

Version en ligne
OFFERTE !
pendant 1 an

+ QUIZ 

Les fibres optiques

Notions fondamentales

(Câbles, Connectique, Composants, Protocoles, Réseaux...)

3^e édition

 Informatique technique

En téléchargement

 une webographie




Collection **epsilon**

Jean-Michel MUR



Les éléments à télécharger sont disponibles à l'adresse suivante :
<http://www.editions-eni.fr>
Saisissez la référence de l'ouvrage **EP3FIB** dans la zone de recherche et validez. Cliquez sur le titre du livre puis sur le bouton de téléchargement.

Avant-propos

Chapitre 1 Généralités sur les fibres optiques

1. Définition	19
2. Préjugés et vérités	20
3. Définition d'une liaison optique	22
4. Avantages des fibres optiques	24
4.1 Largeur de bande passante et débit	24
4.2 Affaiblissement linéique	24
4.3 Immunité électromagnétique	25
4.4 Taille et poids	25
4.5 Furtivité et secret des transmissions	26
4.6 Sécurité	28
5. Principe de fonctionnement des fibres optiques	28
5.1 Caractéristiques de la lumière	29
5.1.1 Célérité de la lumière et indice absolu d'un milieu	29
5.1.2 Longueur d'onde et spectre électromagnétique	29
5.2 Lois de l'optique géométrique	30
5.2.1 Première loi de Descartes ou loi de la réflexion	31
5.2.2 Deuxième loi de Descartes ou loi de la réfraction	31
5.2.3 Réfringence et angle critique	32
5.3 Application à la fibre optique	34
5.3.1 Constitution d'une fibre optique	34
5.3.2 Principe de fonctionnement d'une fibre optique	35

2 _____ Les fibres optiques

Notions fondamentales

5.3.3 Ouverture numérique	36
6. Merci, monsieur Kao	37

Chapitre 2

Types de fibres optiques et fabrication

1. Différents types de fibres optiques	39
1.1 Fibres optiques multimodales	40
1.1.1 Fibres optiques multimodales à saut d'indice	40
1.1.2 Fibres optiques multimodales à gradient d'indice	41
1.2 Fibres optiques unimodales	42
1.3 Autres types de fibres optiques	43
1.3.1 Fibres optiques spécifiques	43
1.3.2 Fibres optiques en plastique	43
2. Longueurs d'onde opératoires	44
2.1 Gamme des longueurs d'onde opératoires	44
2.2 Élargissement des plages de longueurs d'onde pour les fibres unimodales	46
3. Principales caractéristiques physiques	47
3.1 Caractéristiques géométriques	47
3.2 Caractéristiques de transmission	48
3.2.1 Affaiblissement du signal	48
3.2.2 Bande passante optique	48
3.2.3 Bande passante électro-optique	48
3.2.4 Longueur d'onde de coupure	49
3.2.5 Dispersion chromatique	49
3.2.6 Dispersion de polarisation	50
3.2.7 Dispersion modale de polarisation	50
3.2.8 Temps de propagation de groupe différentiel	51
3.2.9 Principales normes de transmission	51

- 4. Fabrication des fibres optiques 53
 - 4.1 Principe général de fabrication..... 53
 - 4.2 Oxydation extérieure en phase vapeur 55
 - 4.3 Décomposition chimique modifiée en phase vapeur 55
 - 4.4 Décomposition chimique de vapeur activée par plasma 56
 - 4.5 Autres procédés..... 57
 - 4.6 Principe du fibrage 57
 - 4.7 Principe du dopage 58

Chapitre 3
Panorama des fibres optiques unimodales

- 1. Introduction 61
- 2. Organismes de normalisation 62
 - 2.1 Union internationale des télécommunications 62
 - 2.2 Commission électrotechnique internationale..... 63
 - 2.3 Association française de normalisation..... 65
 - 2.4 Autres organisations..... 66
- 3. Panorama des fibres unimodales classiques 67
 - 3.1 Principales recommandations
pour les fibres unimodales classiques 67
 - 3.2 Recommandation UIT-T G.652 70
 - 3.2.1 Évolution de la recommandation G.652 70
 - 3.2.2 Neuvième version de la recommandation G.652 74
 - 3.3 Recommandation UIT-T G.653 75
 - 3.3.1 Évolution de la recommandation G.653 75
 - 3.3.2 Septième version de la recommandation G.653 77
 - 3.4 Recommandation UIT-T G.654 78
 - 3.4.1 Évolution de la recommandation G.654 78
 - 3.4.2 Dixième version de la recommandation G.654..... 80
 - 3.5 Recommandation UIT-T G.655 82
 - 3.5.1 Évolution de la recommandation G.655 82
 - 3.5.2 Cinquième version de la recommandation G.655 83

4 Les fibres optiques

Notions fondamentales

3.6	Recommandation UIT-T G.656	85
3.6.1	Évolution de la recommandation G.656	85
3.6.2	Troisième version de la recommandation G.656	86
3.7	Recommandation UIT-T G.657	87
3.7.1	Évolution de la recommandation G.657	87
3.7.2	Quatrième version de la recommandation G.657	88
3.7.3	Quatre sous-catégories des fibres G.657	89
3.7.4	Modification de l'épaisseur du revêtement	91
3.8	Correspondance des normes UIT-T et CEI	92
4.	Panorama des fibres unimodales spécifiques	94
4.1	Fibres optiques spéciales (FOS)	94
4.1.1	Fibres optiques à maintien de polarisation	94
4.1.2	Fibres optiques résistant aux hautes températures	95
4.1.3	Fibres optiques dopées aux terres rares	96
4.1.4	Autres exemples de fibres optiques spécifiques	96
4.2	Fibres optiques multicœurs (MCF)	97
4.2.1	Multiplexage par répartition spatiale (SDM)	97
4.2.2	Principaux problèmes rencontrés	98
4.2.3	Exemples de fibres multimodales multicœurs	99
4.2.4	Exemple de composant pour fibres multicœurs	100
4.3	Fibres optiques à quelques modes (FMF)	101
4.4	Fibres optiques à cœurs elliptiques	101

Chapitre 4

Fibres multimodales en silice et fibres en plastique

1.	Introduction	103
2.	Organismes de normalisation	104
2.1	Correspondances entre organismes	104
2.2	Organisation internationale de normalisation	105

- 3. Fibres optiques multimodales en silice 107
 - 3.1 Rappel historique et ancêtres à gros cœur 107
 - 3.1.1 Rappel historique des fibres multimodales en silice 107
 - 3.1.2 Ancêtres à gros cœur des fibres multimodales 109
 - 3.2 Recommandation UIT-T G.651.1 110
 - 3.3 Fibres optiques multimodales OMx pour les réseaux locaux . 112
 - 3.3.1 Fibres optiques multimodales OM1 112
 - 3.3.2 Fibres optiques multimodales OM2, OM3 et OM4 113
 - 3.3.3 Arrivée des fibres multimodales OM5 114
 - 3.3.4 Clap de fin pour les fibres OM1 et OM2 116
 - 3.3.5 Fibres 50/125 à faible rayon de courbure (BIMMF) 117
 - 3.4 Fibres multimodales à revêtement renforcé 119
 - 3.5 Fibres multimodales à cœur ou gaine non circulaire 119
 - 3.6 Liaisons entre fibres de cœurs différents 120
- 4. Fibres optiques multimodales en plastique 121
 - 4.1 Généralités sur les fibres optiques en plastique 121
 - 4.2 Fibres optiques en plastique type PMMA 122
 - 4.3 Fibres optiques en plastique évolué 124
 - 4.4 Principaux types de fibres optiques en plastique 125
 - 4.5 Normalisation afnor 126
 - 4.6 Exemples d’applications 127
 - 4.6.1 Montée à 1 Gbit/s sur FOP 127
 - 4.6.2 La FOP dans l’habitat 129
 - 4.7 Association POFTO 130

Chapitre 5
Câbles à fibres optiques

- 1. Généralités sur les câbles à fibres optiques 131
- 2. Constitution d'un câble à fibres optiques 132
 - 2.1 Structure d'un câble à fibres optiques 132
 - 2.2 Contenance d'un câble à fibres optiques 134
 - 2.2.1 Câbles unifibres 134

2.2.2	Câbles à deux fibres optiques	134
2.2.3	Câbles multifibres pour distribution intérieure	135
2.2.4	Câbles multifibres pour distribution extérieure	136
2.2.5	Câbles à fibres optiques agencées en ruban	136
2.2.6	Câbles à fibres optiques de conception spécifique	138
3.	Principales contraintes sur un câble à fibres optiques	139
3.1	Résistance mécanique	139
3.1.1	Microcourbures et macrocourbures.	139
3.1.2	Efforts de traction.	140
3.1.3	Écrasement, chocs et torsion	140
3.1.4	Trépidations	141
3.2	Résistance aux conditions environnementales.	141
3.2.1	Conditions aqueuses et gazeuses.	141
3.2.2	Résistance au feu	142
3.2.3	Écoconception des câbles	144
4.	Recommandations de l'UIT-T pour les câbles à fibres optiques . . .	146
4.1	Recommandation UIT-T L.100/L.10.	149
4.2	Recommandation UIT-T L.101/L.43.	151
4.3	Recommandation UIT-T L.102/L.26.	152
4.4	Recommandation UIT-T L.103/L.59.	155
4.5	Recommandation UIT-T L.104/L.67.	157
4.6	Recommandation UIT-T L.105/L.87.	159
4.7	Recommandation UIT-T L.106/L.58.	161
4.8	Recommandation UIT-T L.107/L.78.	163
4.9	Recommandation UIT-T L.108/L.79.	165
4.10	Recommandation UIT-T L.109/L.60.	166
4.11	Recommandation UIT-T L.110	168
4.12	Recommandation UIT-T L.430/L.28.	169
4.13	Recommandation UIT-T G.978	172
4.13.1	Généralités sur la recommandation G.978	172
4.13.2	Typologie des câbles à fibres optiques sous-marins	174

- 5. Câbles à fibres optiques pour applications spécifiques 176
 - 5.1 Câbles à fibres optiques pour les réseaux en avionique 176
 - 5.2 Câbles à fibres optiques pour les plateformes pétrolières 178
 - 5.3 Câbles à fibres optiques pour éoliennes en mer 179
- 6. Normalisation des câbles vue côté CEI 180
 - 6.1 Panorama des normes CEI pour les câbles à fibres optiques .. 180
 - 6.2 Où acheter les normes CEI des câbles à fibres optiques ? 182

Chapitre 6
Aboutement des fibres optiques

- 1. Généralités sur l’aboutement des fibres optiques. 183
 - 1.1 Problèmes rencontrés 183
 - 1.2 Définitions de base en connectique optique. 187
- 2. Exemples de connectique pour fibres optiques. 189
 - 2.1 Premières fiches optiques 189
 - 2.2 Exemples de fiches pour fibre optique unitaire 190
 - 2.3 Exemples de fiches pour câbles à deux fibres optiques 191
 - 2.4 Connectique optique à haute densité 192
 - 2.4.1 MPO-12, un connecteur normalisé 192
 - 2.4.2 Diverses versions du MPO-12 193
 - 2.4.3 MPO-16 et MPO-32 195
 - 2.5 Évolution vers la sécurité 197
 - 2.6 Fiche optique avec alimentation électrique 197
 - 2.7 Où se procurer les normes de connectique optique ? 198
- 3. Couplage entre fibre optique et fiche optique 199
 - 3.1 Principe d'un raccordement classique 199
 - 3.2 Principe du collage 200
 - 3.3 Principe du sertissage 201
 - 3.4 Principes du polissage 202
 - 3.5 Fiches prééquipées 204
 - 3.6 Fibres optiques préconnectorisées 204

8 **Les fibres optiques**

Notions fondamentales

3.7	Principes d'ajustement	206
4.	Connectique optique pour environnements difficiles	209
4.1	Principe du faisceau expansé	209
4.2	Connectique optique pour avionique	211
4.3	Connectique optique pour le ferroviaire	212
4.4	Connectique optique pour câbles sous-marins	213
5.	Connectique pour fibre optique en plastique	213
6.	Aboutement semi-fixe ou fixe	215
6.1	Prolongateurs et épissures mécaniques	215
6.2	Soudure ou épissure par fusion	217
6.2.1	Principe de la soudure	217
6.2.2	Soudeuses cœur à cœur ou gaine à gaine	219
6.2.3	Autres caractéristiques des soudeuses	221
6.2.4	Soudeuses pour fibres spécifiques	222
7.	La poussière, ennemi n°1	226

Chapitre 7

Mesures dans un réseau de fibres optiques

1.	Caractéristiques optiques à mesurer	231
1.1	Caractéristiques géométriques	231
1.2	Caractéristiques fonctionnelles	232
1.3	Caractéristiques de transmission	233
1.4	Méthodes pour les mesures	234
2.	Outils de tests optiques légers	235
2.1	Pince de détection de trafic optique	235
2.2	Stylo optique	236
2.3	Sonde d'inspection optique	236
3.	Photométrie optique	237
3.1	Constitution d'un photomètre	237
3.2	Que mesure-t-on ?	238
3.3	Comment mesure-t-on ?	239

- 3.4 Options pour un photomètre 239
- 3.5 Limites de la photométrie 240
- 4. Réflectométrie optique 240
 - 4.1 Réflectométrie et réflectomètres 240
 - 4.1.1 Principe de la réflectométrie 240
 - 4.1.2 Généralités sur les réflectomètres 243
 - 4.2 Méthodes de mesures en réflectométrie 244
 - 4.2.1 Affaiblissement de la fibre 244
 - 4.2.2 Événement abrupt 245
 - 4.2.3 Dispersion chromatique 246
 - 4.2.4 Dispersion du mode de polarisation 246
 - 4.3 Réflectométrie et applications particulières 246
 - 4.3.1 Longues distances et plage dynamique 246
 - 4.3.2 Courtes distances et zones mortes 248
 - 4.3.3 Cas des réseaux optiques passifs 250
 - 4.3.4 Cas des câbles à forte densité 251
 - 4.3.5 Cas du multiplexage par longueur d’onde 252
 - 4.4 Autres facteurs en réflectométrie 253
 - 4.4.1 Informatique en nuage et IPv6 253
 - 4.4.2 Caractéristiques fonctionnelles 254
- 5. Spectrométrie optique 255
 - 5.1 Analyse de spectre optique 255
 - 5.2 Analyseurs de spectre optique 256
 - 5.3 Analyseurs de dispersion chromatique
et de mode de polarisation 259
 - 5.4 Analyseurs de protocoles 259
 - 5.5 Testeur de taux d’erreurs binaires 260
- 6. Appareils de mesures et normalisation 261
 - 6.1 Normalisation pour les photomètres 261
 - 6.2 Normalisation pour les réflectomètres 261
 - 6.3 Normalisation pour les analyseurs de spectre optique 262
 - 6.4 Accréditation des laboratoires 264

Chapitre 8**Composants optoélectroniques**

1. Émetteurs électro-optiques	265
1.1 Un peu d'histoire	265
1.2 Généralités sur les émetteurs	267
1.3 Transmission et qualité du signal	268
1.4 Quelques mots sur les VCSEL	271
1.5 Largeur spectrale et distance	273
1.6 Évolutions des lasers	274
1.7 Exemples de normes pour les lasers	276
2. Récepteurs optoélectroniques	277
2.1 Généralités sur les récepteurs optoélectroniques	277
2.2 Photodiodes PIN	277
2.3 Photodiodes à avalanche	279
3. Modules émetteurs-récepteurs optiques	280
3.1 XFP	280
3.2 CXP et CXP2	280
3.3 Famille SFP, SFP+, SFP16, SFP28 et SFP56	281
3.3.1 Gamme des SFP	281
3.3.2 Spécifications du SFP-DD MSA	281
3.4 Famille CFP, CFP2, CFP4 et CFP8	282
3.4.1 Gamme des émetteurs-récepteurs CFP	282
3.4.2 Spécifications du CFP-MSA	284
3.5 Famille QSFP, QSFP+, QSFP28 et QSFP56	284
3.6 QSFP-DD	285
4. Composants optiques	286
4.1 Coupleurs optiques	286
4.2 Affaiblisseurs optiques	288
5. Cordons optiques actifs	290
5.1 Raison d'être des cordons optiques actifs	290
5.2 Présentation générale d'un cordon optique actif	291
5.2.1 Modules émetteurs-récepteurs optiques	291

- 5.2.2 Fiches optiques 292
- 5.2.3 Fibres optiques 293
- 5.3 Critères de choix d'un cordon optique actif 295
- 6. Circuits intégrés photoniques 298
 - 6.1 Histoire des circuits intégrés photoniques 298
 - 6.2 Grands types de technologie et couplage 301
 - 6.3 Facteurs de développement des puces photoniques 302
 - 6.4 Puces photoniques dans les réseaux 304
 - 6.5 Puces photoniques et centres informatiques 305
 - 6.6 COBO, Consortium for On-Board Optics 308
 - 6.7 Les puces de demain ? 309

Chapitre 9

Multiplexage en longueurs d'onde

- 1. Principe du multiplexage en longueurs d'onde 311
 - 1.1 Canal de transmission, grille spectrale et principe 312
 - 1.2 Rappel historique 313
 - 1.3 La famille WDM, CWDM, DWDM et SWDM 315
 - 1.4 Principales recommandations de l'UIT-T 317
- 2. Multiplexage par répartition dense en longueurs d'onde 318
 - 2.1 Caractéristiques générales du DWDM 318
 - 2.2 Grilles spectrales du DWDM 319
 - 2.3 Grille DWDM "flexible" 321
- 3. Multiplexage par répartition espacée en longueurs d'onde 322
 - 3.1 Caractéristiques générales du CWDM 322
 - 3.2 Grilles spectrales du CWDM 323
 - 3.3 Interfaces optiques pour le CWDM 323
 - 3.4 Signaux de télévision 324
- 4. Multiplexage par répartition en longueurs d'onde courtes 325
 - 4.1 Caractéristiques générales du SWDM 325
 - 4.2 Émetteurs-récepteurs pour SWDM4 326

5. Principaux équipements en WDM	327
5.1 Multiplexeur-démultiplexeur	327
5.2 Multiplexeur d'insertion-extraction de longueur d'onde	328
5.3 Multiplexeur d'insertion-extraction de longueurs d'onde reconfigurable à distance	329
5.3.1 Un ROADM, pour quoi faire ?	329
5.3.2 Comment fonctionne un ROADM ?	331
5.3.3 Quelles évolutions pour les ROADM ?	334
6. Exemples d'applications du WDM	335
6.1 Application du WDM en centre de données	335
6.2 Application du CWDM entre deux centres de données	336
6.3 Application du multiplexage dans un réseau optique passif ..	336

Chapitre 10 Ethernet et fibres optiques

1. Introduction	337
2. Ethernet et ses évolutions	337
2.1 Création d'Ethernet	337
2.2 Ethernet de 1985 à 2015	339
2.2.1 En 1985, IEEE organisme officiel	339
2.2.2 En 2008, première refonte des normes : IEEE 802.3-2008	340
2.2.3 En 2012, deuxième refonte des normes : IEEE 802.3-2012	340
2.2.4 En 2015, troisième refonte des normes : IEEE 802.3-2015	341
2.3 Ethernet en 2018 (IEEE 802.3-2018) et après.....	342
2.3.1 La norme IEEE 802.3-2018	342
2.3.2 Exemples d'amendements depuis 2018.....	343
2.3.3 Groupes de travail	344

2.4	Écosystème et vocabulaire Ethernet	345
2.4.1	Écosystème Ethernet	346
2.4.2	Energy-Efficient Ethernet	347
2.4.3	Parlez-vous Ethernet ?	347
3.	FOIRL, Ethernet à 10 Mbit/s et à 100 Mbit/s	349
3.1	FOIRL	349
3.2	Ethernet à 10 Mbit/s	350
3.2.1	Diversité d'Ethernet 10 Mbit/s sur fibres optiques	350
3.2.2	Fibres optiques et connectique	351
3.2.3	Convertisseur de médias	352
3.3	Ethernet à 100 Mbit/s	353
3.3.1	Diversité d'Ethernet 100 Mbit/s sur fibres optiques	353
3.3.2	Fibres optiques et connectique	354
4.	Ethernet à 1 Gbit/s et à 10 Gbit/s	354
4.1	Ethernet à 1 Gbit/s	355
4.1.1	Diversité d'Ethernet à 1 Gbit/s sur fibres	355
4.1.2	Fibres optiques et connectique	356
4.1.3	Distances minimales couvertes	357
4.1.4	Exemples de topologie d'un réseau Ethernet à 1 Gbit/s	358
4.1.5	Ethernet à 1 Gbit/s sur fibres en plastique ou 1000-RHx	360
4.2	Ethernet à 10 Gbit/s	361
4.2.1	Diversité d'Ethernet à 10 Gbit/s sur fibres	361
4.2.2	Ethernet à 10 Gbit/s en PON	363
4.2.3	Fibres optiques et distances	363
4.2.4	Diversité des interfaces	365
5.	Ethernet à 40 Gbit/s et à 100 Gbit/s	365
5.1	Familles d'Ethernet à 40 Gbit/s et à 100 Gbit/s	366
5.1.1	Famille 40GBASE-R	366
5.1.2	Famille 100GBASE-R	367
5.1.3	Hors norme : 100G CWDM4	369
5.2	Fibres optiques pour le 40 Gbit/s et le 100 Gbit/s	370
5.3	Connectique optique pour le 40 Gbit/s et le 100 Gbit/s	371

5.4	Grilles de multiplexage en longueurs d'onde	373
5.4.1	Grille de multiplexage pour les 40GBASE-LR4 et -ER4 .	373
5.4.2	Grille de multiplexage pour les 100GBASE-LR4 et -ER4	374
6.	Ethernet à 25 Gbit/s	374
6.1	Fibres optiques pour le 25 Gbit/s.	374
6.2	Principales applications de l'Ethernet à 25 Gbit/s	376
6.3	Ethernet à 50 Gbit/s.	376
6.4	Consortium 25 Gigabit Ethernet.	378
7.	Ethernet à 200 Gbit/s et à 400 Gbit/s	378
7.1	Familles d'Ethernet à 200 Gbit/s et à 400 Gbit/s	379
7.1.1	Famille 200GBASE-R	379
7.1.2	Famille 400GBASE-R	380
7.2	Grilles de multiplexage en longueurs d'onde	382
7.2.1	Grille de multiplexage pour les 200GBASE-FR4.	382
7.2.2	Grille de multiplexage pour les 200GBASE-LR4.	382
7.2.3	Grille de multiplexage pour les 400GBASE-FR8 et -LR8	383
7.2.4	Codage PAM4.	383
8.	Vers l'Ethernet à 1 Tbit/s.	384
8.1	Débits de 600 Gbit/s et 800 Gbit/s	384
8.2	Vers l'Ethernet à 1 Tbit/s.	384

Chapitre 11

Réseaux d'entreprise et fibres optiques

1.	Typologie des réseaux d'entreprise	385
2.	Réseaux locaux et réseaux de campus.	386
2.1	Réseaux locaux	386
2.2	Réseaux de campus.	389
2.3	Équipements de distribution physique	391
3.	FDDI, InfiniBand et Fibre Channel.	394
3.1	Fiber distributed data interface (FDDI)	395
3.2	InfiniBand	397

3.2.1	InfiniBand ou les InfiniBand	397
3.2.2	De 10 Gbit/s à 1,2 Tbit/s	397
3.2.3	InfiniBand : HPC et RoCE	399
3.2.4	InfiniBand Trade Association	400
3.3	Fibre Channel	401
3.3.1	Généralités sur Fibre Channel	401
3.3.2	Génération 7 ou 64GFC	402
3.3.3	Composants optiques pour Fibre Channel	403
3.3.4	Fibre Channel Industry Association	404
3.3.5	Fibre Channel over Ethernet (FCoE)	405
4.	Réseaux industriels, vidéoprotection et capteurs	406
4.1	Problématique des réseaux industriels	406
4.2	Bus de terrain, EtherCAT et ODVA	408
4.2.1	Bus de terrain : série de normes CEI 61158	408
4.2.2	Ethernet industriel et EtherCAT	410
4.2.3	Variété de protocoles industriels : ODVA	411
4.3	Réseaux de vidéoprotection	413
4.3.1	Une application des réseaux industriels	413
4.3.2	Transition vers le numérique et vers IP	414
4.3.3	Ministère de l'Intérieur et ONVIF	416
4.4	Réseaux de capteurs à fibres optiques	416
4.4.1	Généralités sur les capteurs à fibres optiques	416
4.4.2	Normes CEI sur les capteurs	418
5.	Réseaux embarqués	419
5.1	VITA	419
5.1.1	L'association VITA	419
5.1.2	VITA et les fibres optiques	419
5.1.3	Les technologies VITA	420
5.2	Réseaux dans l'automobile	421
5.3	Réseaux en avionique	424
5.3.1	Principales applications	424
5.3.2	Ethernet en avionique	424
5.3.3	Exemples de produits IFEC	426

5.3.4 Cas de l'aérospatial	426
5.4 Applications en ferroviaire	427
5.5 Réseaux en applications militaires	428

Chapitre 12

Réseaux d'exploitants en fibres optiques

1. Typologie des réseaux en fibres optiques	431
2. Réseaux étendus	433
2.1 Réseaux transocéaniques et maritimes	433
2.1.1 Un peu d'histoire	433
2.1.2 Quelques données chiffrées	434
2.1.3 Exemples de matériels	435
2.2 Réseaux terrestres, fluviaux et en aérien	439
2.2.1 Réseaux terrestres	439
2.2.2 Réseaux fluviaux	441
2.2.3 Réseaux en aérien	441
2.3 Réseaux métropolitains	444
2.3.1 Diversité des équipements	444
2.3.2 Nœud de raccordement optique (NRO)	446
2.3.3 Metro Ethernet Forum (MEF)	447
3. Réseaux de distribution point-à-point	449
3.1 Point-à-point v/s multipoint	450
3.2 FTTx ?	450
4. Réseaux optiques passifs	452
4.1 Historique des PON	452
4.2 Les premiers PON	454
4.3 PON à 10 Gbit/s	457
4.3.1 Le 10G-EPON	457
4.3.2 Le XG-PON	458
4.3.3 Le XGS-PON	460

4.4	Le WDM et les PON	462
4.4.1	Le WDM-PON	462
4.4.2	Les MW-PON	463
4.5	Les PON à hauts débits	465
4.5.1	Les NG-PON2 à 40 Gbit/s	466
4.5.2	Les 25G-PON et 50G-PON de l'UIT-T	470
4.5.3	Les 25GE-PON et 50GE-PON de l'IEEE.	472
4.5.4	Les PON et la 5G.	473
4.6	Normalisation des PON	474
4.6.1	Travaux du FSAN.	474
4.6.2	Recommandations de l'UIT-T	475
4.6.3	Normes de l'IEEE.	478
4.6.4	Synthèse des architectures des PON	479
4.7	La recherche sur les PON	480
4.7.1	Exemple à 25 Gbit/s par longueur d'onde.	481
4.7.2	Exemple à 50 Gbit/s par longueur d'onde.	481
4.7.3	Exemple à 100 Gbit/s par longueur d'onde.	482
4.7.4	Exemple d'un UDWDM-PON à 1 000 clients	483
4.7.5	Exemple de recherche en PON et 5G.	483
5.	Réseaux dans l'immobilier et l'habitat.	484
5.1	ARCEP, autorité de régulation.	484
5.1.1	Un grand dossier : "La fibre".	485
5.1.2	Le cadre réglementaire de la fibre	486
5.1.3	Copropriétaires et bailleurs	487
5.1.4	La fibre dans l'habitat social	487
5.2	Association Objectif fibre	488
5.2.1	Présentation d'Objectif fibre	488
5.2.2	Les guides d'Objectif fibre	490
5.3	Le forum « La Fibre .info »	493
5.4	Exemples d'équipements	494
5.5	Concept RLDO	496

Conclusion

1. Introduction	499
2. Le FTTH à 10 Gbit/s	499
2.1 En 2005, Hong Kong, 1 Gbit/s.	499
2.2 En 2014, ELFA, 1 Gbit/s.	500
2.3 En 2015, Asie et États-Unis, 10 Gbit/s	500
2.4 En 2019, France, 100 Mbit/s	500
3. La fibre optique et la 5G.	501
3.1 Explosion du nombre de cellules	501
3.2 La fibre : oui, mais comment ?	502
4. Des téraoctets et pétaoctets	503
4.1 Accroître le nombre de "tuyaux"	503
4.2 Une transmission à 715 Tbit/s sur 2 009 km	504
4.3 Une transmission de 1,2 Pbit/s sur 3,37 km	504
5. En route vers 2030	505
5.1 Historique des générations de réseaux	505
5.2 Réseaux futurs (future networks - FN).	506
5.3 Opération Network 2030.	507

Annexes

1. Organisations de normalisation	509
2. Autres organisations et associations	511
3. Événements et revues.	515
4. Acronymes	516

Index	523
-----------------	-----



Chapitre 5

Câbles à fibres optiques

1. Généralités sur les câbles à fibres optiques

Dans la majorité des applications, on utilise des câbles à fibres optiques, c'est-à-dire des fibres optiques protégées mécaniquement. Il existe une très large gamme de câbles optiques répondant à tous les cas rencontrés :

- Câbles d'extérieur, entre immeubles, installés en aérien, en souterrain ou en caniveaux.
- Câbles pour la distribution verticale entre étages.
- Câbles pour la distribution horizontale jusqu'au poste de travail, en apparent, en faux-plafond ou faux-plancher.
- Cordons de liaisons et cordons de brassage.
- Câbles dotés de gaines particulières pour certaines protections contre les rongeurs, contre l'humidité, contre des agents corrosifs, contre des plombs de chasse, etc.
- Câbles dont les gaines sont sans halogène et à faibles dégagement de fumées (*low smoke zero halogen* - LSZH ou LSOH) pour les bâtiments recevant du public.
- Câbles pour les liaisons de très longues distances terrestres, fluviales ou sous-marines, etc.

Tout d'horizon des diverses constitutions de câbles à fibres optiques présentes sur le marché, des contraintes auxquelles un câble doit faire face ainsi que des recommandations de l'UIT-T.

2. Constitution d'un câble à fibres optiques

Quel que soit le type de câble, il sera constitué selon une des trois possibilités de structure que sont la structure serrée, la structure libre ou la structure en ruban et il contiendra un nombre de fibres optiques très variable, de la fibre unitaire à plusieurs centaines de fibres.

2.1 Structure d'un câble à fibres optiques

Câbles à fibres optiques à structure serrée

La structure élémentaire d'une fibre optique est dite structure serrée lorsqu'elle est recouverte de façon solidaire par un revêtement secondaire. Ce revêtement protecteur est extrudé directement sur la fibre optique et, généralement, son diamètre est de 900 microns. Puis, à chaque fibre on ajoute des renforts en polyamide de type Kevlar ainsi qu'une gaine supplémentaire.

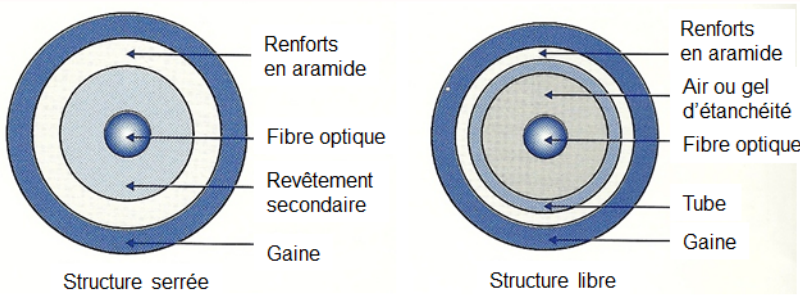
Tout cela confère à la fibre optique des avantages en maniabilité et en résistance mécanique. De plus, l'assemblage des fibres optiques de ce type autour d'un renfort central permet de constituer facilement un câble présentant une grande facilité de pose et de raccordement car chaque fibre est directement connectable.

Les coefficients de dilatation et de rétraction de la fibre en verre et des revêtements en plastique étant différents, cette structure se rencontre essentiellement dans des applications à l'intérieur des bâtiments.

Câbles à fibres optiques à structure libre

En structure libre, la fibre élémentaire de 250 microns est logée librement dans un tube plus large afin de faire face aux risques de dilatation ou rétractation offrant ainsi des possibilités d'utilisation avec des plages de températures plus étendues. Un autre avantage de cette structure tient au fait que plusieurs fibres optiques peuvent être placées dans un même tube d'où un moindre encombrement qu'en structure serrée, à nombre de fibres égal.

En revanche, le tube est rempli d'un gel spécial qui sert de barrière à l'humidité. Ceci nécessite une plus longue préparation du câble, un temps de raccordement plus long et une manipulation plus délicate. Cette structure libre se rencontre en rocades extérieures inter-bâtiments ou sur de longues distances mais aussi en distribution intérieure en version économique sans gel d'étanchéité.



Structure serrée et structure libre

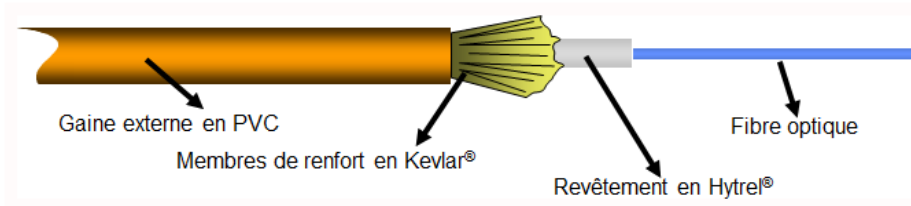
Une fibre optique élémentaire à structure serrée est aussi appelée fibre revêtue 900 microns ou souplisseau. Un câble constitué de telles fibres est nommé, en langue anglaise, *buffer 900 microns* ou *structure light*. Quant à la structure libre, les synonymes sont structure tubée ou câble à graisse et, en anglais, *loose tube fiber*.

On rencontre également une variante de la structure serrée : le principe appelé "micro-gaine" dans laquelle plusieurs fibres optiques sont étroitement enserrées par une enveloppe. Cette structure est fréquemment utilisée pour la pose de câbles en conduite.

2.2 Contenance d'un câble à fibres optiques

2.2.1 Câbles unifibres

Les câbles unifibres ou monofibres ou simplex se rencontrent peu si ce n'est au niveau des derniers raccordements, des cordons optiques ou des jarretières optiques dans les armoires de brassage.

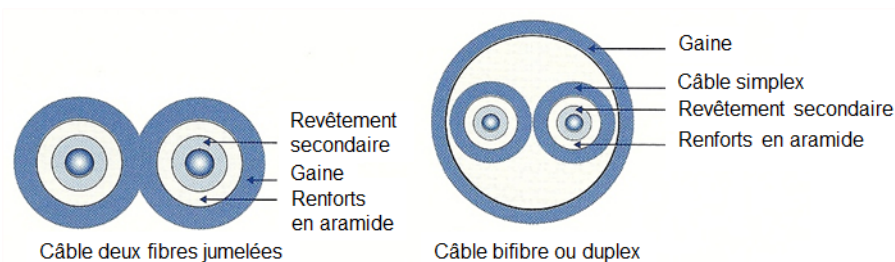


Exemple d'un câble unifibre en structure serrée

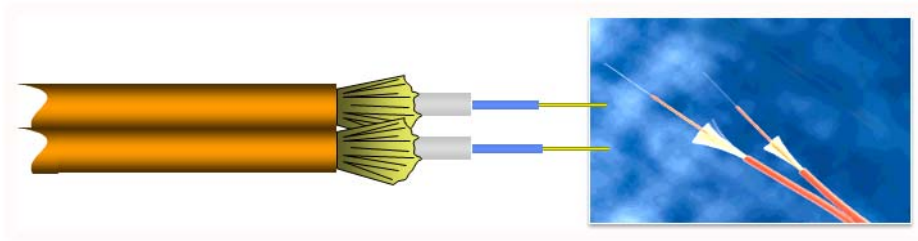
2.2.2 Câbles à deux fibres optiques

Généralement, chaque liaison d'application nécessite deux fibres optiques, une pour chaque sens de transmission. Ainsi, les cordons optiques ou les câbles de branchement des équipements ou ceux de distribution vers le point d'accès comportent deux fibres optiques.

Ces câbles à deux fibres optiques ont deux gaines jumelées, comme le Zipcord, qui peuvent se séparer aisément, ou bien une seule gaine contenant les deux fibres optiques, câbles dits duplex.



Coupes des deux types de câbles à deux fibres optiques



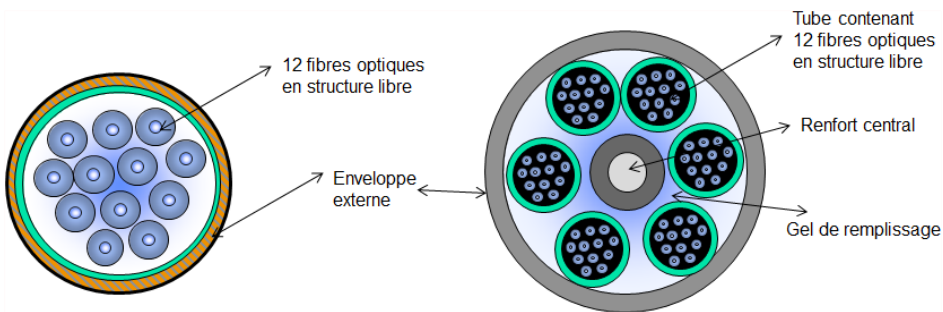
Exemple d'un câble jumelé bifibre en structure serrée

2.2.3 Câbles multifibres pour distribution intérieure

Pour la distribution intérieure, on peut trouver des câbles de six fibres optiques reliant le local technique d'étage à un point de branchement desservant trois points d'accès. Dans les installations moyennement fibrées, entre répartiteurs de locaux techniques, les câbles multifibres optiques sont souvent constitués par multiples de six fibres : 6, 12, 18, 24, 30 ou 36 fibres optiques. Pour les immeubles massivement fibrés, on a recours à des câbles de plus forte densité contenant de 72 fibres optiques à près d'un millier.

Dans tous les cas, le nombre de fibres optiques ne doit pas être chichement dimensionné à la conception de l'installation et il est souhaitable de prévoir des fibres optiques en attente d'affectation.

Ces câbles de distribution intérieure sont gainés de plastique et le comportement au feu de ces gaines doit être conforme à la législation en vigueur (câbles LSZH).



Exemples de câbles multifibres en intérieur

2.2.4 Câbles multifibres pour distribution extérieure

En câbles d'extérieur, trois types de gainage sont généralement rencontrés : câbles non armés standard, câbles non armés pour conditions sévères et câbles armés.

Tous les câbles non armés sont totalement diélectriques, d'où leur insensibilité à la foudre et l'absence de court-circuit, d'étincelle et donc de risque d'incendie. De plus, ils offrent un découplage galvanique parfait. Les câbles pour conditions sévères sont à prévoir dans les atmosphères corrosives ou inflammables comme celles de l'industrie pétrochimique.

Quant aux câbles armés, une tresse de protection en acier leur permet de résister aux rongeurs qui, contrairement à une idée répandue, ne mangent pas les câbles pour le goût de la gaine mais ne les rongent que lorsqu'ils perturbent leurs déplacements. Lors de l'installation, ne pas oublier la mise à la terre de l'armature métallique ! Si les contraintes du site interdisent l'usage de matériaux métalliques, on choisira un câble armé de fibres de verre tressées ou de fibres synthétiques.

2.2.5 Câbles à fibres optiques agencées en ruban

Pour les sites à forte densité de fibres, comme les centres de données (*data center*) ou les centres de calcul à supercalculateurs (*high performance computing*), s'est développée la technologie des câbles de fibres optiques agencées en structure de ruban. La fabrication de ces câbles consiste à poser parallèlement 6, 8 ou 12 fibres optiques élémentaires de 125 microns dans un "sandwich".

On rencontre deux grandes familles de câbles à fibres optiques agencées en rubans : une famille appelée bord à bord dans laquelle les fibres sont collées et ainsi liées l'une à l'autre ; une famille dite encapsulée dans laquelle les fibres sont plongées dans un enduit.

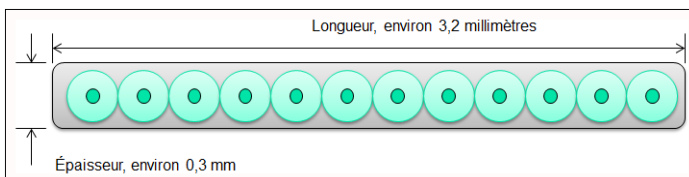


Schéma de 12 fibres optiques agencées bord à bord