) = n_2$. Ceci permet le calcul de la valeur limite de l'angle θ_1 au-delà duquel l'énergie n'est plus transmise au milieu 2 et est intégralement réfléchie dans le milieu 1 : $\theta_{1\text{lim}} = \text{Arc sin}(n_2 / n_1)$.

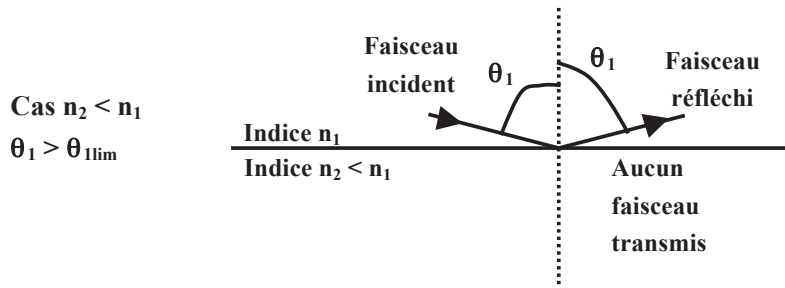
Pour $0^\circ < \theta_1 < \theta_{1\text{lim}}$, l'énergie est partiellement réfléchie dans le milieu 1 et partiellement transmise dans le milieu 2. Pour la fibre optique, la transmission dans le milieu 2 correspond à une transmission dans la gaine, l'énergie correspondante est alors définitivement perdue. Chaque réflexion à l'interface cœur-gaine correspond à la perte d'une fraction de l'énergie injectée dans la fibre si bien qu'à l'arrivée, en fin de fibre, l'énergie n'est plus suffisante pour une détection correcte de l'information transmise.

Pour $\theta_{1\text{lim}} < \theta_1 < 90^\circ$, il y a réflexion totale, l'énergie incidente ne traverse plus l'interface entre les deux milieux. C'est le régime de fonctionnement de la fibre optique utilisée comme support de transmission de l'information, avec un indice de réfraction de gaine $n_2 = n_g$ inférieur à l'indice de réfraction de cœur $n_1 = n_c$.

- Dans le passage d'un milieu d'indice n_1 à un milieu d'indice n_2 :
- ▶ si $n_2 < n_1$ avec $\theta_1 < \theta_{1\text{lim}} = \text{Arc sin}(n_2/n_1)$, le faisceau transmis s'écarte de la normale ;
 - ▶ si $n_2 = n_1$, le faisceau transmis n'est pas dévié ;
 - ▶ si $n_2 > n_1$, le faisceau transmis se rapproche de la normale ;

Les diagrammes ci-dessous illustrent, avec $n_2 < n_1$, les trois possibilités : $\theta_1 < \theta_{1\text{lim}}$, $\theta_1 = \theta_{1\text{lim}}$ et $\theta_1 > \theta_{1\text{lim}}$.





3. Ouverture numérique ON et cône d'acceptance

L'ouverture numérique ON d'une fibre optique quantifie l'aptitude de la fibre à capter la lumière issue d'une source, diode LED ou diode laser, pour assurer le transport de l'information. Nous allons nous intéresser à la transmission de la lumière sur la face d'entrée de la fibre à l'interface air-cœur de fibre. Les rayons qui vont participer de façon efficace à la transmission de l'information dans la fibre sont tous les rayons qui, une fois dans la fibre, vont rebondir sur l'interface cœur-gaine avec un angle d'incidence $\theta_{lim} \leq \theta_1 \leq 90^\circ$, ce qui assure la réflexion totale interne dans le cœur et aucune perte dans la gaine.

Les diagrammes ci-après illustrent trois régimes de fonctionnement différents : $\theta_i = 0^\circ$, $\theta_i = \theta_{imax}$ et $\theta_i > \theta_{imax}$. θ_i désigne l'angle d'incidence à l'interface air-cœur de fibre, repéré par rapport à la normale à cette interface, et θ_{imax} une valeur particulière de cet angle θ_i que nous allons préciser par la suite. Attention à ne pas confondre θ_i , angle sur l'entrée de fibre à l'interface air-cœur, et θ_1 angle à l'interface cœur-gaine.

