

Thème I. Ondes et signaux (Optique géométrique)

Chapitre n°1 Fondements de l'optique géométrique



Plus de 38 millions de foyers français peuvent recevoir maintenant l'internet très haut débit par fibre optique.
Quel phénomène permet de transmettre l'information à l'aide de fibres optiques sur plusieurs centaines de kilomètres ?
La fibre optique est également utilisée dans le domaine médical par exemple dans les fibroscopes.

Au XVIII^e siècle, deux modèles décrivant la nature de la lumière s'opposaient : Newton affirmait que les objets lumineux émettaient des corpuscules obéissant aux lois de la mécanique, tandis que Huygens affirmait que la lumière était une onde. Les expériences d'interférences et de diffraction de Fresnel et Young ont un temps permis d'imposer le modèle ondulatoire de la lumière. À la fin du XIX^{ème} siècle, les travaux de Planck sur le corps noir notamment, ont réintroduit le modèle corpusculaire avec la notion de photon.

Aujourd'hui, la lumière est décrite de manière complète par les deux modèles : le modèle corpusculaire (photon) et le modèle ondulatoire (onde électromagnétique). On parle de dualité onde - corpuscule (cf chapitre ultérieur). Ces deux modèles permettent d'expliquer l'ensemble des expériences réalisées jusqu'à maintenant avec la lumière.

Dans ce chapitre et le suivant, on s'intéressera à la modélisation géométrique de la propagation de la lumière et à l'utilisation de la notion de rayon lumineux.

Pré-requis

- 2^{nde} : Thème Ondes et signaux
 - Propagation de la lumière, Spectres d'émission, Lois de Snell-Descartes.
- 1^{re} : Thème Ondes et signaux
 - Relation entre période, longueur d'onde et célérité.
- Terminale : Thème Ondes et signaux
 - Diffraction d'une onde.

Objectifs du chapitre

- Classer les sources lumineuses selon leur spectre,
- Décrire la propagation de la lumière dans le cadre de l'optique géométrique
- Énoncer les lois de Snell-Descartes.
- Étudier les conditions de réflexion totale et les appliquer à l'étude de la fibre optique.

Plan du cours

I Sources lumineuses	2	III Lois de Snell-Descartes	6
I.1 Différentes sources	2	III.1 Vocabulaire	6
I.2 Modèle de la source ponctuelle et mono-chromatique	3	III.2 Angles orientés	6
II Modèle de l'optique géométrique	4	III.3 Énoncé des lois de Snell-Descartes	6
II.1 Propagation dans le vide	4	III.4 Quelques phénomènes courants (culture)	7
II.2 Propagation dans un milieu transparent	4	III.4.a) Les mirages	7
II.3 Modèle de l'optique géométrique	5	III.4.b) L'arc-en-ciel	8
II.4 Limite du modèle : la diffraction	6	IV Réflexion totale	8
		IV.1 Condition de réflexion totale	8
		IV.2 La fibre optique à saut d'indice	9

Ai-je bien appris mon cours ?

- 1 – 😊 – 😞 – Donner les longueurs d'onde d'une radiation rouge, jaune, verte, bleue, violette et inversement.
- 2 – 😊 – 😞 – Définir le modèle de l'optique géométrique.
- 3 – 😊 – 😞 – Quelles sont les limites du modèle de l'optique géométrique ?
- 4 – 😊 – 😞 – Énoncer les lois de Snell-Descartes.
- 5 – 😊 – 😞 – Établir la condition de réflexion totale.
- 6 – 😊 – 😞 – Établir l'expression de l'angle d'incidence maximal à l'entrée d'une fibre optique pour que le rayon puisse être guidé.
- 7 – 😊 – 😞 – Établir l'expression de la durée séparant l'arrivée du début et de la fin d'une impulsion dans une fibre optique.



I Sources lumineuses

I.1 Différentes sources

Capacités exigibles : Caractériser une source lumineuse par son spectre.

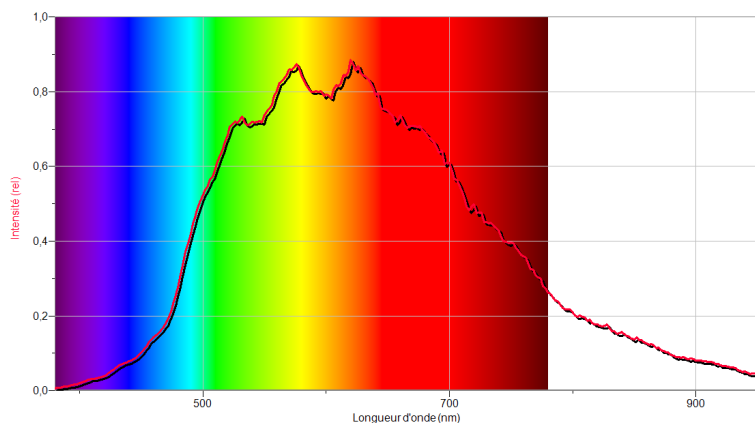
👁 Expérience

On réalise les spectres de différentes sources lumineuses :

- à l'aide d'un réseau, on réalise le spectre, que l'on visualise sur un écran.
- à l'aide d'un spectromètre à fibre relié à un ordinateur via une interface d'acquisition, on visualise alors l'intensité de chaque radiation en fonction de la longueur d'onde.

Le spectre obtenu avec le spectromètre à fibre est la courbe tracée de l'intensité lumineuse (en unité arbitraire) en fonction de la longueur d'onde. L'avantage du spectromètre à fibre est d'avoir accès directement aux longueurs d'onde présentes dans le spectre ainsi qu'à leurs importances relatives grâce à l'intensité. Ce qui n'est pas possible juste avec une projection d'un spectre sur un écran.

Le fond coloré est seulement là pour vous rappeler les couleurs correspondant aux différentes longueurs d'onde.



Il s'agit d'un spectre continu d'une source polychromatique, semblable à celui du Soleil.

FIGURE 1 – Spectre d'une lampe à incandescence

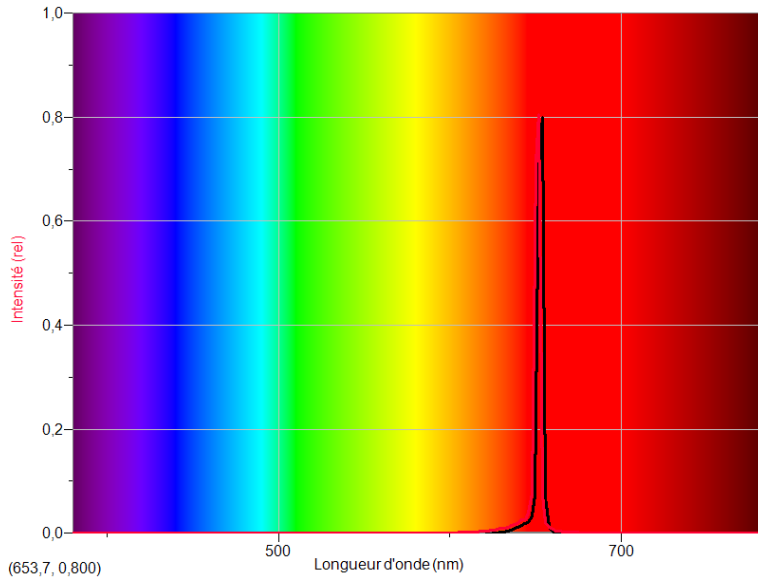


FIGURE 2 – Spectre d'une diode LASER

Il s'agit d'un spectre de raie d'une source monochromatique.

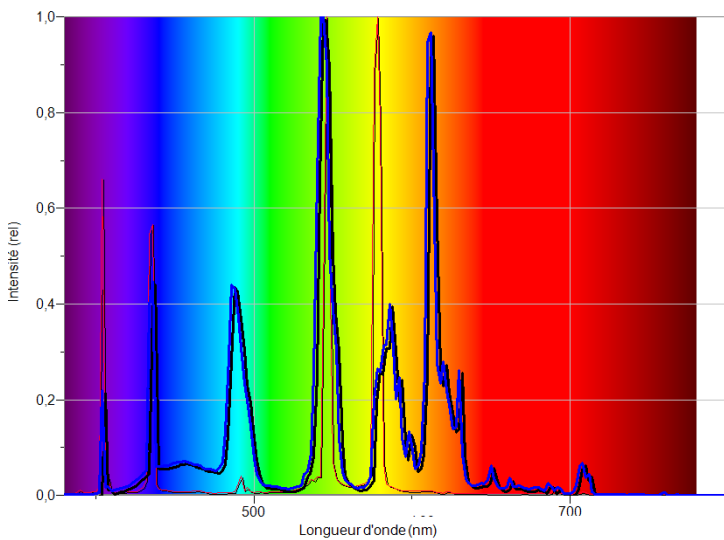


FIGURE 3 – Spectres d'une lampe à vapeur de Mercure (trait épais) et d'un tube fluorescent (trait fin).

Il s'agit d'un spectre de raie d'une source polychromatique. Le spectre de raies d'émission est caractéristique du gaz présent dans l'ampoule (ici du Mercure). L'existence des raies est due à la quantification des niveaux d'énergie de l'élément.

Les lampes fluocompactes contiennent de la vapeur de mercure excitée par décharge. La surface interne de l'ampoule est recouverte d'une couche fluorescente qui absorbe la raie ultraviolette intense du mercure et réémet des radiations réparties dans une bande dans le visible.

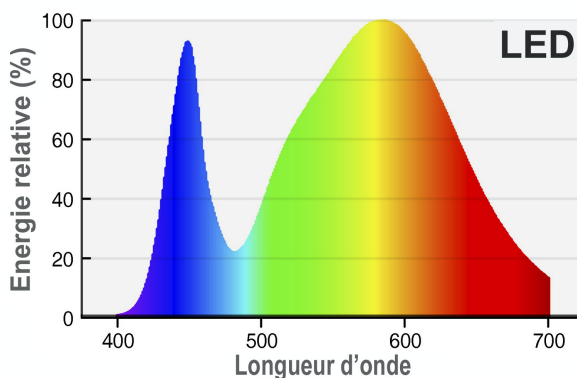


FIGURE 4 – Spectre d'une LED

Les LED blanches sont le plus souvent la combinaison d'une diode émettant dans le bleu avec un luminophore (substance qui émet de la lumière une fois excitée) jaune pour produire de la lumière blanche par superposition du bleu et du jaune..

I.2 Modèle de la source ponctuelle et monochromatique

Dans la suite nous utiliserons le **modèle de la source ponctuelle et monochromatique** :

- **source ponctuelle** (\neq étendue) = la source est un point de l'espace. Ce point envoie des rayons dans toutes les directions.
- **source monochromatique** (\neq polychromatique) = le spectre ne contient qu'une seule radiation monochromatique.

Une source étendue peut être découpée en une assemblée de sources quasi ponctuelles qui émettent indépendamment les unes des autres. Une source polychromatique peut être décomposée en sources quasi monochromatiques.

II Modèle de l'optique géométrique

II.1 Propagation dans le vide

Capacités exigibles : Relier la longueur d'onde dans le vide et la couleur.

♥ À retenir : Propagation de la lumière dans le vide.

- La lumière est une onde électromagnétique se propageant dans le vide à la célérité

$$c = 299792458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

- Lumière visible : longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 \in [400 \text{ nm}; 800 \text{ nm}]$.

- La couleur de l'onde lumineuse est caractérisée par sa longueur d'onde dans le vide, notée λ_0 :

Couleur	Bleu	Vert	Jaune	Rouge
Longueur d'onde dans le vide	450 nm	550 nm	600 nm	650 nm

- Relations entre la célérité de la lumière dans le vide c , la longueur d'onde dans le vide λ_0 , la fréquence ν et la période T :

$$c = \lambda_0 \nu \quad c = \frac{\lambda_0}{T} \quad \nu = \frac{1}{T}$$

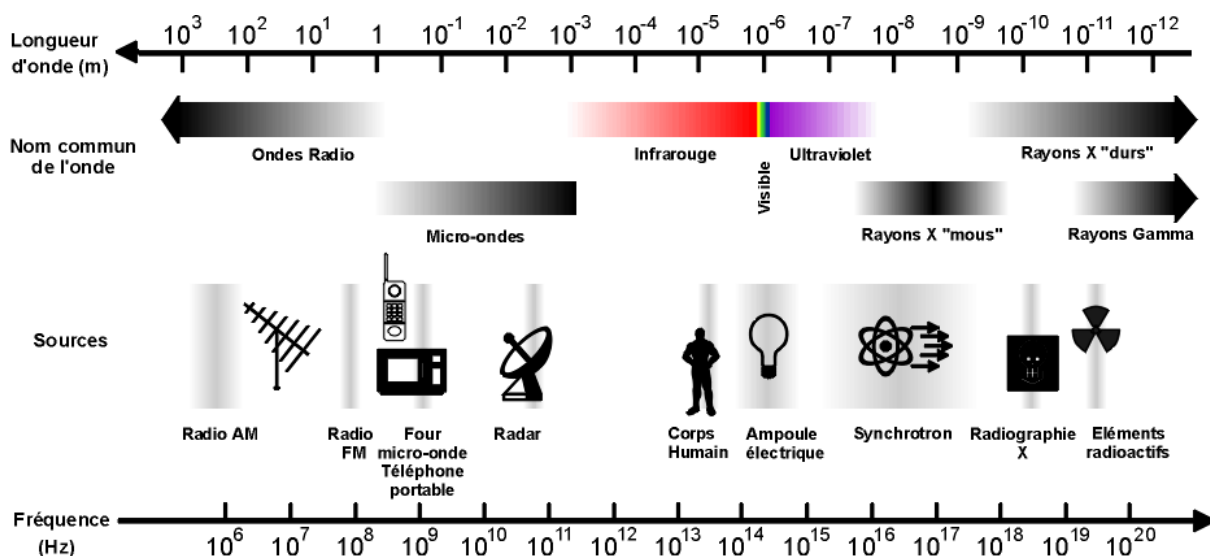


FIGURE 5 – Spectre électromagnétique

II.2 Propagation dans un milieu transparent

Nous nous placerons dans le cadre de milieux :

- **transparents** : ils n'absorbent pas d'énergie lumineuse ;
- **linéaires** : il n'y a pas de modification de la fréquence de l'onde au cours de la propagation ;
- **homogènes** : les propriétés physiques (température, masse volumique, indice de réfraction) sont identiques en tout point ;
- **isotropes** : les propriétés physiques sont identiques dans toutes les directions de l'espace (pas de direction privilégiée).

Définition : Indice de réfraction

- On définit l'**indice de réfraction (optique) d'un milieu transparent** comme le rapport de la célérité de la lumière c dans le vide divisée par la célérité de la lumière v dans le milieu transparent :

$$n = \frac{\text{célérité de la lumière dans le vide}}{\text{célérité de la lumière dans le milieu}} = \frac{c}{v}$$

c est la vitesse maximale de la lumière, donc v est toujours inférieure à c , donc $n > 1$.

- La vitesse de propagation d'une radiation lumineuse dans un **milieu dispersif** dépend de sa fréquence, donc l'indice de réfraction dépend de la fréquence de la radiation.

Quelques valeurs d'indice de réfraction : $n(\text{vide}) = 1$; $n(\text{air}) = 1,00027 \approx 1$; $n(\text{eau}) = 1,33$; $n(\text{verre}) = 1,5$

À retenir : longueur d'onde dans un milieu transparent

- La fréquence d'une onde est indépendante du milieu dans lequel elle se propage.
- La longueur d'onde λ dans un milieu transparent d'indice n est reliée à la longueur d'onde dans le vide λ_0 :

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} < \lambda_0$$

II.3 Modèle de l'optique géométrique

Capacités exigibles : Définir le modèle de l'optique géométrique et indiquer ses limites.

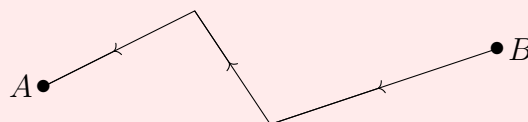
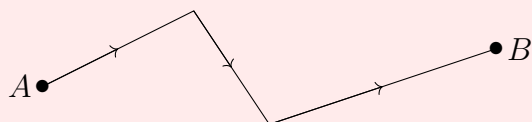
À connaître : Approximation de l'optique géométrique

Dans le cadre de l'approximation de l'optique géométrique, on néglige tous les phénomènes de diffraction. Pour cela, les tailles des instruments d'optique (par exemple diamètre d'une lentille) sont très grandes devant la longueur d'onde λ : $d \gg \lambda$ ($d > 1000\lambda$).

À connaître : Rayons lumineux


Dans le cadre de l'optique géométrique, la propagation de l'énergie lumineuse est décrite à l'aide de la notion de **rayons lumineux** qui vérifient les propriétés suivantes :

- **Propagation rectiligne :** Les rayons lumineux se propagent en ligne droite dans un milieu transparent (d'indice n), homogène (n ne dépend pas de la position) et isotrope (n ne dépend pas de la direction de propagation).
- **Principe du retour inverse de la lumière :** Le trajet suivi par la lumière entre deux points situés sur le même rayon lumineux est indépendant du sens de propagation de la lumière.



- **Indépendance des rayons lumineux :** Il n'y a pas de phénomènes d'interférences, les rayons lumineux qui se croisent n'interagissent pas entre eux, ils se propagent de façon entièrement indépendante.

REMARQUES

 Les rayons lumineux sont un modèle qui permet de décrire la propagation de l'énergie lumineuse dans le cadre de l'optique géométrique, mais il est bien évident qu'en réalité la lumière ne se présente pas sous la forme de rayons infiniment fins. En effet, la diffraction empêche de limiter autant qu'on le souhaite la section des faisceaux lumineux.

II.4 Limite du modèle : la diffraction

Lorsqu'on envoie une onde lumineuse sur un petit obstacle (ou une petite fente), celle-ci se trouve redirigée dans plusieurs directions. Ce phénomène est appelé diffraction.



On ne pourra plus parler de rayon lumineux dans ce cas.

III Lois de Snell (1621) – Descartes (1637)

III.1 Vocabulaire

📖 Définitions

- **Dioptre** : interface séparant deux milieux transparents d'indices différents.
- **Rayon incident** : rayon arrivant sur le dioptre.
- Lorsqu'un rayon lumineux arrive sur un dioptre, ce rayon donne naissance à un **rayon réfléchi** qui repart dans le milieu du rayon incident et à un **rayon réfracté** qui entre dans l'autre milieu.
- Le point I où le rayon incident rencontre le dioptre est appelé **point d'incidence**.
- **Normale** : droite perpendiculaire au dioptre, au point où le rayon incident rencontre le dioptre.
- **Plan d'incidence** : plan contenant la normale et le rayon incident.

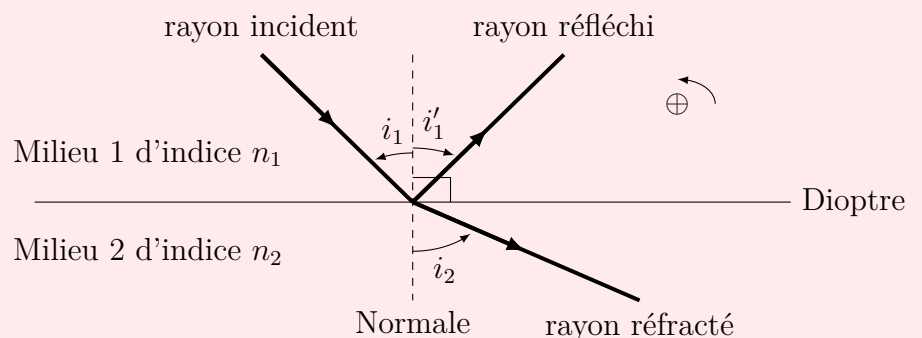
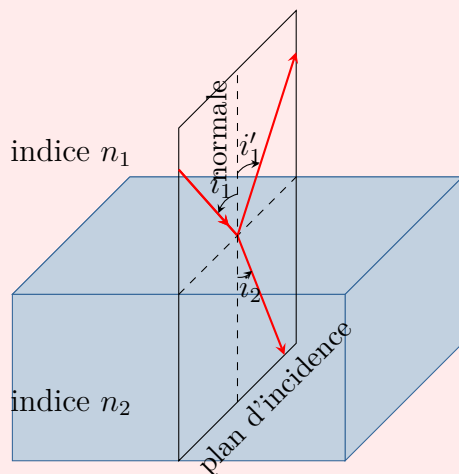
III.2 Angles orientés

📖 Définitions : Angles orientés

- En optique, les angles sont définis **ALGÈBRIQUEMENT** à partir de la normale :
- les angles sont **positifs** pour une **rotation dans le sens trigonométrique** ;
 - les angles sont **négatifs** pour une **rotation dans le sens horaire**.

III.3 Énoncé des lois de Snell-Descartes

♥ À retenir : Énoncés des lois de Snell-Descartes



- 1) Les rayons réfléchi et réfracté appartiennent au plan d'incidence défini par le rayon incident et la normale au point d'incidence.
- 2) L'angle d'incidence i_1 et l'angle de réflexion i'_1 sont opposés : $i'_1 = -i_1$
- 3) L'angle d'incidence i_1 et de réfraction i_2 sont liés par : $n_1 \times \sin(i_1) = n_2 \times \sin(i_2)$

⚠ Attention

- Le point 1) est aussi important que les points 2) et 3) donnant les relations entre les angles.
- L'énoncé des lois de Snell-Descartes doit s'accompagner d'un **schéma complet** sur lequel toutes les notations sont introduites.
- Les rayons réfléchis et réfractés sont de l'autre côté de la normale par rapport au rayon incident.

📺 Animation sur les lois de Descartes

📺 Animation sur la réfraction

📄 Activité n°1 – Quelques conséquences générales

Q1. Que se passe-t-il si le rayon incident arrive selon la normale ?

Q2. Comparer les angles de réfraction et d'incidence selon les valeurs respectives des deux indices de réfraction.

📄 Activité n°2 – Réfractions sur l'eau

Un rayon lumineux dans l'air tombe sur la surface de l'eau d'indice 1,33.

Q1. Déterminer l'angle de réfraction pour un angle d'incidence de 30° .

Q2. Déterminer l'angle d'incidence pour un angle de réfraction de 30° .

III.4 Quelques phénomènes courants (culture)

III.4.a) Les mirages

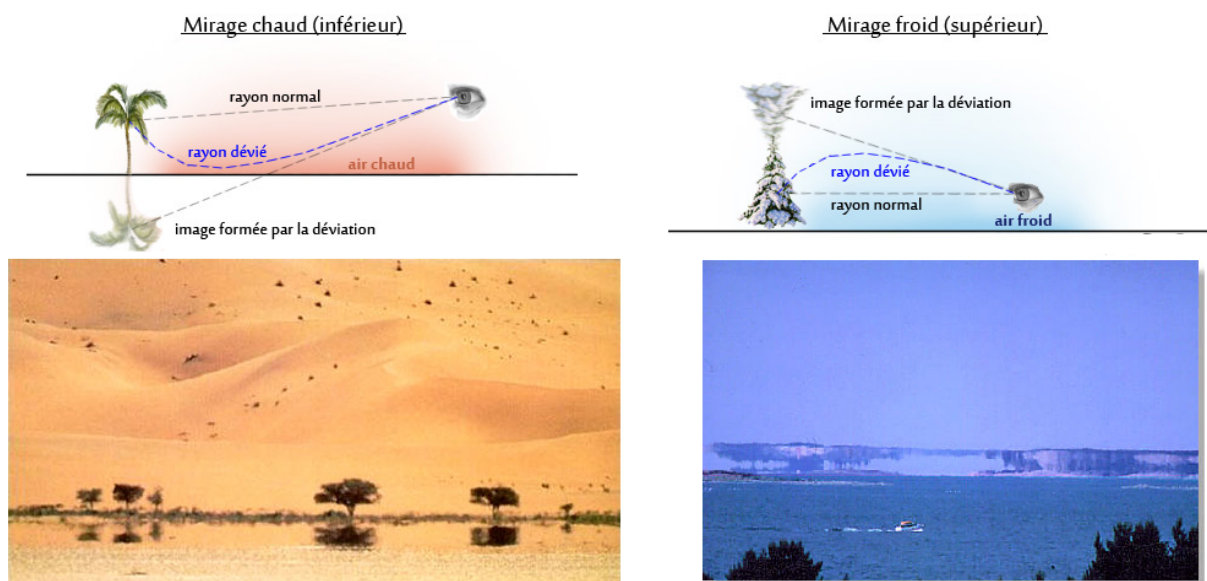


FIGURE 6 – Mirages froid et chaud : les observations sont dues à l'inhomogénéité du milieu traversé par la lumière. La densité de l'air diminue quand la température augmente, ce qui provoque une diminution de l'indice optique. Le milieu n'étant pas homogène, les rayons lumineux ne sont pas rectilignes, mais nos cerveaux interprètent la lumière arrivant dans les yeux comme venant en ligne droite, ce qui donne l'impression de voir quelque chose à un endroit où ça n'est pas : c'est le mirage.

D'après <https://intra-science.anaisequey.com/>

III.4.b) L'arc-en-ciel

Vidéo de Science Étonnante sur la physique de l'arc-en-ciel

L'indice optique des milieux transparents dépend de la fréquence de la lumière : on dit que le milieu est **dispersif**.

D'après la loi de Snell-Descartes, l'angle de réfraction, qui dépend de l'indice optique du milieu et de l'angle d'incidence dépend également de la fréquence de la lumière. Alors, les différentes radiations monochromatiques ne sont pas déviées avec le même angle, ce qui disperse la lumière : on voit séparément chaque radiation monochromatique.

C'est ce phénomène qui vous a permis d'observer les spectres avec des prismes au lycée et qui est à l'origine des arcs-en-ciel.

IV Réflexion totale

IV.1 Condition de réflexion totale

Capacités exigibles : Établir la condition de réflexion totale.

Animation sur la réfraction

Démonstration à maîtriser n°3 – Conditions de réflexion totale

- Q1. Lorsque la lumière passe d'un milieu 1 à un milieu 2 moins réfringent ($n_2 < n_1$), que se passe-t-il si l'angle d'incidence i_1 « devient trop grand » ?
- Q2. Déterminer l'angle d'incidence limite $i_{1,\text{lim}}$ au-delà duquel il n'existe plus de rayon réfracté. Que devient alors l'énergie lumineuse ? Ce phénomène s'appelle la **réflexion totale**.

Méthode : Établir les conditions de réflexion totale

- Vérifier que le rayon lumineux se propage d'un milieu plus réfringent à un milieu moins réfringent (deuxième milieu d'indice plus faible que le premier).
- Calculer l'angle d'incidence limite qui permet d'avoir un angle de réfraction égal à $\frac{\pi}{2}$, en utilisant la loi de Snell-Descartes de la réfraction.
- Il y a réflexion totale si l'angle d'incidence est supérieur à l'angle d'incidence limite.

À retenir : Conditions de réflexion totale

Pour avoir réflexion totale, le rayon réfracté ne doit pas exister. Pour cela, il faut :

- que le rayon lumineux se propage d'un milieu plus réfringent à un milieu moins réfringent (deuxième milieu d'indice plus faible que le premier) ;

ET

- que l'angle d'incidence soit supérieur à l'angle d'incidence limite obtenu pour un angle de réfraction égal à $\frac{\pi}{2}$.

Activité n°4 – Réflexion totale sur un dioptre air-eau

Dans le cas du dioptre air-eau, déterminer les conditions pour avoir réflexion totale.

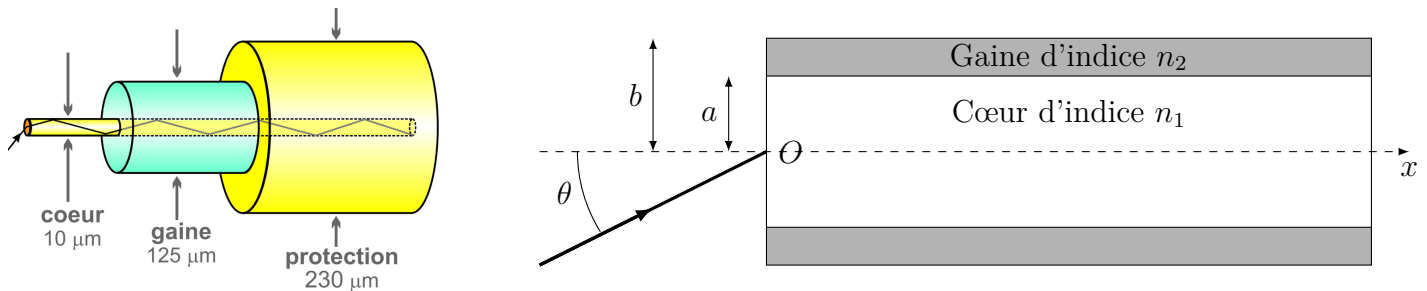
On donne : $n_{\text{air}} = 1,00$ et $n_{\text{eau}} = 1,33$.

IV.2 La fibre optique à saut d'indice

Capacités exigibles : Établir les expressions du cône d'acceptance et de la dispersion intermodale d'une fibre à saut d'indice.

Le guidage de la lumière peut être assuré par des fibres optiques. Une fibre optique est constituée d'un cylindre de verre (ou de plastique) appelé cœur ou âme, LTHI (linéaire, transparent, homogène, isotrope) d'indice n_1 et de rayon R , entourée d'une gaine transparente d'indice de réfraction n_2 . La gaine contribue non seulement aux propriétés mécaniques de la fibre mais évite aussi les fuites de lumière vers d'autres fibres en cas de contact. Actuellement le diamètre du cœur d'une fibre varie de 3 à 200 μm selon les propriétés et le diamètre extérieur de la gaine peut atteindre 400 μm . La gaine est entourée par un matériau protecteur (plastique en général) pour atteindre un diamètre total de l'ordre du millimètre.

Les faces d'entrée et de sortie sont perpendiculaires à l'axe du cylindre (Ox) formé par la fibre. L'ensemble, en particulier la face d'entrée, est en contact avec un milieu d'indice n_0 . On s'intéresse à la trajectoire d'un rayon lumineux situé dans le plan de symétrie contenant l'axe (Ox).



 Animation sur la fibre optique

Définition : Cône d'acceptance

Le **cône d'acceptance** d'une fibre optique est le cône à l'intérieur duquel les rayons incidents seront guidés par réflexion totale interne.

On définit l'**ouverture numérique (ON)** par $n_0 \sin(\theta_{\max})$ où n_0 est l'indice optique du milieu d'où provient le rayon et θ_{\max} l'angle au sommet du cône d'acceptance.

Définition : Dispersion intermodale

Les rayons parvenant dans la fibre avec des angles d'incidence différents suivent des chemins optiques (ou modes) différents. À chaque mode correspond un temps de parcours légèrement différent, ce qui entraîne une **dispersion intermodale**.

On définit le **retard intermodal** qui est le temps de retard à l'arrivée du rayon le plus lent (le plus incliné) par rapport au rayon le plus rapide (rayon axial).

Exercice à maîtriser n°5 – La fibre optique

- Q1. Quel phénomène physique permet de guider la lumière dans la fibre, sans perte d'énergie au cours du parcours ? Comment doit-on alors choisir n_1 et n_2 ? En supposant que cette condition est remplie, faire un schéma du trajet d'un rayon à travers la fibre, en représentant plusieurs réflexions sur l'interface cœur/gaine.
- Q2. Grâce à des tracés, déterminer qualitativement s'il faut que θ soit supérieur ou inférieur à un certain angle limite pour que le rayon reste confiné dans le cœur de la fibre optique.

Cône d'acceptance

- Q3. Établir la condition sur l'angle d'incidence sur le dioptré cœur/gaine pour qu'il s'y produise une réflexion totale.
- Q4. En déduire une condition sur l'angle de réfraction au niveau du dioptré air/cœur.
- Q5. En déduire que ce rayon peut être guidé dans le cœur si le rayon incident parvient dans le cône d'acceptance d'angle au sommet θ_{\max} qui vérifie $\text{ON} = n_0 \sin(\theta_{\max}) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$

On donne : $\sin(\arccos(x)) = \sqrt{1-x^2}$ et $\cos(\arcsin(x)) = \sqrt{1-x^2}$.

Q6. Faire l'application numérique pour : $n_1 = 1,500$ et $n_2 = 1,489$.

Dispersion intermodale

Une impulsion lumineuse arrive à $t = 0$, au point O sur la fibre précédente de longueur L , sous la forme d'un faisceau conique convergent d'axe Ox et de demi-angle au sommet $\theta_i < \theta_{\max}$.

Q7. Quel rayon a la durée de parcours la plus courte ? Déterminer cette durée t_{\min} minimale en fonction de L , n_1 et c .

Q8. Quel rayon a la durée de parcours la plus longue ? Déterminer cette durée t_{\max} maximale en fonction de L , n_1 , c et θ_i .

Q9. Calculer l'élargissement temporel Δt de cette impulsion à la sortie de la fibre, avec $L = 10$ m et $\theta_i = 8^\circ$. Cet élargissement temporel correspond au retard intermodal.

Q10. On envoie à l'entrée de cette fibre des impulsions très brèves de durée δt séparées par un intervalle de temps T (on suppose $\delta t \ll T$). Quelle doit être la valeur minimale de T pour que les impulsions soient séparées à la sortie de la fibre ?

Q11. En transmission numérique, on exprime ce résultat en nombre maximum d'éléments binaires (présence ou absence d'impulsion = bit) qu'on peut transmettre par seconde. Que vaut le débit en bit par seconde (b/s) de la fibre étudiée ?

Les débits maximum que l'on peut obtenir avec des câbles ethernet (constitués de câbles métalliques torsadés) et le wifi sont rassemblés dans le tableau suivant (pour une distance ou une longueur de câble de 10 m).

Wifi	Fast Ethernet	Ethernet Gigabit
54 Mb/s	100 Mb/s	1 Gb/s

Comparer ces débits à celui de la fibre optique.

La fibre optique embobine la Terre

Sébastien BIGO et Jean-Pierre HAMAIDE

Depuis les années 1970, les recherches sur la communication par ondes lumineuses sont aiguillonnées par un objectif permanent : transmettre plus d'information, plus rapidement et sur de plus longues distances.

Toutes les informations que nous échangeons, le son de nos téléphones, le texte de nos fax ou de nos courriers électroniques, nos photos ou nos vidéos, transitent sous forme de lumière dans une fibre optique. Entourée d'une gaine de protection, une fibre optique ressemble à un fil électrique, qui transmettrait la lumière au lieu de l'électricité. La fibre elle-même est un mince cheveu de verre d'un dixième de millimètre de diamètre extérieur. Elle est formée de deux couches de verre concentriques, appelées gaine et cœur. Les deux couches sont composées essentiellement de silice, mais diffèrent par la quantité d'additifs chimiques qu'elles ont reçus lors de la fabrication. Ces additifs altèrent les propriétés optiques des deux couches de verre, de telle sorte que l'indice de réfraction du cœur est plus grand que celui de la gaine. Ainsi le cœur piège et « guide » toute lumière injectée dans la fibre.

La lumière se propage dans la fibre optique à environ 200 000 kilomètres par seconde, vitesse équivalente à celle des ondes électroniques dans un câble électrique. L'intérêt de la fibre optique réside donc non pas dans sa « vitesse », mais dans la possibilité d'y propager des données sans distorsion à un débit, c'est-à-dire un nombre de bits par seconde, largement supérieur à celui accessible dans les autres matériaux connus.

La fibre optique, comme nous le verrons, est aussi un milieu privilégié pour transmettre l'information sur de longues distances. Aujourd'hui, les systèmes à fibre optique quadrillent le monde, sur la terre ferme, autour ou entre les grandes villes, et sous les mers, sur des milliers de kilomètres (voir la figure 1). Les satellites complètent les réseaux de télécommunications mondiaux, pour amener l'information dans des régions d'accès difficile, ou pour établir des liaisons à haut débit temporaires entre deux points. Toutefois la fibre n'a pas d'égal dès qu'il s'agit de former des artères où s'échangent les plus grands volumes de données, aujourd'hui à un téraoctet par seconde (mille milliards de valeurs binaires par seconde). Pour obtenir un tel débit, il a fallu développer plusieurs techniques et astuces. Avant de décrire les dernières en date, comme la modulation de phase et les codes correcteurs de dernière génération, nous vous invitons à suivre le cheminement du signal lumineux à l'intérieur d'une liaison optique standard.

Un mélange de lumières pures

Pour transmettre l'information sur de longues distances, il faut éviter les pertes de signal. Parmi les milieux de propagation possible, la fibre optique présente un coefficient de pertes sans égal, avec seulement quatre pour cent de l'éner-

gie perdue après une distance d'un kilomètre. Toutefois, un tel coefficient n'est accessible que pour certaines couleurs du spectre lumineux, auxquelles le verre de silice est le plus transparent (voir la figure 2). Dans la gamme de couleurs auxquelles notre œil est sensible, on atteint une perte cumulée de quatre pour cent après seulement quelques dizaines de mètres. Pour atteindre des distances de l'ordre du kilomètre, il faut utiliser une lumière invisible, dans le proche infrarouge, à des longueurs d'onde autour de 1,5 micromètre, ce qui signifie environ 200 térahertz en fréquence (un térahertz vaut 10^{12} hertz). Il faut aussi des composants optoélectroniques miniaturisés capables de produire, traiter et détecter de la lumière à 1,5 micromètre.

Les sources lumineuses des fibres optiques sont des lasers à semi-conducteur, longs de quelques dizaines de micromètres seulement. Ceux-ci émettent une lumière à la longueur d'onde adéquate et très pure : leur précision dépasse 0,01 pour mille. Ces lasers fonctionnent en continu. Pour convertir des bits d'information électriques en bits optiques, on fait suivre chaque laser d'un interrupteur optique (un « modulateur »), que contrôle le signal électrique portant les données à transmettre. Ce signal électrique évolue entre deux états, haut et bas, suivant que l'information est « 1 » ou « 0 », à un rythme prédéfini, appelé

fréquence d'information. La fréquence d'information des systèmes optiques actuels atteint 2,5 ou 10 gigahertz (un gigahertz vaut 10^9 hertz), ce qui donne accès à des débits binaires de 2,5 ou 10 gigabits par seconde. Cependant, jusque très récemment, l'électronique disponible n'était pas capable de fournir un modulateur et un dispositif de commande opérant à un tel rythme.

Au lieu de chercher à augmenter la fréquence d'information, il est apparu plus efficace de moduler en parallèle la lumière de plusieurs lasers, chacun d'une couleur différente, que nous appellerons « canaux ». Ces canaux sont combinés entre eux (on dit « multiplexés ») dans une même fibre. Arrivé à destination, le signal est décomposé en canaux (« démultiplexés »), qui sont détectés sur autant de photodiodes qu'il y a de lasers (voir la figure 3). Les longueurs d'onde de deux canaux voisins ne diffèrent que de quelques dixièmes de nanomètre : là réside l'avantage de la remarquable précision en longueur d'onde des lasers à semi-conducteurs.

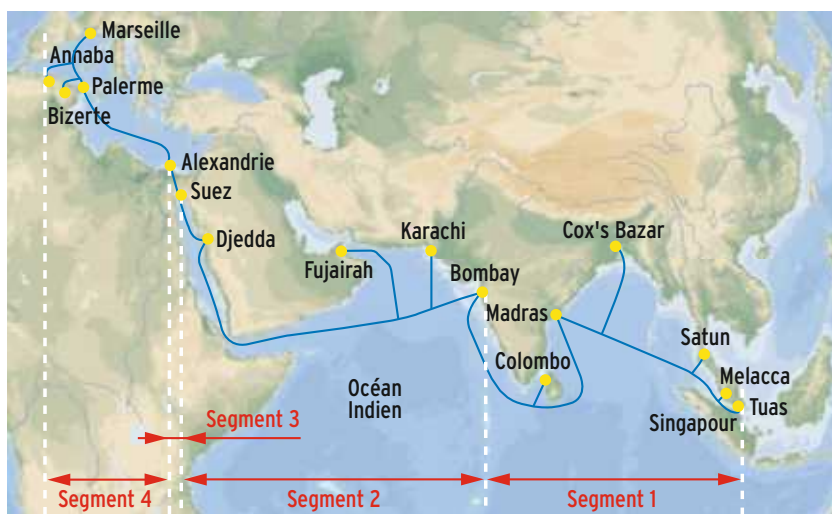
Cette méthode, appelée multiplexage en longueur d'onde (WDM pour *Wavelength Division Multiplexing* en anglais), permet de transmettre dans une seule fibre jusqu'à 100 fois le débit d'un laser individuel : avec 100 canaux à dix gigabits par seconde, on arrive au téra-bit par seconde annoncé ci-dessus. Le multiplexage en longueur d'onde s'est imposé dans les réseaux de télécommunications optiques, aidé en cela par les progrès des dispositifs de multiplexage et démultiplexage optique.

Ces dispositifs sont de deux types. Le premier est une cascade de filtres colorés, chacun laissant passer un canal et réfléchissant tous les autres. Le second, plus fréquent, est un réseau de diffraction : de la même façon qu'un prisme décompose la lumière blanche en ses composantes colorées, le réseau de diffraction dévie un faisceau incident avec un angle qui dépend de sa longueur d'onde. À la sortie du dispositif de démultiplexage, on récupère la lumière de chaque canal dans une fibre dédiée, pourvu que celle-ci soit orientée selon la déviation angulaire adéquate. Le processus est réversible : dans le sens inverse, plusieurs canaux sont multiplexés en un seul faisceau.

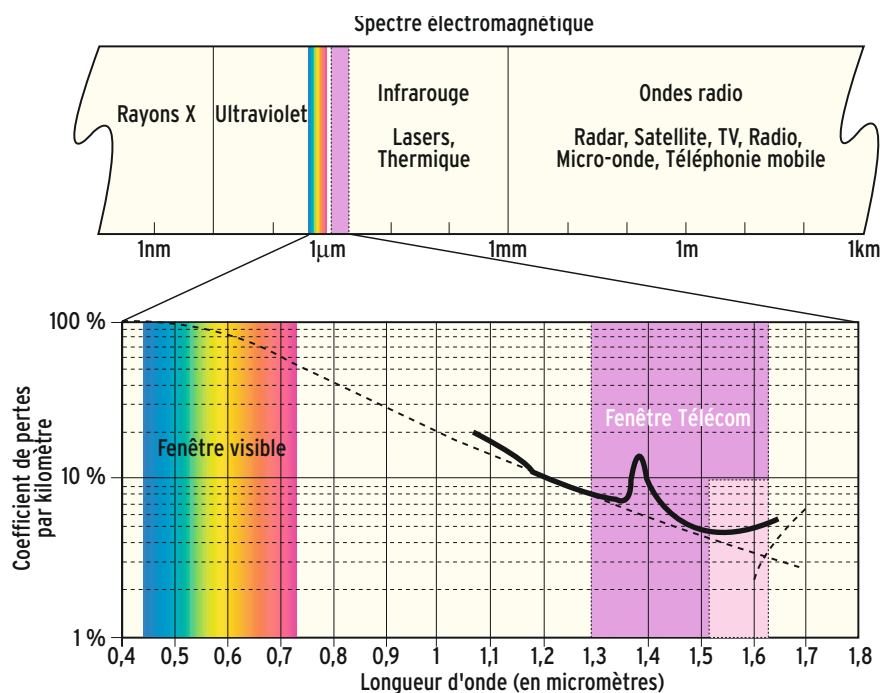
Un coup de fouet périodique

Le multiplexage en longueur d'onde réduit le nombre de fibres nécessaires, et donc le coût de la communication. Une autre raison de son succès tient à sa compatibilité naturelle avec les amplificateurs optiques. En effet, bien que faibles, les pertes de quatre pour cent par kilomètre de fibre se cumulent, si bien qu'après la traversée de l'Atlantique, il ne resterait de

l'énergie injectée que... 10^{-130} . Autrement dit, les meilleures photodiodes ne pourraient détecter aucun signal à New York dans aucune fibre optique, même si l'on y concentrait à Brest toute l'énergie de l'Univers. Des amplificateurs optiques sont nécessaires, afin de redonner un coup de fouet au signal optique et le ramener à son niveau initial. Ils sont répartis au sein de répéteurs, situés tous les 50 à 100 kilomètres de liaison optique.

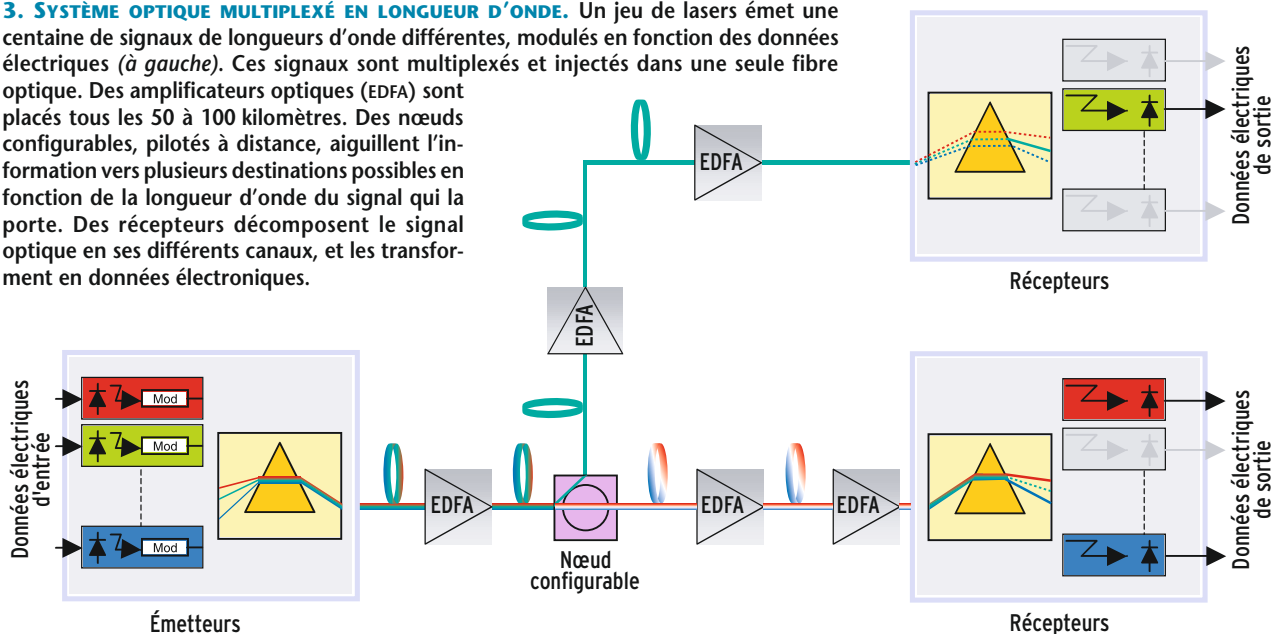


1. LA PLANÈTE EST EMMALOTÉE dans un réseau de télécommunication par fibres optiques. Le système optique le plus moderne (achevé en 2006) relie Marseille à Singapour sur 19 000 kilomètres : il transporte 64 canaux à 10 gigabits par seconde par paire de fibre. Il est fait de quatre segments reliés par des interfaces électroniques.



2. LES FIBRES OPTIQUES sont transparentes à la lumière infrarouge, proche de la lumière visible (en haut). Plus précisément, l'atténuation du signal optique dans la fibre dépend de sa longueur d'onde (courbe noire, en bas) : elle est minimale entre 1,5 et 1,6 micromètre.

3. SYSTÈME OPTIQUE MULTIPLEXÉ EN LONGUEUR D'ONDE. Un jeu de lasers émet une certaine de signaux de longueurs d'onde différentes, modulés en fonction des données électriques (à gauche). Ces signaux sont multiplexés et injectés dans une seule fibre optique. Des amplificateurs optiques (EDFA) sont placés tous les 50 à 100 kilomètres. Des nœuds configurables, pilotés à distance, aiguillent l'information vers plusieurs destinations possibles en fonction de la longueur d'onde du signal qui la porte. Des récepteurs décomposent le signal optique en ses différents canaux, et les transforment en données électroniques.



L'amplification des répéteurs est tout-optique, c'est-à-dire qu'elle se fait sans conversion du signal sous forme électronique ; cela évite d'altérer le débit d'information. Un amplificateur optique de type EDFA (pour *Erbium-Doped Fiber Amplifier* en anglais) est une section de quelques dizaines de mètres de fibre spéciale, au cœur de silice dopé par des ions erbium (voir la figure 4). On injecte dans ce cœur, en plus du signal à amplifier, un faisceau optique de quelques centaines de milliwatts, à la longueur d'onde de 980 nanomètres. Ce faisceau amplifie le signal par émission stimulée : il excite les ions erbium, qui se dés excitent ensuite en rétrocedant au signal leur surplus d'énergie sous forme de photons. Ces photons ont des longueurs d'onde spécifiques, caractéristiques de l'ion Er^{3+} , si bien qu'un EDFA traditionnel ne peut amplifier que les canaux dont les longueurs d'onde sont comprises dans une bande de 30 à 50 nanomètres autour de 1,55 micromètre. Aujourd'hui, un EDFA délivre un coefficient de gain uniforme à toutes les longueurs d'onde dans cette bande, ce qui est d'un intérêt pratique lorsque le système compte plusieurs dizaines de canaux.

Au bout de la liaison optique, un récepteur convertit la lumière en un signal électrique à deux états. Pour cela, il compare le signal optique détecté avec un seuil de référence : au-dessus du seuil, le signal est reconnu et transcrit comme un « 1 » électrique ; au-dessous, c'est un « 0 » électrique. Toutefois, comme tout

amplificateur, chaque EDFA affecte le signal par de petites perturbations aléatoires de son amplitude et de sa phase, que l'on désigne sous le terme générique de bruit. Ce bruit est d'autant plus élevé que les pertes de la fibre à compenser sont grandes. Au total, il augmente proportionnellement avec le nombre d'amplificateurs placés périodiquement le long de la liaison optique, et donc avec la longueur de la liaison.

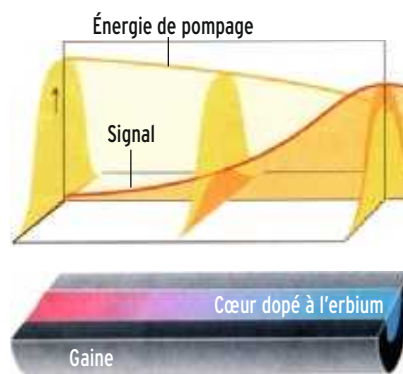
Lorsque la distance à couvrir augmente, le bruit rend plus difficile la discrimination entre les « 1 » et les « 0 », et le nombre d'erreurs (de « 1 » pris pour des « 0 », et de « 0 » pris pour des « 1 ») peut dépasser le très faible seuil garanti de une erreur sur 10^{12} bits transmis. Un moyen pour corriger ce désagrément est d'améliorer le rapport signal

sur bruit, en augmentant la puissance du signal en sortie de tous les amplificateurs optiques. Malheureusement on s'expose alors à des effets non linéaires optiques, qui brouillent le signal.

Ces effets sont exacerbés par la géométrie de la fibre : un cœur de faible diamètre et des longueurs de plusieurs centaines de kilomètres. En conséquence, l'indice de réfraction de la fibre dépend de la puissance du signal : il varie selon que l'information transmise par un canal est un « 1 » ou un « 0 », mais aussi selon la valeur du signal des canaux voisins. Il en résulte des déformations temporelles des données optiques, qui se combinent à celles causées par le bruit des amplificateurs et compliquent, voire empêchent la discrimination entre les « 1 » et les « 0 ». Finalement, la spécification des puissances optiques dans un système résulte d'un compromis entre le bruit et les effets non linéaires optiques.

Deux techniques clés

Pour anticiper la croissance du volume de données échangées, plusieurs laboratoires dans le monde étudient des systèmes optiques qui présentent un débit par canal de 40 gigabits par seconde. En 2001, deux équipes d'*Alcatel* et de *NEC* ont atteint le débit le plus élevé, à dix térabits par seconde, à partir de l'équivalent d'environ 250 canaux à 40 gigabits par seconde. Malheureusement la distance de propagation était limitée à



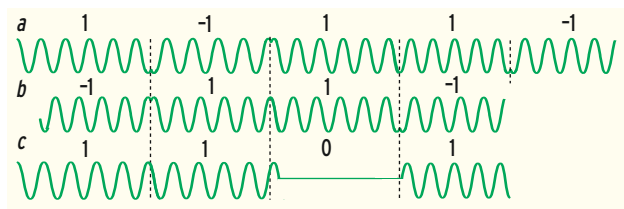
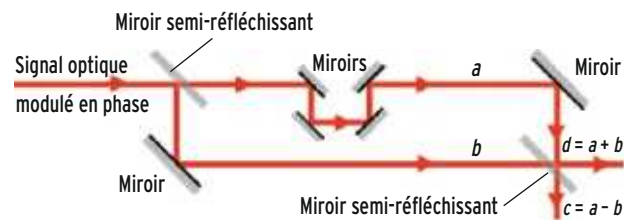
4. UN AMPLIFICATEUR OPTIQUE (EDFA) est une fibre optique dont le cœur dopé à l'erbium propage à la fois le signal et un rayonnement de pompage. Les atomes d'erbium absorbent le rayonnement de pompage, puis transfèrent leur énergie aux signaux.

trois fois 100 kilomètres. La même équipe d'Alcatel a réalisé en 2004 une expérience de transmission avec un débit total record à peine inférieur, de six térabits par seconde, sur la distance transatlantique de 6 120 kilomètres : ce débit correspond à dix millions de personnes qui enverraient simultanément, de l'autre côté de l'océan et dans une seule fibre optique, des données à haut débit à dix autres millions de personnes.

Pour y parvenir, entre autres innovations, l'équipe d'Alcatel a changé le format de modulation. Au lieu d'allumer et éteindre la lumière d'un canal selon l'information binaire, comme on le fait dans les systèmes actuels, le laser reste allumé, et c'est sa phase que l'on fait varier de π selon que l'information à transmettre est un « 1 » ou un « 0 ». Autrement dit, le train de données à transmettre est constitué d'impulsions « +1 » et « -1 ».

Ce format de modulation est intéressant parce que deux impulsions consécutives déphasées de π restent mieux séparées. Ainsi, les interactions entre impulsions voisines causées par les effets non linéaires s'en trouvent réduites. Cependant les détecteurs optiques ne sont pas sensibles à la phase. Il faut donc convertir de nouveau le signal modulé en phase en un signal modulé en amplitude détectable. C'est une problématique fréquente en optique, qui trouve sa solution la plus simple dans l'interférométrie : il suffit de comparer le signal avec lui-même, mais décalé d'un bit.

Pour cela, on divise le faisceau en deux faisceaux identiques avant de les recombiner dans un interféromètre à deux bras, dont un est plus long que l'autre de la longueur équivalente à un bit. Ainsi, quand deux bits consécutifs ont la même phase, l'interféromètre est bloquant (signal « 0 »). Il devient passant (signal « 1 ») quand deux bits consécutifs sont en opposition de phase (voir la figure 5). Cette technique, dénommée détection différentielle, présente un avantage supplémentaire : elle supporte deux fois plus de bruit que la détection habituelle.



5. MODULATION DE PHASE. Les « 1 » et « 0 » sont modulés sous forme de « +1 » et « -1 » déphasés de π (a). Pour lire ce type de message, on fait interférer le signal avec lui-même, décalé d'un bit (b) : quand deux bits successifs ont la même phase, le signal est « 0 », s'ils sont en opposition de phase, le signal est « 1 » (c).

On améliore encore la transmission en utilisant des codes correcteurs d'erreurs, disponibles à très haut débit depuis seulement quelques années. Les codes d'erreurs consistent à calculer des bits supplémentaires à partir de l'information binaire, et à les transmettre avec l'information. Les bits supplémentaires sont « redondants ». Comme les erreurs sont aléatoires, il est très peu probable qu'elles affectent à la fois les bits d'information et les bits redondants correspondants. En analysant les bits reçus, on identifie les erreurs survenues. On peut même les corriger, puisqu'on connaît la relation de calcul entre l'information et les bits redondants.

Les codes d'erreurs les plus performants utilisés dans les télécommunications optiques limitent le taux d'erreurs en sortie à 1 sur 10^{12} bits utiles, contre un bit faux sur 1 000 en moyenne sans code correcteur. On obtient ce résultat en n'utilisant que sept pour cent de bits redondants supplémentaires, c'est-à-dire en travaillant au débit de 10,7 gigabits par seconde au lieu de 10, ou de 42,7 gigabits par seconde au lieu de 40.

Des nœuds transparents

Les résultats atteints grâce au multiplexage en longueur d'onde ont favorisé l'émergence de l'optique pour remplir d'autres fonctions que la simple transmission dans les réseaux de télécommunications. Ces réseaux sont constitués de liaisons optiques qui se croisent en des nœuds, le plus souvent dans les grandes villes. Aujourd'hui, la plupart de ces nœuds

sont électroniques : l'information y est soit insérée, soit extraite, soit simplement en transit. Autrement dit, l'information optique de chaque canal est convertie en signal électronique à son arrivée dans un nœud, même si elle n'est qu'en transit vers le nœud suivant. Or ce traitement électronique, inutile pour une information en transit, est coûteux.

Les ingénieurs préparent aujourd'hui des nœuds partiellement transparents en optique, afin que les informations circulent sous forme optique jusqu'à leur destination.

La solution retenue consiste à réserver certaines longueurs d'onde pour l'information en transit, tandis que d'autres longueurs d'onde portent l'information insérée ou extraite localement, donc converties en données électroniques.

Les nœuds transparents s'imposent d'autant mieux s'ils seront dotés de fonctionnalités réservées aux circuits électroniques dans les systèmes actuels, à savoir des possibilités de re-configurations à distance. Jusque récemment, quand un client réservait une ou plusieurs longueur(s) d'onde, l'opérateur du réseau devait intervenir physiquement sur la liaison. Désormais, des dispositifs optiques d'aiguillage (ou « commutation »), sélectifs en longueur d'onde, permettent d'éviter de telles interventions. L'optique sert, non plus seulement à la transmission de l'information, mais aussi à sa commutation. Ainsi, une nouvelle phase de l'expansion de l'optique aux réseaux de télécommunications est sur le point d'être franchie.

Sébastien BIGO et Jean-Pierre HAMAIDE sont chercheurs pour la Société Alcatel.

E. DESURVIRE, B. DESTHIEUX, D. BAYART et S. BIGO, *Erbium-doped fiber amplifiers : device and system developments*, J. Wiley & Sons, New York, 2002.

G.P. AGRAWAL, *Nonlinear fiber optics*, 2nd Edition, Academic Press, San Diego, 1997.

S. BIGO, *Multi-terabit/s DWDM terrestrial transmission with bandwidth-limiting optical filtering*, papier invité in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, numéro spécial *Optical Communication*, vol. 10, n° 2, pp. 329-340, mars-avril 2004.

IEEE Proceedings of the IEEE, numéro spécial *Technologies for next-generation optical networks*, vol. 94, n° 5, mai 2006.