

Chapitre 10

Fibres Optiques : lignes de transmissions d'un signal lumineux

Capacités exigibles :

- Connaître les principes de propagation de la lumière dans une fibre optique : réfraction et réflexion totale
- Savoir déterminer les caractéristiques principales d'une fibre optique à partir d'une documentation technique : type de fibre, longueur(s) d'onde, atténuation, bande passante, angle d'ouverture, débit maximum

On parle de transmission **libre** lorsque le signal peut se propager dans l'ensemble des directions de l'espace qui entoure la source d'émission.

Exemples :

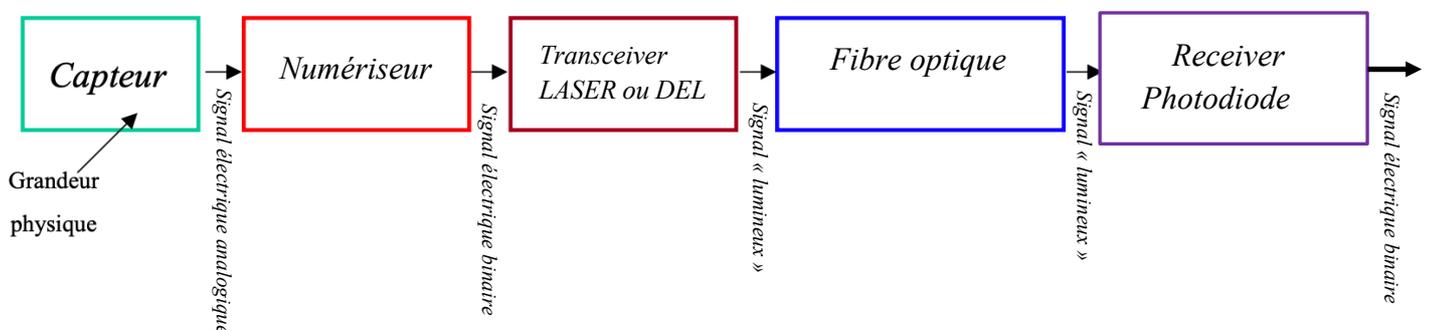
On parle de transmission **guidée** lorsque le signal est contraint de se propager dans une ou deux directions de l'espace.

Exemples :

La transmission guidée d'un rayonnement électromagnétique peut s'effectuer selon différentes technologies :

- $f < 1\text{kHz}$: simples fils électriques (comme ceux de nos TP)
- $f \in [1\text{kHz}; 1\text{GHz}]$: les fils se comportent comme des antennes qui émettent un champ EM. On utilise alors des câbles coaxiaux ou des fils torsadés.
- $f > 1\text{GHz}$: les rayonnements électromagnétiques peuvent se propager dans des tubes métalliques creux
- $f \sim 10^{15}\text{ Hz}$: les rayonnements électromagnétiques appartiennent au domaine de la lumière (ou en sont proches), on utilise alors des fibres optiques

Principe de la chaîne de transmission d'une information « binaire » via une fibre optique :

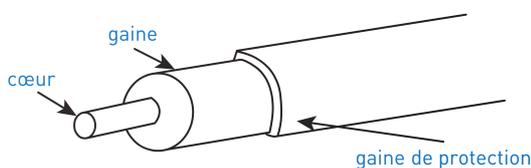


A l'entrée de la fibre optique, un bit « 1 » est codé par une impulsion « lumineuse ».

Si la fibre optique est un milieu transparent, le signal lumineux en sortie a la même puissance que le signal en entrée.

❖ Lien entre débit binaire et fréquence des flashes :

I. Les différents types de fibres optiques :



Une fibre optique est principalement constituée de :

- un cœur de verre constitué d'un matériau transparent pour les rayonnements électromagnétiques utilisés,
- une gaine constituée d'un autre matériau (transparent ou non),
- une gaine de protection isolante (ou « opaque »)

http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/optiqueGeo/dioptres/fibre_optique.php

Type de fibre	Coupe transversale de la fibre	Trajet(s) des rayons « lumineux » dans le cœur
Fibre monomode « OS »	<p>125µm</p> <p>10µm</p> <p>La gaine est un matériau opaque Le cœur est un matériau transparent</p>	
Fibre optique multimode « OM » à saut d'indice	<p>380µm</p> <p>200µm</p> <p>La gaine est un matériau transparent Le cœur est un matériau transparent</p>	
Fibre optique multimode « OM » à gradient d'indice	<p>125µm</p> <p>50-100 µm</p> <p>La gaine est un matériau transparent Le cœur est un matériau transparent</p>	

Dans ce chapitre, on cherche à modéliser la transmission d'un rayonnement électromagnétique dans une fibre optique.

II. Approximation de l'Optique Géométrique : notion de rayon lumineux

Pour comprendre les phénomènes ayant lieu dans une fibre optique, les rayonnements électromagnétiques peuvent être modélisés par le « rayon lumineux » sous certaines conditions.

A. Milieu transparent, homogène et isotrope :

Sauf mention contraire, les milieux de propagation sont considérés transparents, homogènes, isotropes (MTHI) :

B. Longueur d'onde et rayonnements électromagnétiques :

La source LASER est une source lumineuse quasi-monochromatique (ou quasi-harmonique), émettant des rayonnements de longueur d'onde λ .

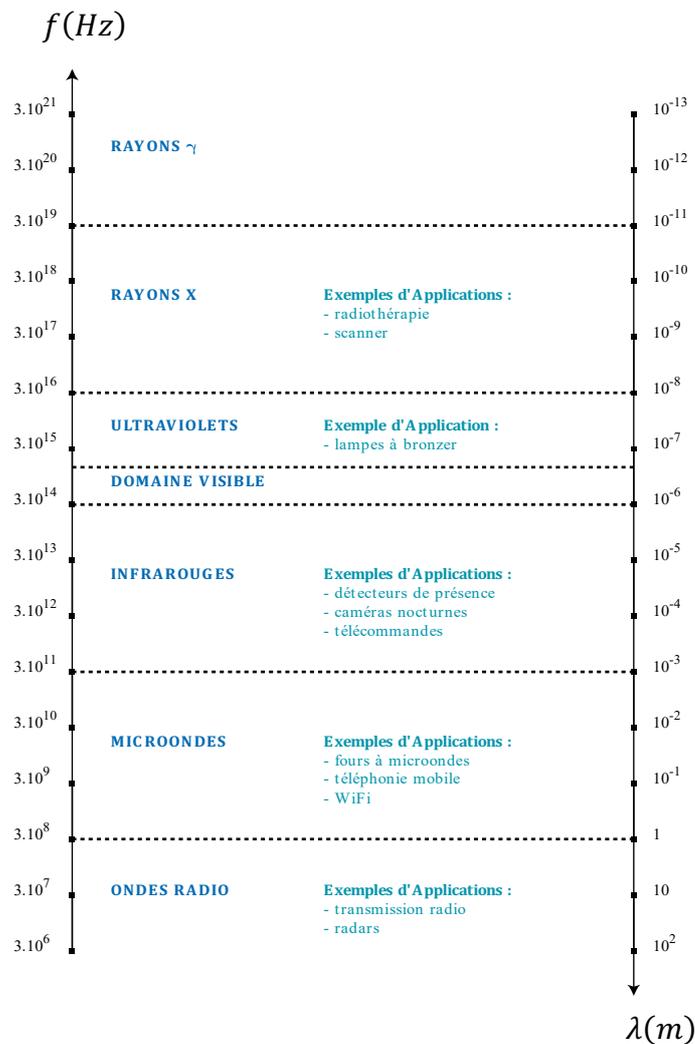
❖ **Lien entre longueur d'onde et fréquence :**

v : célérité (ou vitesse de propagation) des rayonnements électromagnétiques dans le milieu, en m/s

f : fréquence des rayonnements électromagnétiques, en Hertz (Hz)

λ : longueur d'onde des rayonnements électromagnétiques dans le milieu, en m

❖ **Spectre des rayonnements électromagnétiques dans le vide :**



C. Notion de rayon lumineux :

Expérience : **laser + poudre de craie**

La source LASER émet des rayonnements lumineux dans l'air et dans une direction privilégiée : ce n'est pas une source isotrope. A l'aide de dispositifs diffusant en suspension dans l'air, on observe ici, un **faisceau lumineux**, se propageant de manière rectiligne.

Hypothèse fondamentale de l'optique géométrique :

Le rayonnement de la précédente expérience semble pouvoir être modélisé par un simple trait, avec une flèche indiquant le sens de propagation de ce rayonnement : un rayon lumineux.

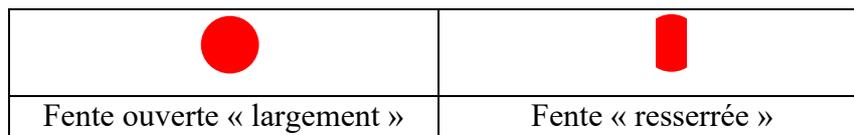
Vocabulaire :

Ce qu'on observe ici est un **faisceau** lumineux (dont le diamètre est fini) constitué d'une infinité de **rayons** lumineux (de diamètre infiniment petit).

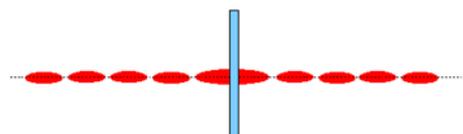
Mais peut-on toujours simplifier à ce point, le modèle utilisé pour la lumière ?

D. Approximation de l'optique géométrique :Expérience :

On dispose une fente de largeur a , devant le faisceau du LASER puis on diminue la largeur de la fente. Avec le modèle du rayon lumineux, on s'attend à observer sur l'écran quelque chose de proche de ceci :



Avec l'expérience, on observe que la lumière s'éparpille (phénomène de diffraction) sur l'écran, ce qui n'est pas explicable avec le simple modèle du rayon :



Fente « resserrée »

Approximation de l'optique géométrique : à connaître par cœur

Lors de l'étude d'un système optique, afin de pouvoir utiliser le modèle du « rayon lumineux », les diaphragmes (partie limitant le passage de la lumière) de dimension caractéristique a doivent rester grands devant la longueur d'onde (afin de pouvoir négliger la diffraction).

a : dimension (largeur, diamètre) de l'ouverture limitant le passage de la lumière, en mètre

λ : longueur d'onde du rayonnement, en mètre

Remarque : place de l'optique géométrique

L'optique géométrique ne tranche pas sur la dualité onde-corpuscule, mais s'intéresse aux rayons lumineux :

- dans la description ondulatoire, le rayon lumineux est interprété comme le trajet de l'énergie rayonnée lumineuse
- dans la description corpusculaire, il est interprété comme matérialisant la trajectoire des photons.

III. Propagation des rayonnements au sein d'une fibre optique : latence, réflexion totale et ouverture numérique :

A. Comment évaluer la latence d'une fibre optique ?

Le concepteur de la fibre optique joue sur un paramètre caractéristique du cœur de la fibre : son indice de réfraction.

❖ **Indice de réfraction d'un milieu transparent, homogène et isotrope :**

$c = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$: célérité des rayonnements électromagnétique dans le vide, en m/s
 v : célérité des rayonnements dans le milieu, en m/s
 n : indice du milieu, sans unité

Propriété importante : (pour vérifier vos résultats)

La célérité c des rayonnements électromagnétiques dans le vide est la vitesse de propagation maximale : rien ne peut dépasser cette valeur. Donc :

L'indice d'un milieu est supérieur ou égal à 1.

❖ **Latence d'une fibre optique :**

L : longueur de la fibre optique, en mètre.
 v : célérité de la lumière dans le milieu, en m/s

Remarques :

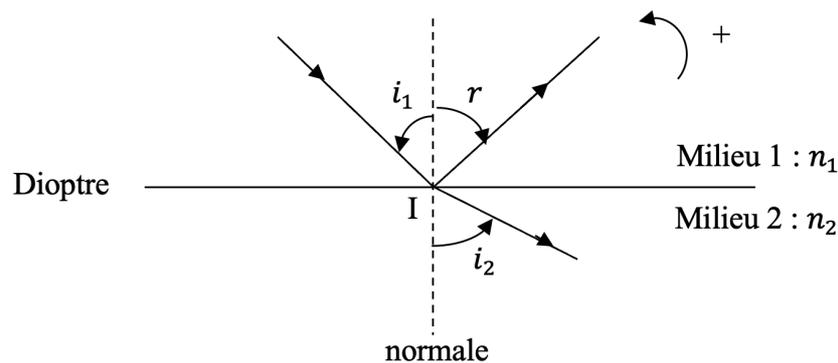
- Pour une fibre OM à gradient d'indice, on utilise l'indice maximal du cœur.
- Les routeurs, les photodiodes, DEL, multiplexeurs ou switches ajoutent une latence supplémentaire.
- Une latence élevée peut compromettre les performances et la réactivité des systèmes de sécurité.



B. Exploitation du phénomène de réflexion totale au sein des fibres OM :

Pour comprendre les phénomènes présents dans les fibres multimodes, il faut étudier les phénomènes qui se produisent lorsqu'un rayon passe d'un milieu THI d'indice n_1 à un autre milieu THI d'indice n_2 .

Schématisation de la situation :



❖ **Vocabulaire (à connaître par cœur) :**

On appelle dioptr, la surface de séparation entre deux milieux d'indices différents.

On appelle I, le point d'incidence de cette surface (point sur lequel arrive le rayon incident).

On appelle normale, la droite perpendiculaire au dioptr et passant par I.

Le rayon incident est le rayon issu de la source et allant à la rencontre du dioptr.

Le rayon réfracté est le rayon transmis dans le milieu 2.

Le rayon réfléchi est le rayon après réflexion sur le dioptr.

L'angle d'incidence nommé i_1 est l'angle partant de la normale au dioptr et allant au rayon incident.

L'angle de réflexion nommé r est l'angle partant de la normale au dioptr et allant au rayon réfléchi.

L'angle de réfraction nommé i_2 est l'angle partant de la normale au dioptr et allant au rayon réfracté.

Expérience :

A la traversée de l'interface eau/air, le faisceau lumineux incident peut donner naissance à un faisceau lumineux réfléchi et à un faisceau réfracté (celui transmis dans l'air). On observe que si l'angle d'incidence est « grand », le faisceau réfracté n'existe plus : le faisceau incident est totalement réfléchi.

La lumière ne passe plus d'un milieu transparent (eau) à un autre milieu transparent (air)

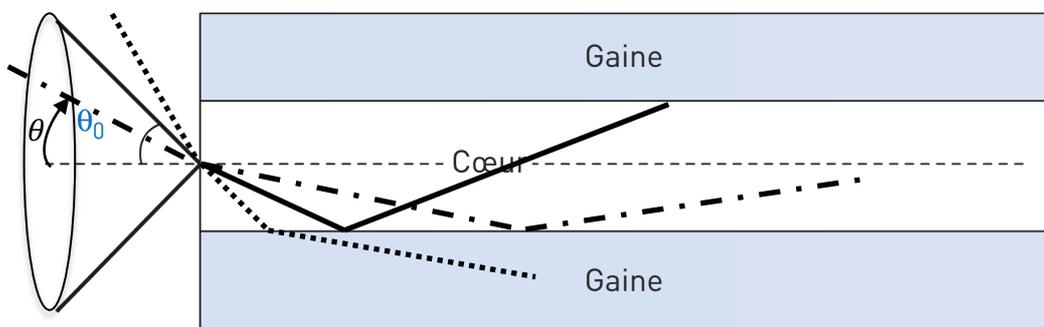
❖ Conditions pour observer la réflexion totale : à connaître par cœur

C. Est-ce que l'intégralité des rayons issus de la source sont piégées, par réflexion totale, dans le cœur d'une fibre optique OM ?

On s'intéresse ici à l'entrée des rayonnements électromagnétiques dans le cœur de la fibre. La source de rayonnements électromagnétiques est dans l'air.

On nomme θ , l'angle d'incidence à l'interface air/cœur de la fibre.

θ_0 représente l'angle limite pour lequel si $\theta < \theta_0$, le rayon lumineux entrant dans la fibre, est guidée.



- - - - - Il y a réflexion totale entre le cœur et la gaine.
- Il y a réflexion totale entre le cœur et la gaine (angle limite i_{lim})
- Il n'y a pas réflexion totale entre le cœur et la gaine.

On définit l'« ouverture numérique », noté ON , d'une fibre, ainsi :

$$ON = \sin \theta_0$$

θ_0 : angle limite pour lequel le rayon lumineux entrant est guidée, en degré

ON : ouverture numérique de la fibre, sans unité

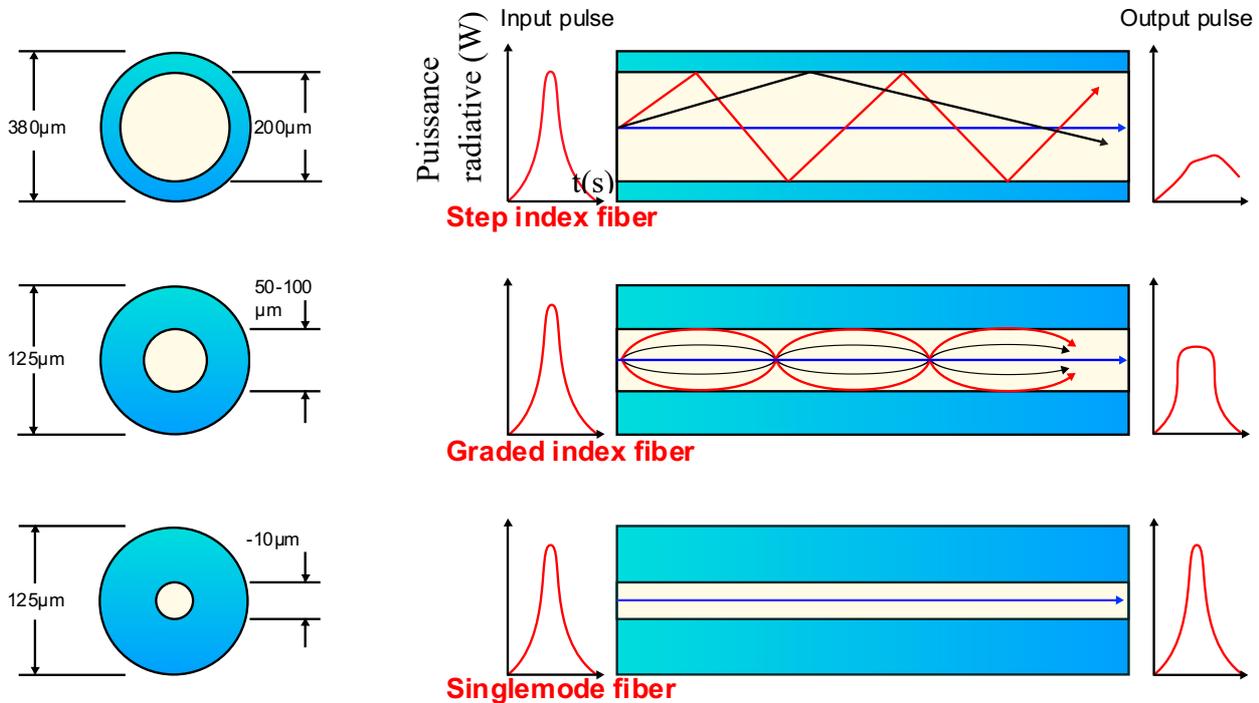
En ne prenant en compte que cette caractéristique, l'idéal serait le cas où $\theta_0 = 90^\circ$ donc $ON = 1$.

On verra dans la suite, que ce cas pose des soucis pour la dispersion modale.

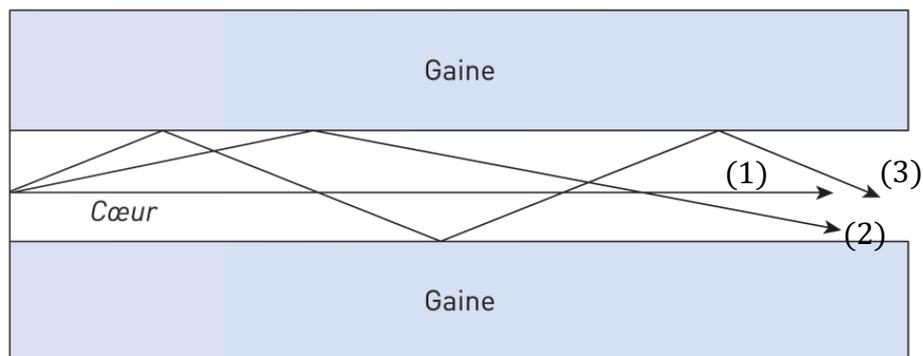
IV. La fibre optique, un filtre passe-bas :

A. Dispersion modale pour les fibres multimodes :

Pour simplifier notre raisonnement, on suppose que chaque rayon incident est issu d'une source lumineuse parfaitement monochromatique. La longueur de la fibre optique est notée L .



❖ **Explication du phénomène de déformation de l'impulsion électromagnétique :**



Chaque rayon se propage à la même célérité v car l'indice du cœur est identique en tout point (milieu homogène). Chaque rayon parcourt la fibre selon un mode/trajet différent (d'où le nom « multimode »).

Le rayon (1) a une durée de parcours la plus faible car il parcourt la distance L à la célérité v .

Le rayon (2) a une durée de parcours plus grande car il parcourt la distance $L' > L$ à la célérité v .

Le rayon (3) a une durée de parcours encore plus grande car il parcourt la distance $L'' > L' > L$ à la célérité v .

Si le signal en entrée est une impulsion parfaite (de durée infiniment petite), le signal en sortie est reçu durant la durée Δt (impulsion de durée Δt), ce qui conduit à la déformation de l'impulsion.

❖ Comportement passe-bas :

Si en entrée de la fibre, on envoie des bits (impulsions parfaites pour coder l'état 0 ou 1), il faut que la durée T séparant deux bits (deux flashes/impulsions) soit plus grande que Δt pour éviter que le premier rayon de l'impulsion suivante « rattrape » le dernier rayon de l'impulsion précédente. Cela conduirait à la superposition en sortie des impulsions : le détecteur lumineux ne pourrait plus distinguer le bit « 0 ».

Pour éviter cette superposition des impulsions, il faut que :

$$T \geq \Delta t \Leftrightarrow f \leq \frac{1}{\Delta t}$$

Le signal binaire passe à travers la fibre optique si la fréquence f des impulsions / flashes est plus petite que $\frac{1}{\Delta t}$: la fibre optique se comporte donc comme un système passe-bas.

❖ Fibre OM à gradient d'indice vs saut d'indice :

Les fibres à gradient d'indice ont une dispersion modale plus faible que celle à saut d'indice. En effet, dans une fibre à gradient d'indice, lorsque le rayon lumineux s'éloigne de l'axe de la fibre, sa célérité $v = \frac{c}{n}$ augmente car n diminue.

La durée Δt séparant l'arrivée en sortie du premier rayon et celui du dernier rayon (issus de la même impulsion) est donc plus courte : l'impulsion est alors moins déformée.

❖ Influence de la longueur de la fibre :

Plus la longueur L de la fibre augmente, plus la durée Δt séparant l'arrivée en sortie du premier rayon et celui du dernier rayon (issus de la même impulsion) est grande. Plus la longueur L de la fibre augmente, plus sa bande passante et le débit binaire brut diminue aussi.

❖ Influence de l'ouverture numérique sur la dispersion modale :

Plus l'ouverture numérique est grande et plus la dispersion modale (durée Δt séparant l'arrivée en sortie du premier rayon et celui du dernier rayon) est grande. Cela a pour conséquence de faire chuter la bande passante de la fibre (et le débit binaire brut).

B. Produit « bande passante-longueur » pour les fibres OM :

Les fibres monomodes se comportent elles aussi comme des passe-bas, mais la limitation de leur bande passante n'est pas due au phénomène de dispersion modale : elle provient de l'atténuation.

C. Atténuation linéique d'une fibre optique :

Les matériaux du cœur d'une fibre n'étant jamais parfaitement transparents, une partie de la puissance du rayonnement électromagnétique est absorbée : il y a atténuation de la puissance du flash lumineux lors de sa traversée de la fibre.

Les constructeurs de fibres communiquent l'atténuation linéique :

$A_{dB,l}$: atténuation linéique en dB/m

L : longueur de la fibre, en m

P_e : puissance moyenne radiative à l'entrée de la fibre optique, en W

P_s : puissance moyenne radiative à la sortie de la fibre optique, en W

Chapitre 10 : ce qu'il faut savoir

- Connaître la différence entre propagation guidée et libre
- Connaître les différents types de lignes de transmission
- Connaître les différents types de fibres optiques
- Savoir ce qu'est un milieu homogène, transparent et isotrope
- Connaître la valeur de la célérité des rayonnements électromagnétiques dans le vide
- Connaître la formule liant fréquence et longueur d'onde
- Connaître l'approximation de l'optique géométrique
- Connaître la définition de l'indice d'un milieu
- Savoir calculer la latence dans une fibre optique
- Savoir que les mots « en temps réel » ou « instantané » en informatique sont faux.
- Connaître les conditions d'observations de la réflexion totale
- Connaître la définition de l'ouverture numérique
- Connaître la formule de la dispersion modale
- Savoir que la fibre optique est un passe-bas
- Connaître la formule de l'atténuation linéique

Chapitre 10 : ce qu'il faut savoir faire

- Savoir passer de l'unité Hertz au bit/s et inversement.
- Savoir utiliser la formule liant fréquence et longueur d'onde
- Savoir vérifier si le modèle du rayon lumineux peut être utilisé
- Savoir utiliser la notion de rayon lumineux
- Savoir déterminer l'angle limite pour observer la réflexion totale
- Expliquer la dispersion modale et savoir calculer cette dispersion modale
- Savoir calculer la bande passante à partir d'un produit $\Delta f \times L$
- Savoir calculer une atténuation linéique

