

INTERNET DANS UN GRAIN DE SABLE

Les fibres optiques

Dans le réseau internet, le transport de l'information d'un point à l'autre se fait généralement au moyen d'une onde électromagnétique.

La lumière visible

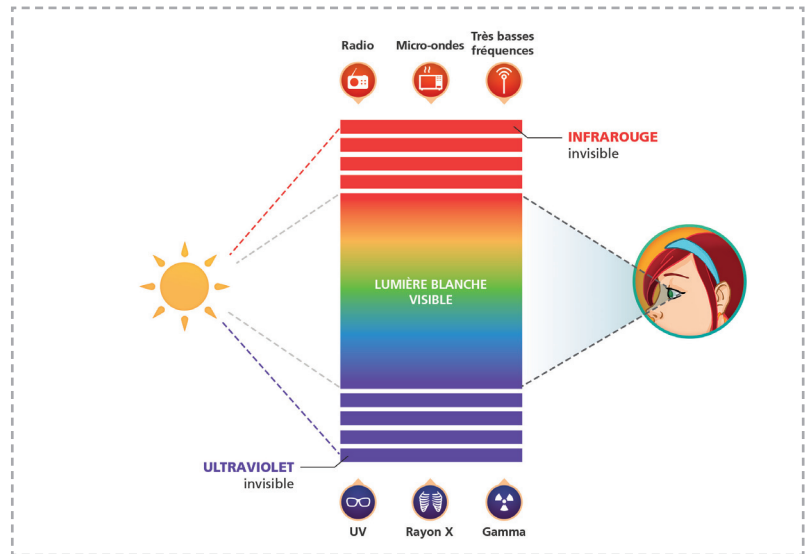
Les rayons du Soleil sont des ondes électromagnétiques. Notre œil n'en voit qu'une petite partie : c'est la lumière visible ou lumière blanche. L'arc-en-ciel ou la traversée d'un prisme en verre par un rayon de lumière blanche nous montre que cette lumière visible est elle-même constituée de très nombreux rayons lumineux, chacun d'une couleur différente (Figure 1).



Un **prisme** est un solide de forme pyramidal.

Figure 1

Décomposition de la lumière blanche à travers un prisme.





Nous ne voyons pas la plus grande partie des rayons du Soleil, pourtant nous savons qu'ils existent : par exemple, les rayons ultraviolets (UV) détruisent notre peau et nous devons nous en protéger avec des crèmes solaires. Les rayons infrarouges ou les rayons des fours micro-ondes sont des rayons qui chauffent.

Il faut donc caractériser ces rayons que nous ne voyons pas, par autre chose que leur couleur. Comme toutes les ondes, une onde électromagnétique est caractérisée par sa longueur d'onde λ .

Pour comprendre, prenons comme exemple un caillou jeté dans l'eau, il crée une onde de choc : le niveau de l'eau descend et remonte régulièrement en fonction du temps. Cette onde se déplace à partir du point de chute du caillou puisque l'on voit des cercles successifs dont le rayon s'agrandit avec le temps (*Figure 2*).

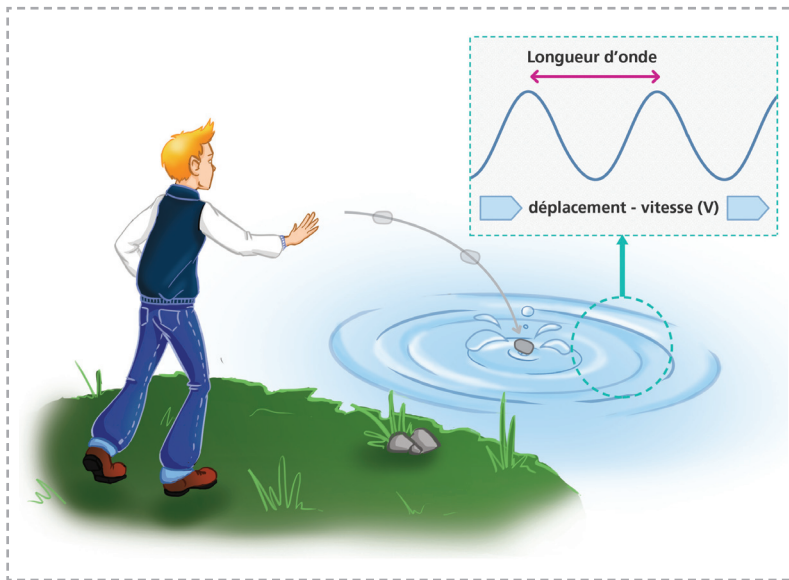


Figure 2

Création d'une onde de choc provoquée par le jet d'un caillou dans l'eau.



La Longueur d'onde λ est la distance entre deux points, où l'eau monte ou descend de façon identique ; pour la mesurer facilement, il faut prendre la distance entre deux crêtes ou deux trous.

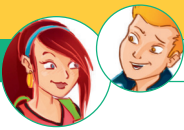


La vitesse V de l'onde est la vitesse avec laquelle les crêtes et/ou les trous se déplacent.

Qu'est-ce qu'une onde électromagnétique ?

Un aimant crée un champ magnétique B qui par exemple attire les objets métalliques.

Dans une batterie, l'électrode positive attire les éléments porteurs de charges négatives, tandis que l'électrode négative attire les éléments



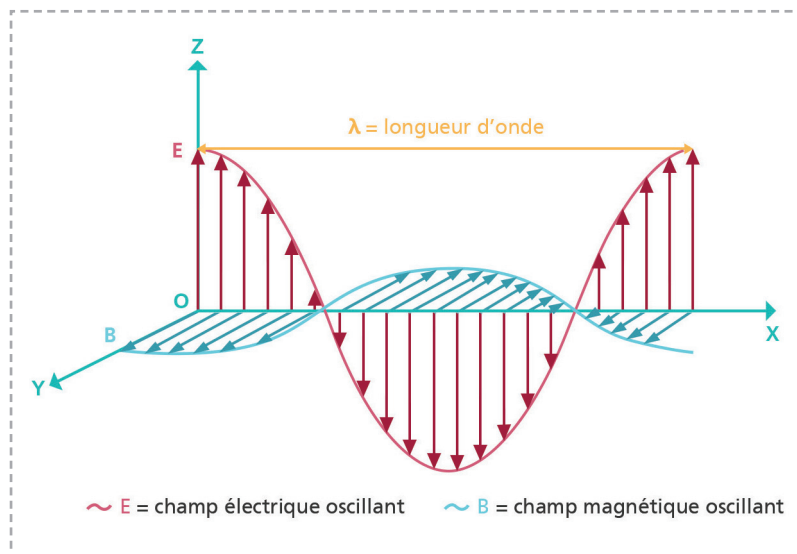
porteurs de charges positives : cela parce qu'il existe un champ électrique E entre les deux électrodes d'une batterie.

Une onde électromagnétique est constituée d'un champ magnétique et d'un champ électrique perpendiculaires l'un à l'autre. Comme la hauteur des ondes qui se propagent à la surface de l'eau, la valeur de ces deux champs oscille régulièrement avec le temps.

De même que l'onde à la surface de l'eau, les deux champs électrique et magnétique se propagent ensemble, et dans une direction orthogonale avec une vitesse V (Figure 3).

Figure 3

Dessin d'une propagation de champs électrique et magnétique.



Remarque

La propagation de ces ondes s'effectue à une vitesse V qui dépend du milieu dans lequel elle se déplace. Dans le vide, cette vitesse est de 300 000 km/s.

Comme toutes les ondes, l'onde électromagnétique (soit le rayon lumineux) est caractérisée par sa longueur d'onde λ : c'est la distance qui sépare deux crêtes (ou deux minima) de la figure 3.

Elle s'exprime en nanomètre (1/1 000 000 000 m), en micromètre (1/1 000 000 m) ou en millimètre.

La longueur des ondes utilisées dans les communications Internet est de l'ordre du millimètre, c'est-à-dire très proche de celle des rayons de la lumière visible, du côté du rouge (Figure 4).

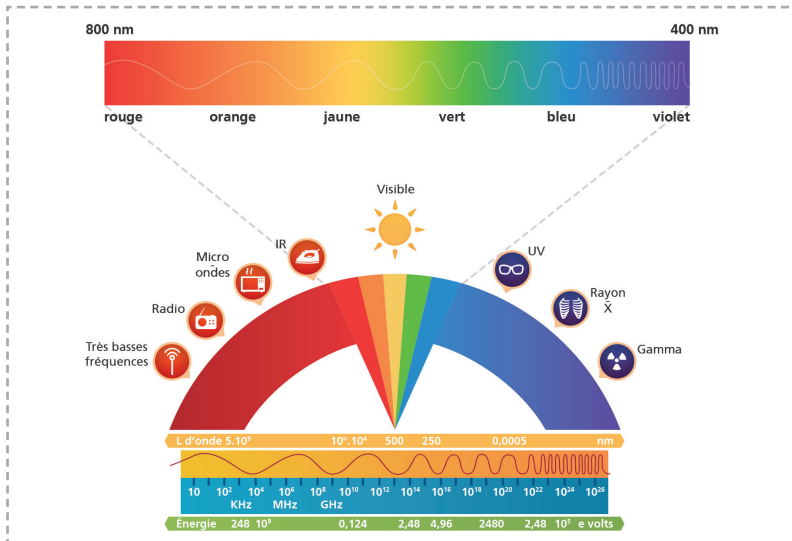


Figure 4

Spectre électromagnétique qui caractérise les ondes en fonction de leur longueur d'onde.

La lumière peut-elle rester prisonnière d'un milieu transparent ?

La réponse est oui et pour le prouver rappelons l'expérience simple de la fontaine lumineuse de Daniel Colladon (1884) : la lumière reste prisonnière du filet d'eau dans lequel elle se propage (Figure 5).

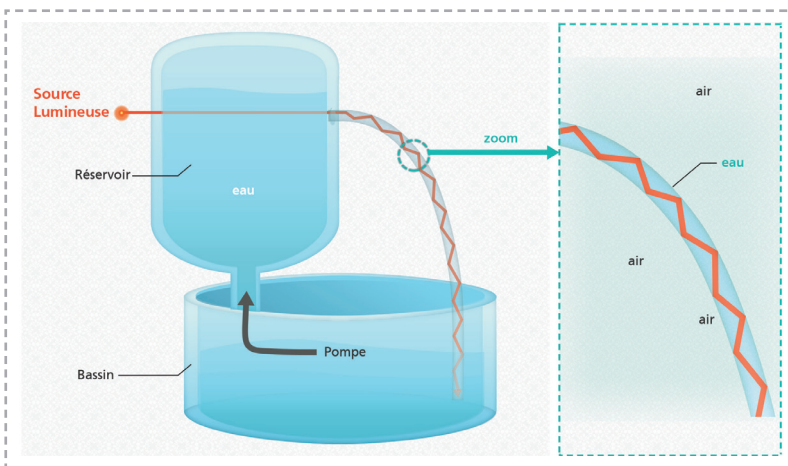
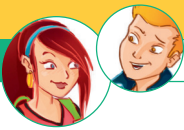


Figure 5

L'expérience de la fontaine lumineuse de Daniel Colladon (1884).

De même, la lumière d'un rayon laser reste prisonnière d'une fibre optique dans laquelle elle se propage (Figure 6).



C'est ce phénomène qui est utilisé dans les communications Internet, la microchirurgie de l'œil, les images internes du corps humain.

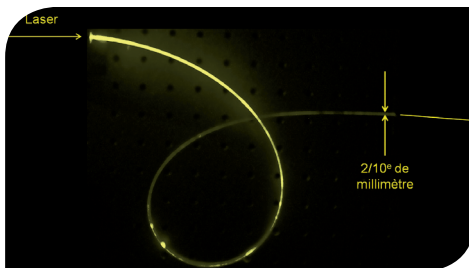


Figure 6

Rayonnement laser injecté puis véhiculé dans une fibre optique. Une fibre optique dirige la lumière laser sur plusieurs dizaines de kilomètres.



Remarque

Le diamètre d'une fibre optique est à peine plus gros que celui d'un cheveu. Un matériau entoure la fibre pour la protéger du vieillissement, des chocs, ou de la pression. Grâce à cette protection, une fibre optique peut se courber et diriger la lumière sur plusieurs dizaines de kilomètres.

Qu'est-ce qu'une fibre optique ? Quel est son fonctionnement ?

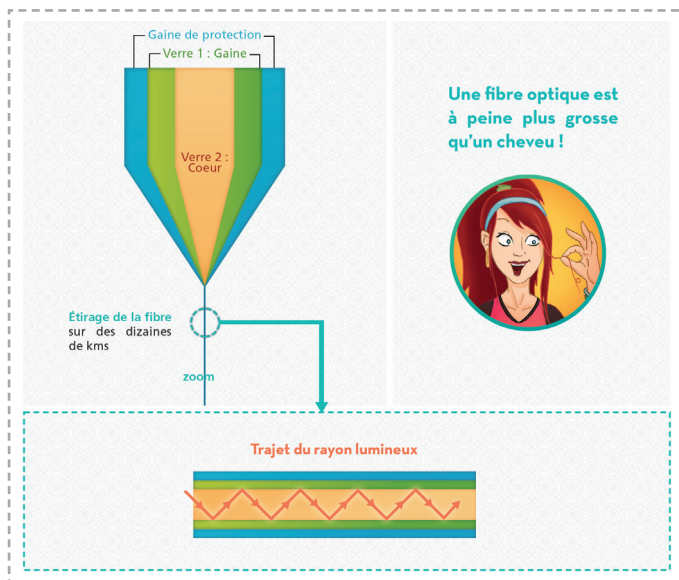
La lumière reste prisonnière du filet d'eau parce qu'elle se déplace moins vite dans l'eau que dans l'air et qu'elle est réfléchiée à l'interface eau-air.

Pour que la lumière reste prisonnière dans une fibre optique, il faut donc que le cœur de la fibre joue le rôle de l'eau et la gaine celui de l'air.

Une fibre optique est un assemblage concentrique de deux verres (Figure 7) dans lequel la lumière circule moins vite dans la partie centrale que dans la gaine.

Figure 7

Constitution d'une fibre optique.





Comment fabriquer une fibre optique ?

La silice ultra-pure pour la transparence

Les fibres optiques comme les grains de sable sont faites de silice. Mais ces derniers ne sont pas transparents car la silice des grains de sable contient beaucoup d'impuretés. Les fibres optiques qui sont le matériau le plus transparent au monde, sont constituées de silice ultra-pure fabriquée par synthèse chimique.

Les fibres optiques sont capables de transporter les ondes lumineuses sur plusieurs dizaines de kilomètres. Cette transparence peut se comparer à la vision d'une flamme de bougie à travers une épaisseur de verre de 100 km (Figure 8).



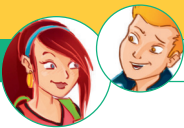
Remarque

La silice ultra-pure contient moins de 1/1 000 000 000 % d'impureté donc moins d'une impureté par milliard d'éléments.



Figure 8

Transport des ondes lumineuses par la fibre optique sur plusieurs dizaines de kilomètres.



L'indice de réfraction

caractérise les milieux transparents pour le transport des ondes électromagnétiques. Il dépend de la vitesse de l'onde dans le milieu transparent.



Remarque

L'indice de réfraction pour un rayonnement donné varie avec la nature et la quantité d'élément dopant ajouté dans la silice.

Maintenir la lumière prisonnière

Dans les fibres optiques, la gaine périphérique est en silice de synthèse ultra-pure.

Pour qu'un rayon lumineux reste prisonnier du cœur de la fibre, il faut que sa vitesse dans le cœur soit inférieure à sa vitesse dans la silice ultra-pure qui constitue la gaine.

Pour que le rayonnement reste prisonnier du tube central, il faut donc que l'indice de la silice dopée soit plus grand que celui de la silice ultra-pure qui constitue la gaine extérieure.

Pour réaliser cela, il faut ajouter des éléments dans la silice du tube central, selon un procédé appelé le dopage.

Les éléments les plus utilisés sont le germanium (Ge), l'aluminium (Al) et le fluor (F) (*Figure 10*).

La fabrication d'une fibre optique se fait en deux étapes : la fabrication de la préforme en silice ultra-pure (la gaine), sur la paroi intérieure de laquelle on dépose et ajuste les quantités d'éléments dopants, puis son étirage.

Le dopage

Le dopage est réalisé à partir d'un mélange gazeux constitué d'oxygène, de chlorure de silicium (SiCl_4) et de chlorure de l'élément dopant choisi, ici le chlorure de germanium (GeCl_4), injecté au centre du tube creux de silice ultra-pure mis en rotation et qui servira de gaine.

Un chalumeau se déplace le long du tube et chauffe le mélange de chlorures gazeux à 1 200 °C, celui-ci réagit avec l'oxygène et produit un mélange homogène de suies composé de silice SiO_2 et d'oxyde de germanium GeO_2 , qui se dépose en fine couche sur la paroi interne de la gaine de silice ultra-pure. Le chlore gazeux (Cl_2) résultant est évacué.

Quand la température du chalumeau est ensuite élevée à 1 400 °C, le mélange se vitrifie c'est-à-dire se transforme en verre de silice transparent, mais dans lequel certains atomes de silice seront remplacés par des atomes de germanium (*Figure 9*).

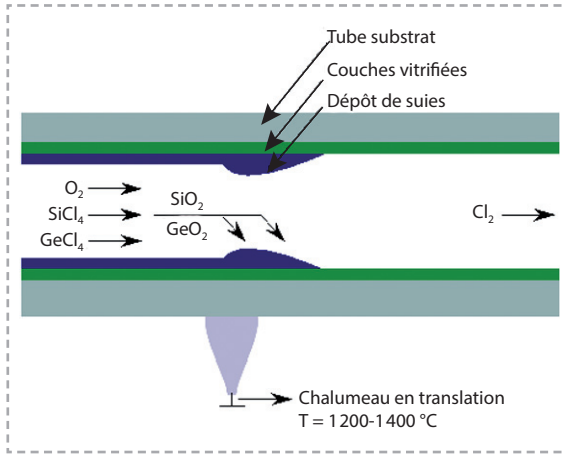


Figure 9

Principe du dopage de la gaine (tube) d'une fibre optique.

L'étrépage

Dans l'étape suivante (Figure 10), l'intérieur du tube est mis sous vide puis chauffé à 1 600 °C : il se referme (partie droite de la Figure 10) et on obtient un tube plein (Figure 10) dont le cœur est en silice dopée au germanium et la gaine en silice ultra-pure.

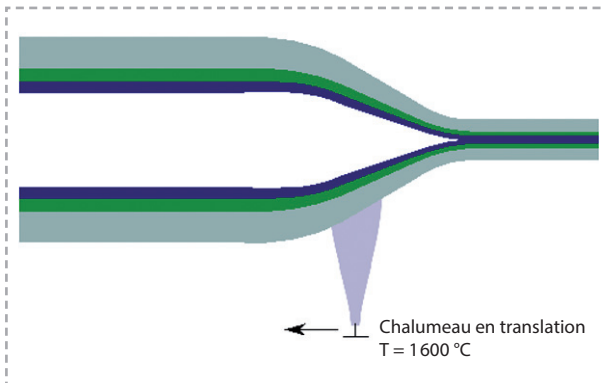


Figure 10

Fermeture de la gaine

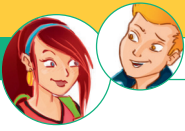
Le fibrage

Ce tube est ensuite étiré en fibre dans une tour de fibrage. Le tube est d'abord ramolli dans un four à 1 800 °C, puis sous l'effet de la pesanteur, il coule sous forme d'un mince fil qui constitue la fibre optique qui est ensuite enroulée sur un support appelé une recette.



Remarque

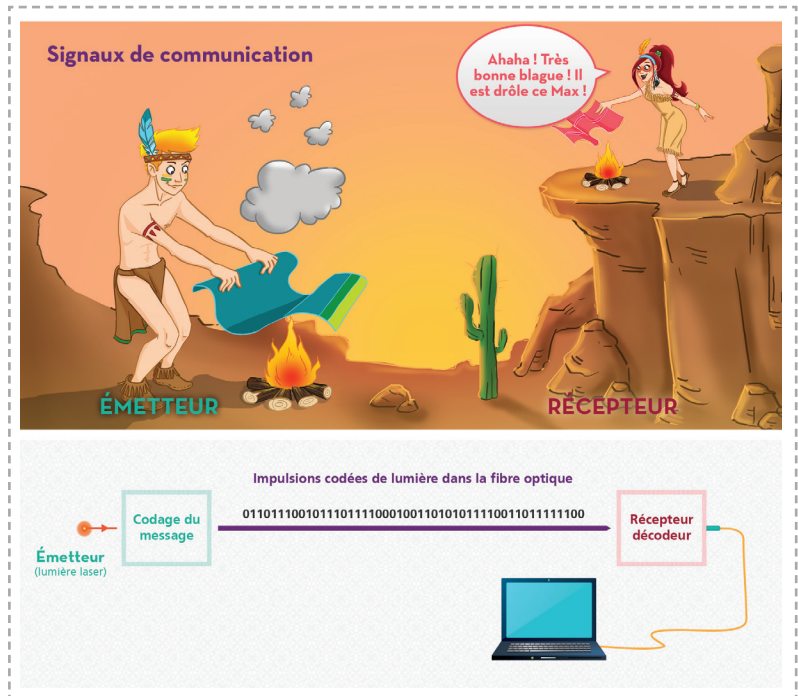
On contrôle, au cours du fibrage, le diamètre et la tension du fil, qui influent beaucoup sur la propagation des ondes dans la fibre ainsi que sur la déperdition.



La transmission des informations : des Indiens à la fibre optique

Figure 11

Principe de transport par la fibre optique des impulsions de lumière codées.



De la fumée au rayonnement laser

Il y a plusieurs siècles, les Indiens transmettaient les informations à partir de signaux de fumée découpés en petits nuages dont la taille, le nombre et la fréquence d'apparition formaient un message qui avait un sens pour l'émetteur et pour le récepteur.

Dans les communications par fibre optique, le faisceau laser remplace la fumée. Les impulsions de lumière remplacent les petits nuages de fumée, et pour le reste c'est pareil (Figure 11) !



Le code résulte toujours d'un accord entre l'émetteur et le récepteur.

L'Indien cherche à augmenter le nombre d'informations transmises en une seconde, c'est-à-dire le nombre de petits nuages tandis que dans la fibre optique, c'est le nombre d'impulsions de lumière en une seconde qu'il faut augmenter.

De la communication de colline en colline, à celle entre les continents

Les messages doivent être envoyés à de grandes distances. Les Indiens avaient des relais de colline en colline.

Pour les fibres optiques, c'est le même principe. La puissance du signal lumineux disparaît après une distance parcourue de 100 km, alors qu'il faut acheminer les informations au-delà des océans à des dizaines de milliers de kilomètres.

Pour cela, on remplace les Indiens en relais sur chaque colline par des amplificateurs de lumière placés sur le trajet de la fibre optique qui transporte la lumière (Figure 12).



Remarque

Actuellement, on sait envoyer 10 milliards d'impulsions lumineuses par seconde.



Les **amplificateurs** de lumière sont aussi des fibres optiques mais pourvues d'éléments dopants de nature différente, de celles qui transportent la lumière.

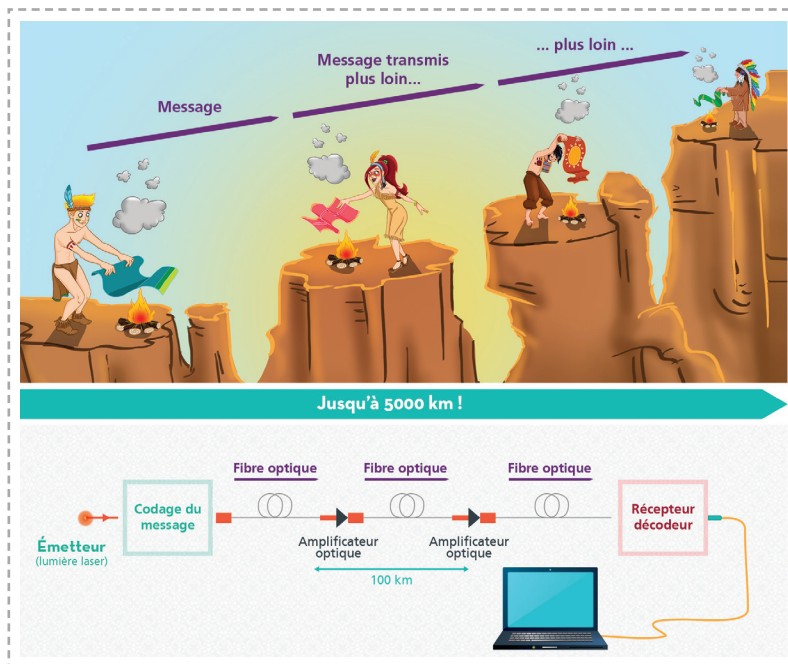
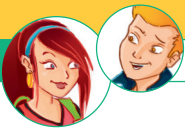


Figure 12

Toujours plus loin grâce aux amplificateurs optiques.



Remarque

On peut obtenir des gains de 1 000 en intensité, avec des fibres amplificatrices d'une longueur de 10 mètres.

L'amplificateur est une fibre optique dont la partie centrale est dopée avec des ions positifs de métaux de la famille chimique des terres rares notamment avec des ions erbium Er^{3+} .

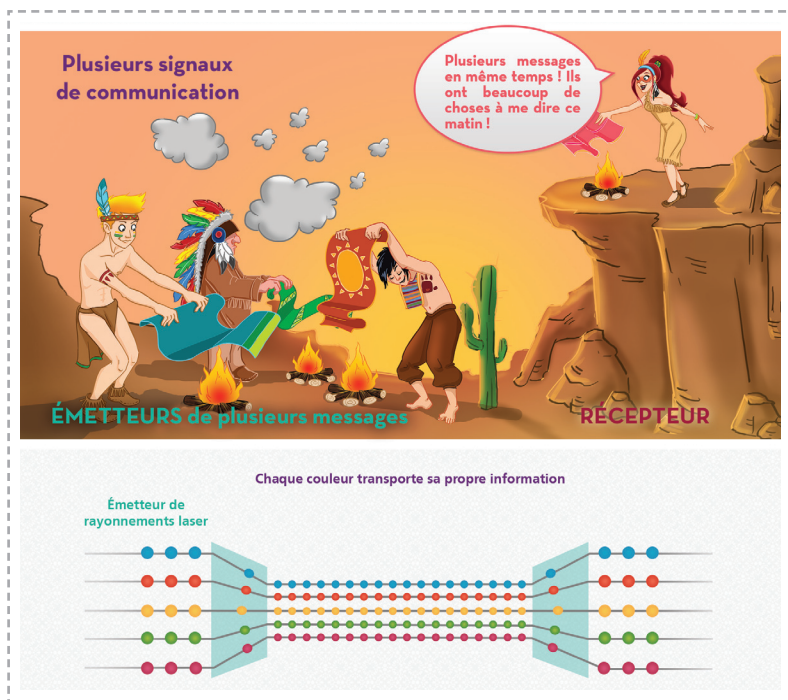
Comme l'Indien, ces fibres amplificatrices restituent l'intensité du signal lumineux affaibli.

Pour véhiculer plusieurs messages à la fois, il fallait plusieurs Indiens ! Maintenant, il suffit d'une fibre optique et une fibre amplificatrice puisqu'elles peuvent transporter, simultanément, plusieurs dizaines de rayonnements laser différents, chacun apportant sa propre information (Figure 13).

Tout se passe comme si on injectait plusieurs couleurs dans une liaison optique, sans qu'elles se mélangent.

Figure 13

Toujours plus de messages grâce aux fibres amplificatrices (transport simultané de plusieurs dizaines de rayonnements laser).





Des fibres optiques au réseau Internet mondial

Les fibres optiques sont très fines et très longues donc fragiles et pourtant elles doivent durer des dizaines d'années dans des conditions extrêmement difficiles : il faut donc les protéger dans des câbles.



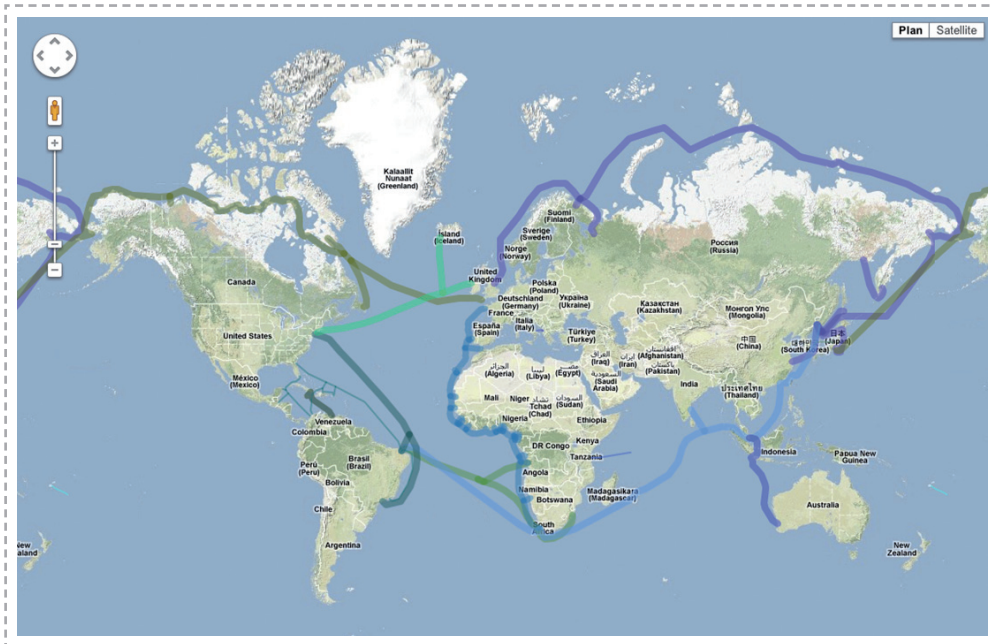
Remarque

Pour assurer leur longévité, il a fallu mettre au point des câbles capables de résister à la pression de l'eau au fond des océans, c'est-à-dire à la pression de colonnes d'eau de plusieurs kilomètres de hauteur et produire des milliers de kilomètres de ces câbles pour permettre le développement du réseau Internet.

La *figure 14* montre la répartition des câbles à fibre optique (traits de couleurs sur la carte) sur la planète. Pour satisfaire la demande toujours croissante, il faudrait doubler la capacité tous les 18 mois !

Figure 14

Répartition des nouveaux câbles à fibre optique sur la planète.





Cela coûterait trop cher, il faut donc augmenter les capacités de transmission, à savoir le nombre de messages par fibre, ou encore le nombre de rayonnements transportés.

Pour réaliser cela, les chimistes, les physiciens et les mathématiciens doivent travailler en étroite collaboration pour concevoir de nouveaux matériaux qui conduiront vers la fabrication de nouvelles fibres.



Remarque

En variant la nature et la quantité des éléments dopants, les fibres optiques sont maintenant capables de transporter des rayonnements lasers très différents de ceux utilisés pour Internet.

Conclusion

Les applications des fibres optiques aujourd'hui et demain

On peut désormais les utiliser dans des applications aussi diverses que :

- sonder les puits de pétrole pour en déterminer le volume ;
- faire de la soudure de précision ;
- relever en temps réel les déformations d'un pont ou d'un barrage pour permettre, par exemple, de sécuriser les infrastructures ;
- générer des impulsions lumineuses géantes utilisées en microchirurgie (de l'œil par exemple) ;
- réaliser des images à l'intérieur du corps humain ;
- réaliser des lasers infrarouges mille fois plus brillants que le Soleil qui permettraient de détecter les traces d'espèces polluantes de l'atmosphère (recherches en cours).