

Pierre Lecoy

Communications sur fibres optiques

4^e édition



Direction éditoriale : Emmanuel Leclerc
Édition : Céline Poiteaux
Fabrication : Estelle Perez
Couverture : Isabelle Godenèche
Composition : Nord Compo, Villeneuve-d'Ascq
Image de couverture : © zentilia – Fotolia.com

© 2015, Lavoisier, Paris
ISBN : 978-2-7462-4660-7

Préface

Un peu avant le siècle des Lumières, Pascal pensait que « *l'Homme est au centre de toutes choses, entre l'infiniment grand et l'infiniment petit.* » Au siècle de la photonique, en le paraphrasant, les télécommunications sur fibres optiques se situent entre le presque infiniment petit et le presque infiniment grand.

Le presque infiniment petit se rencontre dans le domaine des tailles des fibres optiques telles que les nouvelles fibres optiques spéciales multicœurs. Dans une gaine de 125 μm seulement, certaines d'entre elles sont dotées de quelques dizaines de cœurs, véritable prouesse technologique. Certes, elles ne sont pas encore sorties des laboratoires pour être installées dans les réseaux, mais cela ne saurait tarder. Un autre domaine concerne la photonique sur silicium. Chaque industriel y va de son néologisme : puce photonique, opto chip, composant photonique intégré, etc. Cela concerne l'intégration des divers composants électro-optiques et/ou optoélectroniques et s'appuie sur l'expérience de l'électronique sur silicium. Un exemple parmi d'autres est la puce photonique permettant de connecter deux rubans de 12 fibres chacun à 24 diodes lasers VCSEL et, simultanément, deux autres rubans de 12 fibres chacun à 24 photodiodes, et cela sur 36 mm^2 seulement !

Le presque infiniment grand, pour sa part, se retrouve dans les réseaux optiques de nouvelle génération : les réseaux téra-bitaires. Et là, pour chaque exploitant de réseau, c'est une course effrénée. Déjà, les équipements permettant la transmission de 100 Gbit/s par longueur d'onde sont largement et couramment installés. Les premières liaisons interurbaines à 400 Gbit/s par longueur d'onde commencent à être présentes sur le terrain depuis mi-2013. Avec plusieurs dizaines de longueurs d'onde simultanées, cela représente quelques dizaines de téra-bits par seconde. Ensuite, lors de congrès internationaux et dans les instances de normalisation, la transmission d'un téra-bit par seconde – mille milliards d'informations binaires en une seule seconde – sur une seule longueur d'onde est à l'ordre du jour. Tout cela pour faire face aux flux d'informations exabitaires, concept de l'*exaflood*.

Au-delà de la technique, une question se pose : « *Tous ces débits, mais pour quoi faire ?* » Deux réponses coexistent. Une première réponse est politiquement correcte. L'amélioration des débits de transmission permet le déploiement des applications telles que e-formation, e-santé, e-administration, e-commerce, travail à domicile, etc. Ainsi, tout un chacun peut améliorer ses connaissances, son cadre de vie et autres. Une autre réponse nous est fournie, là encore par Pascal : « *Un roi sans divertissement est un homme plein de misères.* » Et les télécommunications sur fibres optiques vont apporter les divertissements à chacun à travers le quadruple service Internet-téléphonie fixe-téléphonie mobile-télévision, mais surtout à travers les nouveaux usages des images animées : vidéo blogs, vidéos partagées, télévision multi-écrans, télévision de rattrapage, vidéo à la demande, jeux en réseau, etc. Trois informations chiffrées

de début 2014 pour YouTube : plus d'un milliard d'utilisateurs uniques chaque mois, près de six milliards d'heures de vidéo regardées chaque mois et environ 100 heures de vidéo mises en ligne chaque minute.

Et tout cela sans oublier les deux révolutions en marche : les nouveaux formats de la télévision et l'internet des objets. Les nouveaux formats de télévision concernent la télévision ultra-haute définition (UHD 4k), beaucoup plus gourmande en bande passante malgré les efforts réalisés sur les taux de compression. Les prix des téléviseurs sont devenus attractifs, les premières expérimentations d'émissions en direct sur des événements sportifs internationaux ont eu lieu et les premiers contenus arrivent. Cela rend obligatoire le déploiement de la fibre optique pour l'habitation, application FTTH (*fiber to the home*). À noter que le débit de 100 Mbit/s apporté au domicile de l'internaute est, désormais, considéré comme un minimum. Plusieurs opérateurs commercialisent et installent les connexions pour les particuliers à 1 Gbit/s. Quant à l'internet des objets, il pourrait à terme concerner plusieurs milliards d'objets. Même si les informations transmises sont faibles, c'est leur nombre qui va créer demain des débits cumulés d'une ampleur inimaginable hier. En quelque sorte, cet internet des objets va transformer l'application FTTH en application FITH (*fiber in the home*.)

Ainsi, les évolutions constantes dans le domaine des communications sur fibres optiques amènent l'auteur, Pierre Lecoy, à revoir et augmenter son ouvrage, d'où cette 4^e édition dans laquelle vous pourrez puiser largement pour mettre à jour vos savoirs.

Bonne et enrichissante lecture...

Jean-Michel Mur

Président honoraire du Club optique

Table des matières

Préface	V
Introduction	1
1. Historique	1
2. Avantages des fibres optiques	2
3. Domaines d'utilisation	3
4. Éléments d'un système de communications par fibre optique	4
5. Réseaux sur fibres optiques	5
6. Liaisons infrarouges sans fibre	6

Chapitre 1 Fibres optiques multimodes

1. Bases d'optique	9
1.1. Introduction.....	9
1.2. Propagation des ondes planes harmoniques.....	9
1.3. Rayons lumineux.....	11
1.4. Dioptré diélectrique.....	12
1.5. Réflexion d'une onde plane sur un dioptré	13
1.6. Réflexion totale.....	15
2. Guide d'ondes diélectrique	16
2.1. Modèle du guide d'ondes diélectrique plan.....	16

2.2. Notion de modes de propagation.....	17
2.3. Cas du guide dissymétrique.....	18
2.4. Notion de dispersion	19
3. Fibres optiques multimodes	20
<hr/>	
3.1. Définition	20
3.2. Fibres optiques multimodes à saut d'indice	21
3.3. Fibres optiques multimodes à gradient d'indice.....	22
4. Propagation dans les fibres optiques multimodes	23
<hr/>	
4.1. Trajectoire des rayons.....	23
4.2. Résolution de l'équation de propagation.....	24
4.3. Différents types de rayons.....	25
4.4. Modes de propagation.....	26
5. Dispersion dans les fibres optiques multimodes	27
<hr/>	
5.1. Dispersion intermodale.....	27
5.2. Calcul de l'élargissement d'impulsion.....	27
5.3. Dispersion chromatique	29
5.4. Réponse impulsionnelle des fibres multimodes.....	30
5.5. Bande passante des fibres multimodes.....	31
5.6. Couplage de modes	32
Chapitre 2	
Fibres optiques monomodes	
6. Calcul des champs dans une fibre optique	35
<hr/>	
6.1. Équations électromagnétiques	35

6.2. Solution pour une fibre optique à saut d'indice	36
6.3. Méthode de calcul des modes	37
6.4. Nature des modes	38
6.5. Fréquences de coupure	39
6.6. Allure des modes	40
7. Caractéristiques des fibres monomodes	42
7.1. Condition de propagation monomode	42
7.2. Modèle gaussien de la fibre monomode	43
7.3. Paramètres des fibres monomodes.....	44
8. Dispersion chromatique dans les fibres monomodes	45
8.1. Calcul de la dispersion chromatique.....	45
8.2. Annulation de la dispersion chromatique	46
8.3. Fibres à gaine interne déprimée	47
8.4. Différents types de fibres monomodes.....	48
8.5. Compensation de la dispersion chromatique.....	49
9. Effets de polarisation dans les fibres monomodes	50
9.1. Biréfringence des fibres optiques.....	50
9.2. Biréfringence induite.....	51
9.3. Dispersion de polarisation	52
10. Effets non linéaires dans les fibres optiques	53
10.1. Introduction.....	53
10.2. Diffusion Raman.....	53
10.3. Diffusion Brillouin	55
10.4. Effet Kerr.....	56
10.5. Propagation de solitons	57

11. Fibres optiques microstructurées, dites « photoniques »	58
11.1. Introduction.....	58
11.2. Bande interdite photonique	60
11.3. Guides d'ondes photoniques	61
11.4. Fibres à cristal photonique.....	62
11.5. Fibres creuses.....	63

Chapitre 3

Technologie et mise en œuvre des fibres optiques

1. Matériaux et atténuation des fibres optiques	65
1.1. Différents types de fibres optiques	65
1.2. Atténuation intrinsèque des fibres optiques.....	66
1.3. Fibres plastiques.....	68
1.4. Autres matériaux.....	69
1.5. Fenêtres de transmission.....	69
2. Fabrication des fibres optiques	71
2.1. Principes	71
2.2. Fabrication des préformes pour fibres de silice	72
2.3. Fibrage (<i>drawing</i>)	73
2.4. Résistance mécanique	74
3. Câbles à fibres optiques et raccordements	74
3.1. Principe des câbles à fibres optiques.....	74
3.2. Différents types de câbles.....	75
3.3. Câbles aériens et sous-marins.....	77
3.4. Raccordement des fibres optiques.....	78

3.5. Connecteurs optiques	79
4. Pertes extrinsèques des fibres optiques	81
4.1. Pertes par courbures.....	81
4.2. Pertes aux raccordements.....	82
4.3. Optimisation des fibres optiques.....	84
5. Mesures sur les fibres optiques	85
5.1. Classification.....	85
5.2. Mesure d'atténuation spectrale.....	86
5.3. Mesure de réflectométrie.....	87
5.4. Interprétation de la courbe de réflectométrie.....	88
5.5. Mesures de dispersion.....	90

Chapitre 4

Optique intégrée

1. Principes	91
1.1. Introduction : classification des composants.....	91
1.2. Technologies utilisées	92
1.3. Guides plans en optique intégrée.....	92
1.4. Guidage latéral	93
1.5. Pertes dans les guides.....	94
2. Le couplage de modes et ses applications	95
2.1. Formalisation	95
2.2. Couplage à l'intérieur d'un même guide.....	96
2.3. Couplage entre guides.....	97

3. Réseaux de diffraction	99
3.1. Principe	99
3.2. Fonctionnement.....	99
3.3. Application au couplage de la lumière dans un guide.....	100
3.4. Réseaux de Bragg	102
3.5. Réseaux de Bragg photo-inscrits dans les fibres optiques	103

Chapitre 5

Composants optiques

1. Composants optiques passifs non sélectifs	105
1.1. Définitions	105
1.2. Coupleurs optiques.....	106
1.3. Isolateurs et circulateurs.....	107
1.4. Atténuateurs optiques	108
2. Multiplexeurs en longueur d'onde	109
2.1. Différents types de multiplexage en longueur d'onde	109
2.2. Multiplexeurs à filtres	109
2.3. Multiplexeurs à coupleurs.....	110
2.4. Multiplexage dense en longueur d'onde.....	111
2.5. Multiplexage d'insertion-extraction.....	112
3. Composants optiques actifs	114
3.1. Principes	114
3.2. Effet électro-optique.....	114
3.3. Coupleur électro-optique directif	115
3.4. Modulateur de Mach-Zehnder.....	116

3.5. Modulateur à électro-absorption.....	118
4. Commutateurs optiques	119
4.1. Fonctions	119
4.2. Technologies de commutateurs.....	120
4.3. Exemple de matrices de commutation micromécaniques.....	120
4.4. Multiplexeurs d'insertion-extraction reconfigurables (ROADM).....	122

Chapitre 6

Émetteurs optoélectroniques

1. Principes des composants optoélectroniques	125
1.1. Principe de l'électroluminescence	125
1.2. Matériaux électroluminescents	127
1.3. Principe de la photodétection	128
1.4. Utilisation d'hétérojonctions	130
1.5. Structures à puits quantiques	131
1.6. Principes de l'amplification optique.....	133
2. Diodes électroluminescentes (DEL)	134
2.1. Structure	134
2.2. Principales caractéristiques des diodes électroluminescentes	135
2.3. Émetteurs à diodes électroluminescentes	136
2.4. Autres types de diodes électroluminescentes.....	136
3. Diodes laser	137
3.1. Principe	137
3.2. Diodes laser à structure Fabry Pérot	138
3.3. Diodes laser DFB.....	139

3.4. Diodes laser à cavité verticale (VCSEL).....	140
3.5. Diodes laser accordables en longueur d'onde	142
4. Interface optique d'émission	143
4.1. Description.....	143
4.2. Modulation interne des diodes laser	144
4.3. Modulation externe des diodes laser.....	145
4.4. Bruit des émetteurs.....	146
4.5. Module d'émission à diode laser.....	147
5. Comparaison des émetteurs optoélectroniques	148

Chapitre 7

Récepteurs optoélectroniques

1. Photodétecteurs	151
1.1. Photodiode PIN.....	151
1.2. Caractéristiques de la photodiode.....	152
1.3. Photodiode à avalanche	153
1.4. Matériaux utilisés en photodétection.....	154
1.5. Phototransistor	156
2. Interface optique de réception	157
2.1. Structure	157
2.2. Bruit des photodiodes.....	158
2.3. Modélisation du récepteur optique.....	159
2.4. Calcul du courant de bruit.....	160
2.5. Calcul du rapport signal à bruit.....	160
2.6. Optimisation du rapport signal à bruit	161

3. Autres schémas de photodétection	162
3.1. Détection hétérodyne	162
3.2. Détection équilibrée	164

Chapitre 8

Amplification optique

1. Amplification optique dans les verres dopés	167
1.1. Introduction.....	167
1.2. Principe de l'amplification optique dans les verres dopés à l'erbium	168
1.3. Gain de l'amplification optique	169
1.4. Puissance du signal amplifié.....	170
1.5. Bruit de l'amplification optique	171
2. Amplificateurs à fibres dopées erbium	172
2.1. Description.....	172
2.2. Caractéristiques	173
2.3. Paramètres de gain d'un amplificateur optique.....	174
2.4. Facteur de bruit.....	175
3. Calcul du bruit sur les liaisons amplifiées	176
3.1. Bruit en réception en présence d'un amplificateur optique	176
3.2. Cas d'un récepteur à préamplificateur optique	176
3.3. Calcul du bruit sur les liaisons longues.....	177
4. Autres types d'amplificateurs optiques	178
4.1. Amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SCOA)	178
4.2. Autres applications des SCOA.....	179

4.3. Comparaison des amplificateurs optiques	180
4.4. Amplification Raman.....	181

Chapitre 9

Systèmes de transmission sur fibres optiques

1. Structure d'une liaison numérique sur fibres optiques	183
<hr/>	
1.1. Différents systèmes	183
1.2. Liaisons longue distance sur fibres optiques.....	184
1.3. Terminaux de ligne	185
1.4. Codes en ligne	186
1.5. Transmissions optiques cohérentes	187
2. Conception des liaisons numériques	189
<hr/>	
2.1. Filtrage.....	189
2.2. Choix de la bande passante de la fibre	189
2.3. Calcul de la probabilité d'erreur	190
2.4. Calcul de la puissance moyenne nécessaire en réception	191
2.5. Limite quantique.....	193
2.6. Bilan de liaison.....	193
3. Systèmes de transmission numériques	195
<hr/>	
3.1. Liaisons point à point sans répéteurs.....	195
3.2. Liaisons à amplification optique.....	196
3.3. Liaisons multiplexées en longueur d'onde	197
3.4. Effet des dispersions.....	198
4. Nouveaux systèmes à très haut débit	200
<hr/>	
4.1. Modulations duobinaires.....	200

4.2. Modulations de phase différentielle.....	201
4.3. Modulations de phase à 4 états.....	202
4.4. Systèmes DP-QPSK à 100 Gbit/s.....	203
4.5. Systèmes au-delà de 100 Gbit/s.....	204
5. Systèmes de transmission de type analogique.....	206
<hr/>	
5.1. Transmissions analogiques classiques.....	206
5.2. Déport micro-ondes sur fibres optiques.....	207
6. Annexe.....	209
<hr/>	
6.1. Principe du démodulateur QPSK.....	209

Chapitre 10

Réseaux sur fibres optiques

1. Réseaux locaux.....	211
<hr/>	
1.1. Introduction.....	211
1.2. Réseaux optiques passifs.....	212
1.3. Conception d'un réseau passif.....	212
1.4. Réseaux Ethernet sur fibres optiques.....	214
1.5. <i>Fiber channel</i>	216
2. Réseaux d'accès (FTTH).....	218
<hr/>	
2.1. Historique.....	218
2.2. Différentes architectures FTTx.....	219
2.3. Réseaux optiques passifs (PON).....	220
2.4. Fonctionnement d'un PON.....	222
2.5. Évolution.....	223

3. Réseaux longue distance	224
3.1. Systèmes de la hiérarchie SDH/SONET	224
3.2. Constitution des trames de la hiérarchie numérique synchrone	225
3.3. Anneaux SDH	226
3.4. Brassage optique	227
3.5. Réseau de transport optique (OTN)	228
3.6. Couche optique de l'OTN	229
3.7. Liaisons et réseaux sous-marins par fibres optiques	231
4. Vers les réseaux tout optiques	232
4.1. Réseaux multiplexés en longueur d'onde	232
4.2. Routage en longueur d'onde	232
4.3. Réseaux optiques sur puce (ONoC, <i>optical networks on chips</i>)	234
4.4. Architectures de réseaux tout optiques	236
4.5. Protocoles MPLS	236

Chapitre 11

Capteurs et instrumentation à fibres optiques

1. Les fibres optiques en instrumentation	239
1.1. Introduction	239
1.2. Transmission de signaux de mesure	240
1.3. Instrumentation de mesure optique à fibres	241
1.4. Classification des capteurs à fibres optiques	242
2. Capteurs non cohérents à fibres optiques	242
2.1. Capteurs de grandeurs géométriques et mécaniques	242
2.2. Capteurs par courbures ou microcourbures	244

2.3. Capteurs extrinsèques de température.....	244
2.4. Capteurs intrinsèques et répartis.....	245
3. Capteurs cohérents	246
<hr/>	
3.1. Capteurs interférométriques	247
3.2. Capteurs à réseaux de Bragg	249
3.3. Interféromètres en anneau	250
3.4. Capteurs polarimétriques.....	251
4. Réseaux de capteurs a fibres optiques	252
<hr/>	
4.1. Capteurs répartis	252
4.2. 4.2.Multiplexage temporel.....	252
4.3. 4.3.Multiplexage en longueur d'onde	253
Lexique.....	255
Bibliographie.....	263
Index.....	267

Introduction

1. Historique

Si les premières expériences de transmission optique d'informations datent de la fin du XIX^e siècle, il a fallu attendre de savoir diriger ou guider correctement la lumière pour envisager son application aux télécommunications. L'apparition des lasers, vers 1960, a donné lieu à des expériences de transmission à travers l'atmosphère. Mais les instabilités de propagation (dus en particulier aux variations d'indice de l'air) ont fait réserver cette solution aux communications à courtes distances (télécommande infrarouge, réseaux *indoor*, liaisons optiques en espace libre entre bâtiments).

De leur côté, les fibres optiques, minces cheveux de verre très transparents qui utilisent le principe, connu depuis fort longtemps, des fontaines lumineuses, faisaient l'objet d'applications décoratives, puis plus utilitaires (éclairage, endoscopie, mesures optiques déportées). Leur application au domaine des télécommunications, proposée par les théoriciens (notamment Charles Kao en 1966, qui a obtenu pour cela le prix Nobel de Physique en 2009), a été rendue possible dans les années 1970 grâce aux progrès dans la technologie de fabrication des fibres optiques, permettant une très faible atténuation et une résistance mécanique suffisante. Il est également dû à la maîtrise des diodes laser à semi-conducteurs, qui allient les performances des lasers à la facilité d'emploi des composants électroniques, notamment grâce aux progrès des semi-conducteurs composés III-V. La mise au point de câbles, connecteurs, composants passifs et procédés de raccordements performants, ont également été indispensables pour le développement massif des liaisons commerciales, à partir des années 1980.

Les années 1990 ont été marquées par la maîtrise de l'amplification optique puis du multiplexage en longueur d'onde qui ont permis une explosion des capacités répondant aux besoins de la croissance d'internet. La révolution suivante devrait être celle des réseaux tout optiques, inaugurée par l'apparition des premiers prototypes de commutateurs optiques vers l'an 2000 ; ce concept reste cependant à préciser au niveau des architectures et des protocoles. Dans les années 2010, de nouvelles techniques venues de la radio (modulations cohérentes, OFDM, CDMA...) se déploient

en optique, rendant opérationnel le débit de 100 Gbit/s par longueur d'onde, et atteignant 400 Gbit/s en laboratoire.

Avec environ 200 millions de kilomètres fabriqués par an (majoritairement consommés en Asie), et plus de 2 milliards de kilomètres installés depuis ses débuts, les fibres optiques sont désormais une technologie à maturité, qui diffuse dans de vastes domaines d'application, malgré les fluctuations conjoncturelles de l'activité industrielle.

2. Avantages des fibres optiques

Ils sont nombreux, l'avantage décisif n'étant pas toujours le même suivant l'utilisation envisagée.

- *Performances de transmission* : très faible atténuation, très grande bande passante, multiplexage possible (en longueur d'onde) de nombreux signaux et de nombreux utilisateurs, permettant des systèmes de portée (plus de 100 km entre l'émetteur et le récepteur) et de débit (plus de 10 Tbit/s sur une même fibre) très supérieures à celles des câbles conducteurs (en revanche, le délai de transmission, lié à la vitesse des ondes, n'est pas significativement différent).
- *Avantages de mise en œuvre* : faible poids, très petite taille, grande souplesse permettant des courbures plus fortes que le cuivre, facilitant l'installation et réduisant fortement la longueur des câbles aussi bien en télécommunications et en réseaux que pour le câblage des véhicules (aéronautique, ferroviaire, automobile), des installations médicales, industrielles, domotique, raccordements d'abonnés, etc. Parallèlement la mise en œuvre, notamment le raccordement, des fibres optiques, est devenue beaucoup plus facile et moins coûteuse que dans les premières applications, bien que cette image reste attachée à tort à la fibre. De plus, ses faibles pertes contribuent à de sensibles économies d'énergie dans les technologies de l'information.
- *Sécurité électrique* (isolation totale entre terminaux, utilisation possible en ambiance industrielle explosive, sous fortes tensions, en applications médicales) et *électromagnétique* (la fibre n'est pas sensible aux parasites et n'en crée pas elle-même), ce qui facilite le déploiement puisque la fibre peut être disposée sans problème à proximité de câbles et de machines électriques. Inversement, les puissances optiques utilisées sont faibles et non dangereuses, sauf à la sortie des amplificateurs optiques mais ceux-ci sont équipés de connecteurs assurant la sécurité laser. On peut y ajouter une inviolabilité (presque) totale : il est pratiquement impossible d'écouter le signal sur une fibre optique sans être repérable ; les recherches sur la cryptographie quantique ont pour but de renforcer encore cette sécurité.
- *Avantage économique* : le coût du support fibre est bien moins cher que le cuivre, mais le coût global d'un système sur fibres optiques (prenant en compte les interfaces, les raccordements ainsi que l'installation et les équipements annexes néces-

saies) est lui aussi souvent inférieur à celui d'un système sur cuivre. De plus, la fibre optique apporte une contribution significative à la réduction de la consommation d'énergie. Même sur les derniers mètres où la paire torsadée (et, le plus souvent, le sans-fil) sont encore largement concurrentiels, l'augmentation continue des débits incite à utiliser l'optique sur des distances de plus en plus courtes.

3. Domaines d'utilisation

Le principal est bien entendu celui des télécommunications, mais les fibres optiques débordent largement ce secteur et connaissent un grand nombre d'applications industrielles.

– *Télécommunications* : les grands domaines d'utilisation ont d'abord été les liaisons urbaines, de capacités considérables et fonctionnant sans amplification intermédiaire ni téléalimentation, et les liaisons sous-marines transocéaniques, puis les liaisons côtières sans répéteurs (ces dernières atteignant 350 km avec l'amplification optique dans les terminaux). Puis les liaisons terrestres régionales, nationales et internationales ont connu un très fort développement, stimulé par l'arrivée de nouveaux opérateurs. Ce marché a un caractère fortement cyclique, mais est en forte croissance depuis 2008, principalement dans les pays émergents et sur les liaisons internationales. Le raccordement des stations de base des réseaux de mobiles est aussi devenu un marché important avec le déploiement de la 3G, puis de la 4G.

– *Réseaux d'accès* : dès les années 1980, de nombreuses expériences ont été menées dans le domaine de l'accès des abonnés par fibres optiques aux vidéocommunications et aux services large bande. Mais ces réseaux ont longtemps stagné à cause de leurs coûts et de la concurrence de l'ADSL, et il a plutôt été développé des solutions intermédiaires où la fibre était relayée, dans la partie terminale, par des câbles existants. Cependant, le besoin de débits d'accès de plus en plus élevés a relancé ce marché depuis le début des années 2000, ce mouvement qui a débuté au Japon représente maintenant une part importante de l'activité des industriels, des opérateurs et des autorités de régulation. Les réseaux FTTx, *Fiber To The x* avec notamment $x = H$ (*home*) et $x = B$ (*building*), dépassent 80 millions d'abonnés en 2013, dont les deux tiers en Asie.

– *Liaisons et réseaux de données* : même sur de courtes distances (réseaux locaux, *data centers*), l'utilisation de fibres optiques en informatique s'est rapidement développée, en particulier pour bénéficier de l'isolement électrique et de l'insensibilité aux perturbations électromagnétiques. Les fibres optiques permettent aussi de constituer des réseaux multiterminaux et les réseaux à hauts débits, tels que Fiber Channel ou Ethernet à 1 puis 10 Gbit/s, ont été conçus dès le départ pour l'utilisation de la fibre optique. Ces réseaux atteignent maintenant des dimensions « métropolitaines » et cohabitent sans difficultés techniques avec les réseaux ferroviaires

ou de transport d'électricité. En 2009, l'IEEE a normalisé le 100 Gbit/s qui fait appel à de nouvelles techniques de modulation et de multiplexage.

– *Liaisons industrielles et embarquées* : ce sont des applications variées (télémesures, télécommandes, surveillance vidéo, bus de terrain automobiles et aéronautique de type CAN ou Flexray) où l'insensibilité de la fibre aux parasites est un avantage essentiel.

– *Interconnexions optiques* : la parallélisation massive des architectures électroniques et informatiques, l'augmentation constante des fréquences sur les bus, et les problèmes de compatibilité électromagnétique qui en résultent, incitent à utiliser de plus en plus les supports optiques (fibres ou guide plans) pour interconnecter les différentes cartes d'un système informatique ou d'un équipement embarqué (« fond de panier optique »), puis les différentes puces d'une architecture multiprocesseur, et même dans l'avenir les différents blocs d'une même puce multiprocesseurs (concept ONoC, *optical network on chip*).

– *Capteurs et instrumentation* : les fibres sont de plus en plus présentes dans l'instrumentation optique, où elles permettent d'effectuer des mesures à distance en des points difficiles d'accès. Les capteurs à fibres optiques utilisent la fibre elle-même (ou des dispositifs qui y sont intégrés) comme élément sensible servant en même temps de support de transmission. Leur emploi s'impose en cas de nécessité d'une intégration dans des matériaux et des structures (génie civil, aéronautique), ou d'une haute sécurité et de l'immunité électromagnétique (médecine, industrie). Le chapitre 11 présente ces applications.

– *Transport de lumière* : les applications classiques (éclairage, visualisation, endoscopie) ou plus récentes (transport de faisceaux laser pour l'industrie, la mesure, la médecine, et même la fourniture d'énergie) ont vu leurs performances s'améliorer, et leur coût baisser, grâce au développement des technologies des fibres optiques.

4. Éléments d'un système de communications par fibre optique

Dans une liaison point à point, en plus de la fibre étudiée théoriquement dans les chapitres 1 (fibres multimodes) et 2 (fibre monomode), et dans le chapitre 3 pour les aspects technologiques, on trouve (figure 0.1) :

– l'interface optique d'émission (parfois appelé TOSA, *transmitter optical sub assembly*) qui a pour rôle de transformer le signal électrique en signal optique. Il contient principalement le composant optoélectronique d'émission, qui peut être une diode électroluminescente (DEL) ou une diode laser (DL), composants étudiés dans le chapitre 6. L'interface contient également des circuits d'adaptation et de protection ; il est relié au câble optique soit par une embase de connecteur, soit

par une fibre amorce qu'il faut raccorder. La modulation est classiquement une modulation d'intensité lumineuse obtenue par la modulation du courant qui traverse la diode d'émission, remplacée, à très haut débit (40 puis 100 Gbit/s et plus), par une modulation externe en phase optique et/ou amplitude (modulation cohérente) ;

- l'interface optique de réception (ROSA, *receiver optical sub assembly*) qui contient une photodiode qui convertit le signal optique reçu en signal électrique, suivie d'un préamplificateur, dont la réalisation doit être soignée car c'est en général le bruit de celui-ci qui limite la puissance optique minimale détectable, et donc la portée du système (voir chapitre 7). On trouve ensuite des circuits d'amplification, de filtrage et éventuellement de remise à niveau logique. Ces deux interfaces sont en général appairées dans un module appelé *transceiver* ;
- des répéteurs : lorsque la longueur de la liaison le nécessite, on insère un ou plusieurs répéteurs. Les répéteurs-régénérateurs des premières liaisons (posées avant 1995) contenaient des interfaces de réception et d'émission, reliés par des circuits électroniques d'amplification et de régénération, d'où une discontinuité dans le signal et un obstacle à la croissance des débits. Les liaisons actuelles, terrestres et sous-marines, utilisent des amplificateurs optiques à fibres dopées Erbium (EDFA, *erbium doped fiber amplifiers*, voir chapitre 8), et sont entièrement optiques sur des distances qui peuvent dépasser 12 000 km (toutefois, ces amplificateurs ne régénèrent toujours pas le signal).

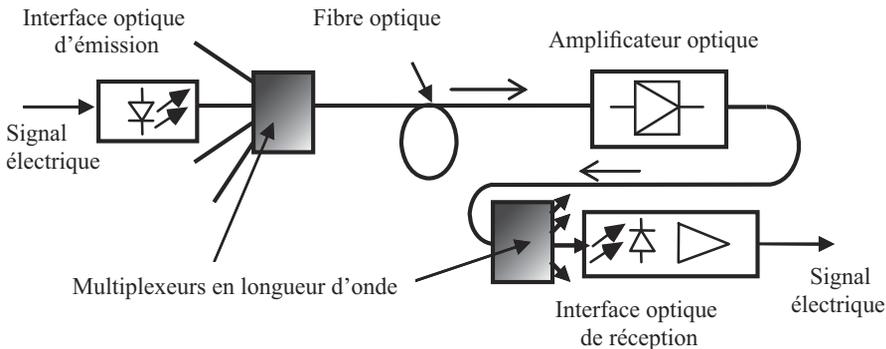


Figure 0.1.
Liaison point à point sur fibre optique.

5. Réseaux sur fibres optiques

On sait réaliser des réseaux tout optiques qui ne sont pas de simples assemblages de liaisons point à point reliées par des nœuds électriques. Les nœuds optiques des réseaux peuvent être des composants passifs (coupleurs, répartiteurs à grands nombre

de branches, multiplexeurs en longueur d'onde) ou actifs (commutateurs, multiplexeurs temporels) qui font appel à l'optique intégrée (voir chapitre 4) ou aux microtechnologies (MEMS). Le développement de la commutation optique à grande échelle est un des principaux enjeux actuels ; en effet, la rapidité des transmissions optiques est telle que le goulot d'étranglement se situe désormais dans l'électronique des nœuds des réseaux. Mais il faut aussi développer des architectures et des protocoles spécifiques au routage optique. Ces composants sont étudiés dans le chapitre 5.

La technique du multiplexage en longueur d'onde permet de multiplexer plusieurs signaux sur la même fibre optique, même s'ils sont d'origines géographiquement différentes ou de sens opposés. Si les longueurs d'onde sont proches, elles peuvent être amplifiées par le même amplificateur optique. On a commencé par l'utiliser dans les réseaux locaux ou les raccordements d'abonnés, ainsi que dans les réseaux de capteurs. Elle permet d'augmenter dans des proportions considérables la capacité des câbles optiques, même déjà installés. On atteint des centaines, et même des milliers, de Gbit/s par fibre dans les liaisons commerciales. Franchi en laboratoire vers l'an 2000, le Tbit/s (10^{12} bit/s) correspond maintenant aux besoins des infrastructures longues distances ; les derniers records en laboratoire ont dépassé 64 Tbit/s et la limite théorique n'est pas encore atteinte.

La grande majorité des applications (télécommunications, informatique) consiste en transmissions numériques, dont les débits vont de quelques Mbit/s à maintenant 100 Gbit/s. Il subsiste cependant quelques applications analogiques dans les domaines de la vidéo ou des téléméasures. Il existe des cas plus particuliers, comme le déport hyperfréquences sur fibre optique de porteuses jusqu'à 30 GHz, voire plus, modulant une diode laser. On commence à utiliser cette technique (déjà employée pour faire des antennes actives, notamment pour les radars) dans les stations de télécommunications par satellites, pour le déport de signaux micro-ondes dans les futurs réseaux d'accès combinant la fibre et la radio ou pour le câblage des réseaux de type WiFi. Ces différentes techniques de transmissions sont étudiées dans le chapitre 9.

6. Liaisons infrarouges sans fibre

Dans le domaine des communications optiques, on doit également mentionner le développement de l'emploi des ondes infrarouges pour les communications en visibilité directe à très courte distance : télécommande, accessoires Hi-Fi, robotique mobile, qui sont les applications traditionnelles, mais aussi les réseaux locaux sans fils. Tout en bénéficiant des avantages pratiques du « sans fil », les infrarouges peuvent transporter de hauts débits et résolvent certains problèmes de perturbations et de confidentialité posés par les liaisons radio. Ils conviennent bien à la propagation *indoor* (à l'intérieur d'un local, ne devant pas en sortir). Divers protocoles ont été définis, le plus classique étant IrDA permettant d'interfacer des PC et divers

périphériques jusqu'à 4 Mbit/s. Ils ont cependant été supplantés par les réseaux radio sans fil de type Bluetooth, qui n'ont pas les mêmes contraintes d'alignement. L'utilisation de la lumière d'éclairage à LED, modulées par les signaux à distribuer, a récemment été démontrée et pourrait donner lieu à une nouvelle génération de bornes d'accès.

Ensuite se sont développées des liaisons directes entre bâtiments avec des faisceaux laser à $0,8 \mu\text{m}$, utilisés à la manière de faisceaux hertziens point à point. Ces systèmes appelés FSO (*free space optics*) évitent ainsi le coût et les lourds travaux d'un câblage. Ces faisceaux sont très directifs grâce à un système de lentilles, et fonctionnent avec de faibles puissances (quelques mW), mais peuvent être coupés par un fort brouillard. Des débits très élevés (jusqu'à 10 Gbit/s) peuvent être transportés sur quelques kilomètres en l'absence d'obstacles, sans problèmes d'interférences et sans besoin de licence, contrairement à la radio. Ces systèmes sont déjà utilisés pour relier les différents bâtiments d'une entreprise ou d'un campus, même par-dessus une voie publique, et permettront de déployer rapidement l'infrastructure de réseaux urbains ou d'accès aux stations de base de réseaux mobiles.

Il existe également des projets de liaisons par faisceaux laser entre satellites, dans le vide spatial sur des milliers de kilomètres, qui exigent évidemment une très haute précision dans l'orientation des émetteurs.

Cette nouvelle édition actualise et enrichit les précédentes en intégrant les derniers développements, notamment des systèmes à très hauts débits ou des réseaux FTTx.

Après un exposé de la théorie de la propagation sur les fibres optiques multimodes et monomodes, complété par une présentation de la technologie et de la mise en œuvre des fibres optiques, l'ouvrage décrit de façon synthétique les différents composants optiques (passifs et actifs) et optoélectroniques (émetteurs et récepteurs, amplificateurs optiques) et explique le fonctionnement et les méthodes de conception des systèmes de transmission et réseaux optiques. Enfin, le dernier chapitre concerne les capteurs à fibres qui ont maintenant atteint la maturité.

Ce livre qui décrit de façon complète et synthétique les composants et systèmes des télécommunications et des réseaux sur fibres optiques, s'adresse aussi bien aux étudiants qu'aux ingénieurs, techniciens et chercheurs du domaine.

Pierre Lecoy est ingénieur de l'École centrale de Paris (ECP) et Docteur de l'Université Paris 6. Il est professeur à l'ECP, responsable de la filière « Métiers de la recherche » et enseignant-chercheur à l'ENSEA, laboratoire ETIS (UMR CNRS). Il a mené des travaux de recherches sur les systèmes et applications des fibres optiques.

