

Table des matières

1	Introduction.....	9
2	Avant-propos	11
3	L'application majeure de la fibre optique : les télécommunications.....	15
3.1	Systèmes de transmission par fibre optique	15
3.2	Émission et détection de lumière en télécommunications	16
3.2.1	Émission de lumière en télécommunications par fibre optique.....	17
3.2.2	Détection de lumière en télécommunications par fibre optique	27
4	La fibre optique, sa composition, sa fabrication et ses propriétés.....	29
4.1	Un peu d'histoire	29
4.2	Composition de la fibre optique.....	30
4.3	Fabrication d'une fibre optique.....	35
4.3.1	Fabrication de la préforme.....	35
4.3.2	Fabrication de la fibre à partir de la préforme.....	41
4.4	Types de fibre optique.....	43
4.5	Le paramètre fondamental de la fibre optique	43
4.5.1	L'indice de réfraction, définition et détermination	45
4.5.2	Détermination de l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde	50
4.6	La dispersion intermodale dans les fibres multimodes	71
4.7	Un autre type de dispersion : la dispersion des modes de polarisation	77
4.7.1	Les lasers et la polarisation	77
4.7.2	La sphère de Poincaré, utile pour observer les états de polarisation	84

4.7.3	Le vecteur et paramètres de Stokes, utiles pour décrire la polarisation.....	86
4.7.4	Qu'est que la PMD a à voir avec la fibre optique	88
5	Propagation de la lumière dans la fibre optique	101
5.1	La loi de Snell-Descartes, qu'est-ce que c'est au juste ?	101
5.2	La réflexion totale de la lumière dans le cœur de la fibre optique	106
5.3	Lumière réfléchie et lumière atténuée.....	109
5.3.1	Réflexion de la lumière	110
5.3.2	L'atténuation de la lumière – L'affaiblissement.....	113
6	Le câble optique	123
6.1	La jarretière, un cas particulier fort répandu	125
6.1.1	La structure libre.....	125
6.1.2	La structure serrée	126
6.2	L'art de fabriquer un câble optique	131
6.2.1	Structure libre unitube ou monotube	136
6.2.2	Structure libre à jonc rainuré	138
6.2.3	Structure libre multitubes.....	139
6.2.4	La structure serrée en rubans	141
6.2.5	La structure serrée en micromodules	143
6.3	Quelques règles d'assemblage.....	147
6.3.1	Les microfissures.....	147
6.3.2	Les variations de températures et la surlongueur	148
6.4	Étanchéité de l'âme optique.....	150

6.5 La protection mécanique.....	151
6.5.1 Métallique ou diélectrique ?	151
6.5.2 La gaine extérieure	153
6.6 Les principales catégories de câbles	155
6.6.1 Les câbles terrestres souterrains.....	155
6.6.2 Les câbles aériens.....	165
6.6.3 Les câbles sous-marins	175
6.6.4 Quelques câbles spécifiques.....	182
6.7 Un câble vous parle	192
7 Conclusion.....	217

Liste des annexes

Annexe 1	Transmission de l'information par fibre optique	219
Annexe 2	Rappel du calcul d'une dérivée.....	227
Annexe 3	Unités de watt, dBm, dB et %	233
Annexe 4	Spécifications sommaires associées à la fibre optique	239
Annexe 5	Profil d'indice de réfraction dans la fibre optique	247
Annexe 6	Les effets non-linéaires dans la fibre optique	251
Annexe 7	Une nouvelle fibre optique : la fibre cristalline	265
Annexe 8	Références bibliographiques	271

1 Introduction

Qui n'a pas utilisé le mot fibre au moins une fois dans sa vie ?

« J'ai réparé la carrosserie de ma voiture avec de la fibre de verre »

« As-tu vu cette personne avec tout son monde ? Elle a vraiment la fibre familiale »

« Je mange des fibres le matin »

« La fibre du bois fait ressortir le naturel de ce meuble »

« Il y a la fibre végétale et la fibre animale »

Mais ce n'est pas tout le monde qui sait qu'aujourd'hui presque toutes les communications à très hauts débits et longues distances passent par la fibre optique.

Évidemment, il y a encore le cuivre qui est utilisé pour les communications à courtes distances. Par exemple, avec une paire de fils de cuivre téléphonique, on peut atteindre jusqu'à 5 Gbits/s (5 milliards de bits par seconde) à 30 m ou 2,5 Gbits/s à 100 m sans amplificateurs. Attention à l'âge du cuivre dans les anciennes résidences : ça ne passe pas très bien avec du vieux cuivre.

Il y a aussi le câble coaxial, plus gros et plus efficace que la paire de fils de cuivre, qui peut transmettre jusqu'à 10 Gbit/s sur une distance de 300 m entre les amplificateurs et plus loin encore en ajoutant jusqu'à 6 amplificateurs.

La problématique avec le cuivre que ce soit en paire de fils ou en câble coaxial, c'est que le débit décroît rapidement avec la distance. Alors, bienvenue les amplificateurs. Mais attention, la perfection n'existe pas ! L'amplificateur amplifie le signal, mais aussi le bruit qui vient avec le signal. Et comme le bruit est plus faible que le signal, le bruit est plus efficacement amplifié que le signal lui-même. Après un petit nombre d'amplis (pas plus de 4 à 6), le bruit dépasse le signal et ce dernier est perdu. On doit recommencer à zéro : on dit régénérer le signal.

Il y a les communications par satellite pour les régions éloignées. Il y a enfin les communications transmises dans l'air à partir d'une grosse antenne émettrice jusqu'à la petite antenne réceptrice par exemple sur le toit d'un motorisé ou « camping-car » (technologie appelée en anglais « Over The Air (OTA) »).

Mais là, dans les deux cas, l'environnement joue un rôle capricieux : vous allez perdre facilement le signal à cause des arbres, des gros nuages, de la neige et j'en passe... À moins de transmettre à très haute puissance, mais à quel prix pour l'abonné.

Avec la fibre optique, on peut transmettre des tonnes de Gbit/s sur des tonnes de kilomètres, par exemple, 80 km au minimum entre les amplis qui sont optiques et non plus électroniques. Et on peut mettre des tonnes de fibres optiques dans un câble.

Imaginez : 7 000 fibres optiques transmettant chacune 10 Gbit/s dans un câble de moins de 5 cm de diamètre. Imaginez maintenant le diamètre d'un câble de 7 000 paires de fils de cuivre. Et le poids, lui !

Et on déploie la fibre optique entre les continents et jusque dans les résidences. Téléphonie, vidéo/télévision et Internet sont ses passagers pour ce merveilleux voyage dont la durée n'est pas près de s'achever.

Il faudra bien qu'il y ait un peu de physique, mathématiques, chimie, mécanique, etc., pour étoffer tout ça.

Mais, rassurez-vous, ce sera simple le plus possible. Vous ne verrez pas que des mots, mais aussi des dessins et des images pour vous faciliter les choses. Et, espérons-le, vous aurez du plaisir dans votre lecture.

2 Avant-propos

Vous entendrez parler de fréquence et de longueur d'onde dans la suite du texte.

Pour ce qui est de la fréquence, le caractère « f » sera utilisé. Ainsi, dans le domaine des transmissions de signaux, la fréquence est régulièrement utilisée. L'unité de la fréquence est le Hz (le hertz, l'inverse du temps en seconde). Par exemple, à la Figure 1, une station de radio FM est syntonisée à la fréquence de 95,4 MHz.

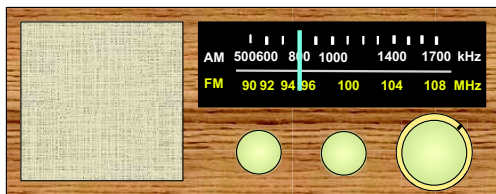


Figure 1 – Un ancien poste de radio AM/FM

L'unité Hz vient du nom du physicien allemand Heinrich Hertz, illustré à la Figure 2. En 1888, ce cher Heinrich a réussi à envoyer une onde électromagnétique à partir d'un transmetteur jusqu'à un récepteur [1]. Il a ainsi démontré expérimentalement la théorie de l'électromagnétisme développée et publiée 21 ans auparavant par James Clerk Maxwell [2], illustré aussi à la Figure 2.

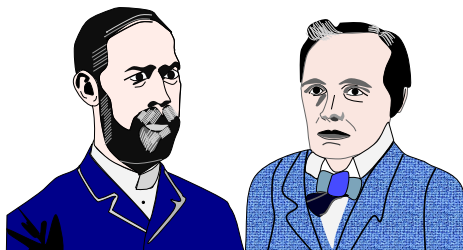


Figure 2 – Heinrich Hertz, à gauche et James Clerk Maxwell à droite

En ce qui concerne la longueur d'onde (la couleur si vous préférez), le caractère « λ » sera utilisé. Par exemple, dans le domaine des lasers, c'est la longueur d'onde qui est utilisée. L'unité utilisée dans le texte pour la longueur d'onde sera généralement le nm (nanomètre). 1 nm est égal à un milliardième de mètre ou 0,000 000 001 m. C'est tout petit. Pensez qu'un cheveu a un diamètre d'un peu plus de 50 000 nm (50 μm). Vous direz, par exemple : ce laser émet à 1 550 nm. La Figure 3 montre une onde, en rouge, d'amplitude quelconque se déplaçant dans le temps.

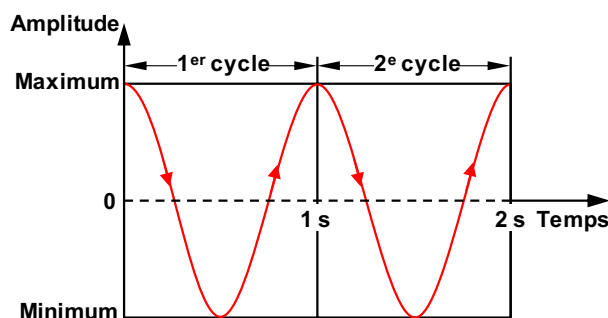


Figure 3 – Représentation d'une onde se déplaçant dans le temps

Cette onde suit les flèches rouges sur une période de 2 s et de cycle en cycle (ici, 2 cycles seulement sont représentés). C'est un peu comme les vagues à la surface de l'océan.

La période d'un cycle est définie à partir d'un maximum d'amplitude jusqu'au maximum suivant. Dans le cas de la Figure 3, la période est donc d'une seconde (1 s). Comme la fréquence, « f », est l'inverse du temps, la fréquence de l'onde de la Figure 3 est donc de 1 divisé par 1 s, soit 1 Hz.

Supposez maintenant que l'onde de la Figure 3 voyage dans le vide. Sa fréquence, « f », est reliée à sa longueur d'onde, « λ », par la vitesse de lumière dans le vide, « c », comme vous pouvez le voir à l'équation suivante :

$$\text{La longueur d'onde, } \lambda = \frac{c}{f} \text{ ou inversement la fréquence, } f = \frac{c}{\lambda} \quad (1)$$

Vous vous rappellerez que la vitesse de la lumière **c** dans le vide est une constante, c'est-à-dire une quantité qui ne varie pas et dont la valeur est égale à 299 792 458 m/s (mètres par seconde), arrondie souvent à 300 000 km/s (trop difficile de se rappeler les 9 chiffres !)

C'est très rapide comme vitesse.

Vous savez peut-être qu'Alpha du Centaure, illustrée à la Figure 4, est l'étoile la plus proche de nous.

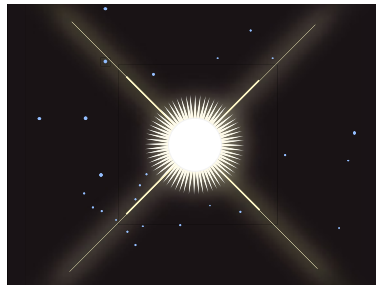


Figure 4 – Alpha du Centaure, l'étoile la plus proche de la terre

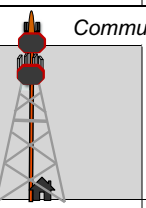
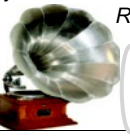
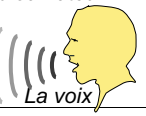
Mais Alpha du Centaure est quand même située à plus de quatre années-lumière de la Terre. Ça veut dire que sa lumière nous arrive après quatre ans.

Si Alpha du Centaure s'éteignait aujourd'hui, vous l'apprendriez seulement dans quatre ans : c'est long comme attente. Il peut se passer bien des choses en quatre ans.

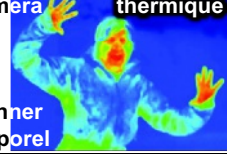
Revenez à l'onde de la Figure 3, plus haut. La longueur d'onde est donc définie de la façon suivante :

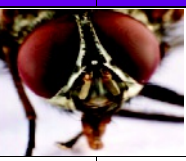
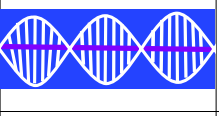
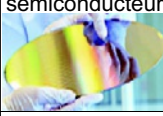
$$\text{Longueur d'onde } \lambda \text{ de la Figure 3} = \frac{299\,792\,458 \text{ m/s}}{1[\text{Hz}]} = 299\,792\,458 \text{ m} \quad (2)$$

Wow ! Ça, c'est un gros nombre avec neuf (9) chiffres, puisqu'évidemment la fréquence de l'onde est très petite (1 Hz). À titre d'information supplémentaire, vous pouvez voir ci-après l'ensemble des fréquences et des longueurs d'onde connues. Des applications typiques y sont aussi décrites.

Ondes	Ondes radioélectriques – Basses fréquences (BF)						
	Les + BF	Extrêmement BF	Super BF	Ultra BF	Très BF	BF	Moyennes BF
Applications		Communications minières 		Communications sous-marines Système de son 	Radioamateur 	Radiodiffusion / Radioamateur Radionavigation 	Communications maritimes et militaires 
	f 0 à 3 Hz λ Infini à 100 Mm	3 Hz à 30 Hz 10 Mm à 100 Mm	30 Hz à 300 Hz 1 Mm à 10 Mm	300 Hz à 3 kHz 100 km à 1 Mm	3 kHz à 30 kHz 10 km à 100 km	30 kHz à 300 kHz 1 km à 10 km	300 kHz à 3 MHz 100 m à 1 km

Ondes	Ondes radioélectriques – Hautes fréquences (HF)				
	HF	Très HF	Ultra HF	Super HF	Extrêmement HF
Applications	Communications maritimes et militaires Aéronautique 		Télévision Wi-Fi / Bluetooth GSM 4G LTE WiMax GPS 	Micro-onde Radar météo TV satellite Radars 5G 	Radar anticollision Vidéo à distance 
	f 3 MHz à 30 MHz λ 10 m à 100 m	30 MHz à 300 MHz 1 m à 10 m	300 MHz à 3 GHz 10 cm à 1 m	3 GHz à 30 GHz 1 cm à 10 cm	30 GHz à 300 GHz 1 mm à 1 cm

Ondes	Infrarouge			Visible
	C	B	A	
Applications	Caméra thermique Scanner corporel 		Fibre optique 780 nm à 1 650 nm 	
	f 300 GHz à 100 THz λ 1 mm à 3 000 nm	100 THz à 214 THz 1 400 nm à 3 000 nm	214 THz à 384 THz 780 nm à 1 400 nm	384 THz à 780 THz 380 nm à 780 nm

Ondes	Ultraviolet (UV)					
	UV A I	UV A II	UV B	UV C	UV V	UV X
Applications	Vision des insectes 		Modification d'ADN 	Désinfection 	Propagation dans le vide 	Lithographie semiconducteur 
	f 780 THz à 882 THz λ 340 nm à 380 nm	882 THz à 952 THz 315 nm à 340 nm	0,952 PHz à 1,1 PHz 280 nm à 315 nm	1,1 PHz à 1,5 PHz 200 nm à 280 nm	1,5 PHz à 3 PHz 100 nm à 200 nm	3 PHz à 30 PHz 10 nm à 100 nm

Ondes	Rayons	
	X (Rx)	Gamma (γ)
Applications	Radiographie médicale 	Médecine nucléaire 
	f 30 PHz à 3 EHz λ 0,1 nm à 10 nm	3 EHz à Infini 0 nm à 0,1 nm

Certains caractères spéciaux seront utilisés dans le texte et sont décrits au Tableau 1 ci-après.

Tableau 1 – Signification des caractères spéciaux utilisés dans le texte

Caractère	Signification
*	Multiplié par (le signe de multiplication)
÷ ou /	Divisé par (le signe de division)
>	(Plus grand que) ou (supérieur à)
<	(Plus petit que) ou (inférieur à)
≥	(Plus grand que ou égal à) ou (supérieur ou égal à)
≤	(Plus petit que ou égal à) ou (inférieur ou égal à)
~ ou ≅ ou ≈	Environ ou à peu près égal à ou approximativement égal à
±	Plus ou moins
[nm]	Les unités d'un paramètre (ici des nanomètres, nm)
[-]	Un paramètre sans unités
ou $x^{1/2}$	Racine carrée ou un nombre (ici x) à l'exposant un demi
10^N	10 à l'exposant N ($10^2 = 100$; $10^{-2} = 0,01$)
MD	Marque déposée (en anglais « Trademark »)

Notez que les équations dans le texte seront identifiées par un numéro inséré entre parenthèses et placé à la fin de l'équation.

De plus, les références bibliographiques, identifiées dans le texte par des numéros insérés entre crochets, pourront être consultées à la toute fin du livre.