

cigref

*Club Informatique des Grandes  
Entreprises Françaises*

**Réseau local  
sur  
fibres optiques**

**Guide d'étude et de réalisation**

**afnor**

## Chez le même éditeur

Afnor, *Sécurité informatique et protection des données*, coll. « Afnor Technique », 1983.

Cigref, *Architecture de sécurité dans les réseaux informatiques. Impact de la sécurité sur l'architecture des réseaux*, coll. « Afnor Technique », 1989.

Cigref, *Autocommutateurs privés multiservices (AMS)*, coll. « Les dossiers de la normalisation », 1989.

Cigref, *Conception des systèmes d'archivage dans les grandes entreprises françaises. Utilisation pertinente du disque optique numérique et du vidéo-disque*, coll. « Les dossiers de la normalisation », 1989.

Cinnamon B., *Gestion électronique de documents sur disques optiques*, coll. « Afnor Technique », 1989.

Coux (de) B., *Le système d'exploitation Pick. Réalités et perspectives*, coll. « Les dossiers de la normalisation », 1988.

Groupe permanent des réseaux locaux, *La sécurité et le câblage dans les réseaux locaux*, coll. « Les dossiers de la normalisation », 1988.

Martin J.-P., *La qualité des logiciels. Du bricolage à l'industrialisation*, coll. « Afnor Gestion », 1987.

Moitessier F., Derniame J.-C., Garnier de Labareyre F., *Les structures d'accueil d'ateliers de génie logiciel*, coll. « Afnor Technique », 1989.

© AFNOR 1990

ISBN : 2-12-484611-6

ISSN : 0297-4827

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (Loi du 11 mars 1957 – art. 40 et 41 et Code Pénal art. 425).

AFNOR – Tour Europe, Cedex 7 – 92049 Paris La Défense – Tél. : (1) 42 91 55 55

# Sommaire

Le groupe <i>Fibres optiques</i> du CIGREF .....	IX
Avant-propos .....	XI
<b>Chapitre 1 Introduction</b> .....	<b>1</b>
1 Généralités .....	1
1.1 Caractères spécifiques .....	1
1.2 Domaines généraux d'application .....	2
2 Propriétés des fibres optiques et domaines d'application .....	4
<b>Chapitre 2 Architecture de réseau</b> .....	<b>7</b>
1 Généralités .....	7
2 Topologie .....	8
2.1 Bus actif .....	8
2.2 Anneau .....	9
2.3 Étoile .....	10
2.4 Câblage multitopologie .....	11
<b>Chapitre 3 Composants du système optique</b> .....	<b>13</b>
1 Composants passifs .....	13
1.1 Caractéristiques des fibres optiques .....	13
1.1.1 Constitution des fibres optiques .....	13
1.1.2 Affaiblissement de transmission .....	16
1.1.3 Bande passante des fibres optiques .....	18
1.1.4 Comparaison des fibres optiques .....	19

1.2 Câbles à fibres optiques .....	20
1.2.1 Structures dites « serrées » .....	22
1.2.2 Structures à fibres libres (ou lâches) .....	25
1.2.3 Performances des câbles .....	28
1.3 Connectique .....	31
1.3.1 Centrage géométrique des fibres .....	31
1.3.2 Raccordement permanent .....	34
1.3.3 Raccordement démontable .....	35
1.3.4 Protection des raccordements et connexions d'extré- mité .....	36
1.4 Coupleurs .....	36
1.5 Caractéristiques des multiplexeurs-démultiplexeurs (« Mul- dex ») .....	38
1.5.1 Perte d'insertion .....	38
1.5.2 Diaphonie (ou plus exactement diaphotie) .....	38
1.6 Atténuateurs .....	41
1.6.1 Atténuateurs fixes .....	41
1.6.2 Atténuateurs variables .....	41
2 Composants actifs .....	41
2.1 Émetteurs .....	41
2.1.1 Diodes électroluminescentes (DEL) .....	42
2.1.2 Diodes laser .....	43
2.1.3 Paramètres typiques de sources optiques à semi- conducteur .....	45
2.2 Récepteurs .....	45
2.2.1 Photodiodes PIN .....	49
2.2.2 Photodiodes à avalanche (APD) .....	51
2.3 Coupleurs .....	52
<b>Chapitre 4 Systèmes .....</b>	<b>53</b>
1 Systèmes de transmission analogique .....	53
1.1 Techniques de modulation .....	53
1.2 Comparaison des modulations .....	54
2 Systèmes de transmission numérique .....	54
2.1 Choix de la source .....	55
2.2 Choix du détecteur .....	55
2.3 Codage en ligne .....	55
3 Multiplexage par répartition en longueur d'onde (MRL) .....	56
<b>Chapitre 5 Études de faisabilité et qualification .....</b>	<b>59</b>
1 Normes et spécifications .....	59

2 Règles de l'art .....	61
2.1 Étude du site .....	61
2.2 Travaux de génie civil .....	61
2.3 Pose proprement dite .....	62
2.3.1 Contraintes de cheminement .....	62
2.3.2 Contraintes de pose .....	62
3 Choix de la topologie .....	63
3.1 Étude de faisabilité .....	63
3.2 Scénarios de câblage .....	63
3.3 Conditions d'exploitation et maintenance .....	63
3.4 Tableau de décision .....	64
4 Contexte économique .....	64
4.1 Généralités .....	64
4.2 Pourquoi la fibre ? .....	64
4.3 Considérations économiques .....	65
5 Bilan de liaison .....	66
5.1 Définition .....	66
5.2 Choix du récepteur .....	67
5.3 Choix de la source .....	67
5.4 Choix de la fibre .....	67
5.5 Calcul des pertes .....	67
5.5.1 Pertes de couplage source-fibre .....	67
5.5.2 Pertes de couplage récepteur-fibre .....	68
5.5.3 Pertes dues aux connecteurs d'extrémité et aux épis- sures .....	68
5.5.4 Pertes dues au vieillissement .....	68
5.5.5 Marge de maintenance .....	68
5.5.6 Marge de fonctionnement .....	68
5.6 Validation du bilan de liaison .....	69
6 Qualification du système .....	69
6.1 Sélection technologique .....	69
6.2 Compatibilité physique .....	69
<b>Chapitre 6 Réalisation et recette .....</b>	<b>71</b>
1 Contraintes spécifiques d'installation et d'exploitation dans un site .....	71
2 Recette .....	72
2.1 Définition des cahiers de recette et essais (usine ou site) ..	72
2.2 Identification du matériel d'essai .....	72
2.3 Contrôles stipulés dans le cahier de recette .....	73
2.3.1 Fibres (avant câblage) .....	73

2.3.2 Câbles .....	74
2.3.3 Équipement .....	77
2.3.4 Concrétisation administrative de la recette .....	80
<b>Chapitre 7 Documentation et formation .....</b>	<b>81</b>
1 Documentation .....	81
1.1 Description fonctionnelle .....	81
1.2 Plans de câblage .....	82
1.3 Cahiers de recette .....	82
1.4 Description des composants .....	82
2 Formation .....	83
2.1 Formation système .....	83
2.2 Formation maintenance .....	83
<b>Chapitre 8 Exploitation et maintenance .....</b>	<b>85</b>
1 Fonction exploitation .....	85
2 Fonction maintenance .....	85
2.1 Maintenance préventive .....	86
2.2 Maintenance curative .....	86
Annexe 1 Glossaire .....	87
Annexe 2 Travaux de normalisation .....	91

# Avant-propos

Depuis quelques années, la fibre optique a été fortement introduite comme support de transmissions terrestres de données, d'images et même de la voix. Cette arrivée ne passe pas inaperçue et bon nombre d'articles paraissent à ce sujet dans la presse spécialisée.

Le taux de développement prévisible des réseaux de télécommunications laisse envisager une généralisation de l'utilisation de ce support, vecteur de la lumière et auréolé d'une image « High-Tech ».

Déjà, certains segments du marché sont pleinement occupés par les systèmes optiques : les transmissions à très haut débit, les réseaux locaux et métropolitains, les transmissions en milieu parasite... Cette poussée a d'ailleurs été favorisée par les efforts de normalisation tant au niveau des fibres que des composants connexes. Malgré cela, les technologies sur fibres optiques restent inconnues et parfois suspectées d'immaturation. Aussi, l'introduction dans l'entreprise pose-t-elle autant de problèmes techniques que psychologiques !

Ce document a pour vocation de répondre à bon nombre de questions que se pose un chef de projet chargé de l'étude et de la réalisation d'un réseau local sur fibres optiques. Il est le fruit des réflexions et des expériences d'ingénieurs, de spécialistes et de chefs de projet qui ont contribué à l'introduction des fibres optiques dans leur entreprise.

Nous y retrouvons les principales étapes de la conduite d'un projet à forte composante technique, depuis les choix d'architecture et de topologie, en passant par la description et les caractéristiques des composants des systèmes optiques, jusqu'à l'ingénierie, les recettes, la formation, l'exploitation et la maintenance, autant de composantes à ne pas négliger sous peine de manquer le rendez-vous de l'optique.

# Chapitre 1

## Introduction

### 1 GÉNÉRALITÉS

Le présent ouvrage a pour objet d'examiner sous ses différents aspects la mise en œuvre d'un réseau local en fibres optiques au niveau de sa conception, de sa réalisation et de son suivi.

Le terme « réseau local » sera ici employé pour désigner tout réseau localisé en un site borné et entièrement sous la responsabilité de l'utilisateur : il pourra donc s'appliquer aussi bien à un ensemble immobilier à usage de bureaux qu'à un site industriel ou même à un véhicule.

Lors de l'utilisation de ce livre, il conviendra donc de bien garder en mémoire le ou les critères principaux qui ont conduit au choix de la fibre optique comme support de transmission, et d'effectuer les corrections ou pondérations nécessitées par le domaine particulier d'application.

#### 1.1 Caractères spécifiques

Rappelons qu'en matière de transmission, on dispose de trois supports principaux : le fil métallique, le câble coaxial, et la fibre optique. Ces principaux supports dits « classiques » véhiculent le signal qui représente l'information sous la forme d'énergie électrique ou lumineuse.

Selon le support, on peut atteindre des niveaux de qualité très divers dans les quatre principaux domaines que sont :

- L'affaiblissement, avec pour corollaire la distance maximale entre deux éléments actifs du réseau.
- La bande passante.
- L'immunité contre les parasites.
- L'isolation galvanique.

## 2 Réseau local sur fibres optiques

Le choix du support s'exprimera généralement sous la forme d'une solution de compromis entre ces quatre domaines pour lesquels il peut être bon de situer les supports en valeur relative (Tableau 1.1) ; cette évaluation est essentiellement variable selon le type de transmission et le niveau de qualité du support choisi (écran, diamètre, isolant...).

Tableau 1.1.

	Paires métalliques	Câble coaxial	Fibre optique
Débits	faibles	forts	forts
Distances	courtes	moyennes	grandes
Immunité	faible	bonne	très bonne
Isolement galvanique	non	non	oui

Il convient enfin de préciser un indice relatif de coût de mise en œuvre de ces différents supports (Tableau 1.2).

Pour prendre en compte des capacités différentes offertes par ces supports, nous conviendrons que les valeurs ci-après correspondent au mètre de câble posé rapporté au kHz de bande passante, ou au kbit transmissible.

Tableau 1.2.

	Paires métalliques	Câble coaxial	Fibre optique
Coûts	forts	moyens	faibles

### 1.2 Domaines généraux d'application

Compte tenu de ce qui précède, on peut transposer ces caractéristiques techniques à un niveau plus fonctionnel et distinguer des domaines d'application privilégiés (Tableau 1.3).

On constate ainsi que le câble coaxial et la fibre présentent des similitudes et sont tous deux utilisés dans le cadre des réseaux dits à large bande ; précisons cependant que le câble coaxial est maintenant un support peu susceptible de développements véritablement novateurs et dont le coût baissera peu. La situation est totalement différente pour la fibre optique en pleine phase d'ascension dans tous les domaines (recherche fondamentale ou appliquée, technologie et techniques de fabrication, équipements d'extrémité...)

Tableau 1.3.

Type de réseau	Domaine d'application	
	Distribution	Transport
Bande étroite	PM (CA) (FO)	PM CA FO
Large bande	(PM) CA FO	-- (CA) FO

PM : Paires métalliques.

CA : Câble coaxial.

FO : Fibres optiques

( ) : Les parenthèses expriment l'utilisation possible mais non principale.

Comparée aux supports classiques, la fibre optique présente de plus en plus des caractéristiques bien particulières qui vont justifier son utilisation dans de nombreux domaines tels que les réseaux locaux industriels, la bureautique, les réseaux d'information ou de commande interne de véhicules.

En effet, la nature même du support impose un type de transmission fondamentalement différent de celui des autres supports : l'énergie porteuse du signal d'information est ici véhiculée sous sa forme lumineuse ; en première approche, l'interface cœur-gaine de la fibre constitue un guide pratiquement étanche qui conduit la lumière d'un bout à l'autre de la fibre, et ce dans des conditions d'affaiblissement et de confidentialité très favorables.

Comme toute technologie récente, les transmissions optiques restent un domaine très évolutif ; l'état actuel de la technologie des composants opto-électroniques n'autorise pas encore de traitement du signal optique aussi élaboré que celui d'un signal électrique quel qu'il soit, en particulier pour les fonctionnalités de multiplexage ou de commutation. Par suite, les différentes topologies de réseaux locaux classiques devront être adaptées à cette contrainte majeure ; plus simplement, on se trouve actuellement dans la quasi-impossibilité de recourir directement à certaines topologies sans transformer la nature de l'énergie.

D'une manière générale, le présent ouvrage assimile quasi systématiquement les réseaux sur support optique à de simples liaisons point à point. Cette démarche simplifie le raisonnement, mais ne limite aucunement l'application aux seuls « réseaux » point à point.

Par ailleurs, seuls seront examinés ici les aspects spécifiques directement liés au support de transmission optique, et nous n'aborderons que sous la forme d'un bref rappel les problèmes généraux de choix de réseau local.

## 2 PROPRIÉTÉS DES FIBRES OPTIQUES ET DOMAINES D'APPLICATION

Comme nous l'avons vu ci-avant, la fibre optique présente des caractères spécifiques directement liés à sa nature et qui vont déterminer ses domaines d'application. Nous allons examiner brièvement – et sans rechercher l'exhaustivité en ce qui concerne les exemples – ces différents domaines où la fibre est d'ores et déjà utilisée de manière opérationnelle.

### ● L'insensibilité aux parasites

Cette propriété est principalement utilisée dans tous les milieux industriels fortement perturbés comme les bancs d'essais du Centre Technique Renault, ou les tunnels de la RATP. L'insensibilité aux parasites permet en outre la cohabitation de câbles optiques non métalliques et de câbles d'énergie dans les conduites existantes. Le coût d'installation des fibres optiques peut s'en trouver considérablement réduit.

### ● Un haut degré de sécurité

Ce haut degré de sécurité se traduit par :

- Un isolement galvanique naturel du câble non métallique, très intéressant pour les raccordements entre bâtiments puisque cela évite l'interconnexion de terres différentes, et appréciable en matière de sécurité des personnes.
- Un câble intrinsèquement antidéflagrant.
- Des qualités anticomproission liées à l'absence de radiations électromagnétiques, et à la relative difficulté d'accès du support.

### ● Un très bon rapport performance/poids

Le très bon rapport performances/poids est réalisé par :

- Des encombrements et poids très faibles, pour un même besoin à couvrir, d'où des avantages annexes permettant des applications multiples :
  - plates-formes en mer (gain de plusieurs tonnes),
  - câblage des voitures de métro (gain appréciable).
- Des distances augmentées grâce à un affaiblissement linéique très petit, ce qui autorise des distances importantes sans élément actif intermédiaire, particulièrement apprécié dans les câblages de sites importants.
- Des débit et bande passante très élevés. Une fibre équivaut à plusieurs centaines de paires métalliques ; le câblage optique des rames de métro permet de passer de 100 km à 1 km seulement de longueur totale de câble.
- Une atténuation faible et largement indépendante de la fréquence : pour les fibres de silice, l'atténuation est dès aujourd'hui très faible et très proche de sa limite théorique ; elle reste constante dans la bande passante qui se situe dans la zone du gigahertz pour un kilomètre. Cela garantit la pérennité des investissements dans les installations utilisant ces fibres, aussi long-

temps que les applications n'exigeront pas de bandes passantes supérieures au gigahertz. Ces propriétés présentent un intérêt majeur dans le domaine du précâblage d'immeubles.

C'est souvent ce dernier critère qui justifiera le choix de la fibre, en particulier dans tous les domaines où un autre caractère très spécifique ne le justifie pas.

On ne peut citer, de manière exhaustive, tous les cas où la fibre optique trouve des applications, ne serait-ce qu'à l'intérieur même de systèmes informatiques, et parce que c'est souvent la réunion de plusieurs contraintes qui fera choisir la fibre plutôt qu'un autre support !

Enfin, les recherches techniques en cours, les efforts de normalisation et les baisses de coûts attendues ne pourront que conduire à un élargissement important de ces domaines encore restreints.

## Chapitre 2

# Architecture de réseau

### 1 GÉNÉRALITÉS

Avant d'examiner les différentes architectures de réseau possibles, il convient de préciser les incidences de l'utilisation de la fibre optique sur le choix d'une topologie.

Comme nous l'avons vu, les possibilités en matière de traitement du signal sous sa forme lumineuse se limitent aujourd'hui aux fonctions simples ou passives : il s'agit de dérivation ou de couplage en étoile ; les technologies actuelles des composants imposent très souvent une forte dissymétrie du plan de transmission entre les deux sens de transmission. Aussi, ces coupleurs ne seront-ils généralement utilisés qu'en mode unidirectionnel et pour des applications de dérivation (réalisation de bus) ou de diffusion 1 vers n (diffusion vidéo par exemple).

Pour tous les autres cas – où il est nécessaire de procéder à un traitement du signal – on transformera d'abord le signal lumineux en un signal électrique ; ainsi on trouvera, pour chaque liaison, immédiatement après l'éventuelle séparation optique des signaux émission et réception, un ensemble assurant la fonction de convertisseur optique/électrique.

Selon l'application transportée, le signal pourra être analogique ou numérique.

Par suite, et pour les aspects particuliers qui nous concernent ici, un réseau pourra être vu comme la somme de multiples tronçons élémentaires dont il faudra étudier séparément les conditions de réalisation. Dans la suite de l'ouvrage, et en particulier pour les chapitres 5 et suivants qui traitent de la mise en œuvre, on limitera donc le raisonnement à l'étude et la conception de liaisons simples.

sont dotés d'un système de « by-pass » optique pour pallier ce cas de panne du réseau.

Cette topologie a été envisagée pour le réseau 802.4 du bus à jeton, puis rejetée pour cette application. Elle est en cours d'évaluation pour le projet de norme IEEE 802.6 MAN (Metropolitan Area Network).

## 2.2 Anneau

La structure fermée de l'anneau et l'existence d'un sens de rotation des données permet en théorie d'utiliser une seule fibre entre les points du réseau.

Cependant, la défaillance d'un élément du réseau ouvre l'anneau et en provoque l'arrêt. Pour remédier à cela, une structure redondante à double anneau est réalisée (Fig. 2.2).

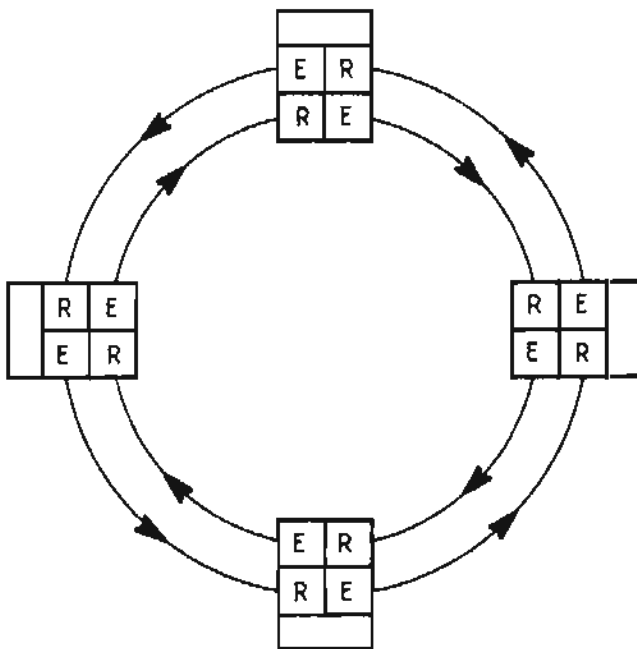


Figure 2.2.

La reconfiguration de l'anneau s'effectue par rebouclage en amont et en aval de la panne et confère à cette topologie une fiabilité certaine.

Le principal avantage de cette topologie en anneau est la possibilité d'utiliser des méthodes d'accès efficaces dites d'anneau à jeton ou à multijetons, telles que celles réalisées par les réseaux 802.5 à 4 et 16 Mbps, et FDDI à 100 Mbps.

## 2.3 Étoile

Dans le cas de l'étoile, les tronçons sont connectés à un point central appelé étoile, qui peut être soit active, soit passive (Fig. 2.3).

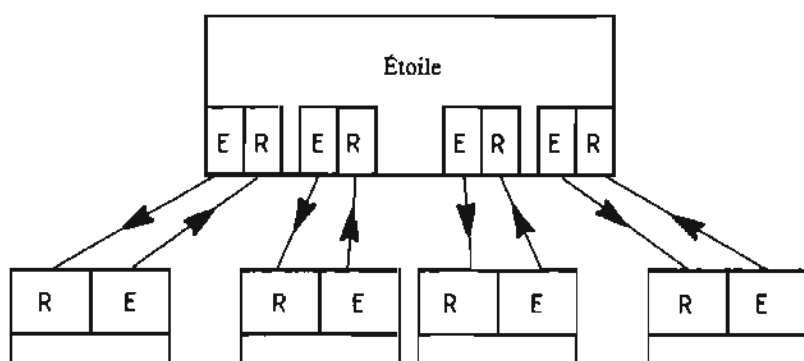


Figure 2.3.

Dans le cas d'une étoile passive, la puissance lumineuse est également distribuée dans toutes les branches de l'étoile. Cette distribution de la puissance lumineuse limite le nombre de branches de l'étoile, ainsi que la distance entre l'étoile et les points du réseau sans utilisation de répéteur.

Le caractère passif de l'étoile confère au réseau une grande fiabilité et un coût intéressant ; ses inconvénients majeurs sont la mise en œuvre initiale, les extensions de topologie nécessitant de recalculer des bilans de liaison précis, ainsi que les limites en distance et en nombre de branches.

Dans le cas d'une étoile active, le signal lumineux est répété dans chaque branche. Les limitations évoquées précédemment disparaissent. L'élément critique est en général l'alimentation électrique de l'étoile, dont la panne provoque un arrêt total de l'étoile. Certains produits proposent dès aujourd'hui une redondance active de l'alimentation. L'avantage principal provient de la conception modulaire des produits qui facilite la mise en œuvre, l'extension et la maintenance du réseau.

Dans certains cas, la coexistence d'étoiles actives et passives est possible, ainsi que la réalisation de hiérarchies d'étoiles.

Ces topologies en étoiles sont particulièrement exploitées par les réseaux locaux 802.3 et 802.4 à 10 Mbps car elles permettent une couverture géographique importante (plusieurs kilomètres de diamètre) et un grand nombre de points de connexion (plusieurs centaines).

## 2.4 Câblage multitopologie

Le câblage multitopologie consiste en la mise en place d'infrastructures de câbles multifibres telles qu'elles permettent, selon les nécessités et les opportunités, de réaliser par un simple jeu de brassage de cordons optiques les topologies en étoile, en anneau, ou en bus.

Le principe est identique à celui utilisé pour le précâblage en paires torsadées des immeubles de bureau.

Les infrastructures de câblages en étoile et en hiérarchie d'étoiles sont les mieux adaptées pour réaliser ces multitopologies.

# Chapitre 3

## Composants du système optique

### 1 COMPOSANTS PASSIFS

#### 1.1 Caractéristiques des fibres optiques

##### 1.1.1 Constitution des fibres optiques

Une fibre optique est une baguette très fine d'un matériau (verre de silice ou synthétique) étiré, dont l'aspect filiforme lui confère la souplesse. Le chapitre ne traitera que des fibres optiques en verre de silice en excluant les fibres plastiques en cours de développement.

D'une manière générale, elle est constituée d'un milieu diélectrique que l'on nomme le cœur. Celui-ci est recouvert d'un second milieu, nommé gaine, d'indice de réfraction inférieur à celui du cœur. La gaine elle-même est enrobée de couches de matériaux plastiques appelées revêtement, destinées à la protéger et à lui donner une résistance mécanique (Fig. 3.1, page 15).

En raison de la différence entre les indices du cœur et de la gaine et des lois de la propagation, un faisceau lumineux entré par une extrémité de la fibre subit ou non des réflexions à l'intérieur de la fibre et ressort ou pas par l'autre extrémité (Fig. 3.2, page 15).

La réunion des deux caractéristiques, souplesse et conduction de la lumière, est à la base de nombreuses applications.

##### 1.1.1.1 Structure d'une fibre

L'indice de réfraction  $n$  s'exprime par le rapport de la célérité de la lumière dans le vide  $c$  sur la célérité de la lumière dans le diélectrique  $v$  :

$$n = \frac{c}{v}$$

La valeur de l'indice est liée à la constante diélectrique. Elle est légèrement inférieure dans la gaine à ce qu'elle est dans le cœur. La propagation de la lumière dans les fibres optiques suit les lois de l'électromagnétisme (lois de Maxwell). Pour faciliter la compréhension, en optique géométrique, on assimile un mode à un rayon lumineux.

L'ouverture numérique, ou angle d'acceptance d'une fibre, souvent notée ON ou NA (Numerical Aperture) est l'angle maximal d'injection des rayons guidés dans la fibre (Fig. 3.3, page 16).

### 1.1.1.2 Différents types de fibres

On distingue deux sortes de fibres :

- les fibres multimodes à saut d'indice et à gradient d'indice,
- les fibres monomodes.

#### ● Fibres multimodes

Dans ces fibres, la dimension du cœur (50 à 600  $\mu\text{m}$ ) est grande devant la longueur d'onde du signal optique (autour de 1 micron). Ces fibres permettent la propagation de plusieurs centaines de modes.

Dans ces modes, la lumière suit des trajets qu'on peut représenter par des rayons, comme le montrent les figures 3.2 a et b.

#### *Fibre multimode à saut d'indice*

La fibre représentée sur la figure 3.2 a est dite à « saut d'indice » parce que l'indice de réfraction y change brusquement de valeur à l'interface cœur-gaine.

Il en résulte que tout rayon, dont l'inclinaison sur l'axe de la fibre est au plus égale à un certain angle critique, subit une réflexion totale sur cette interface.

Tout rayon dont l'inclinaison est supérieure à cet angle critique se réfléchit sur l'interface pour une part et, pour l'autre, la traverse.

Après de nombreuses réflexions partielles, l'énergie contenue dans les rayons de ce genre finit par se dissiper en dehors du cœur de la fibre. La propagation se fait par réflexions successives sur la rupture d'indice.

Les trajets que suivent les rayons le long de cette fibre à saut d'indice diffèrent de longueur selon leur inclinaison sur l'axe (Fig. 3.3, page 16).

#### *Fibre à gradient d'indice*

Dans ce type de fibre, l'indice de réfraction diminue du centre du cœur vers la périphérie selon une loi de variation très précise.

Le gradient d'indice modifie donc la vitesse de propagation de telle façon que les rayons les plus éloignés de l'axe soient les plus rapides (Fig. 3.2 b).

Il en résulte une égalisation de la durée des parcours des différents modes.

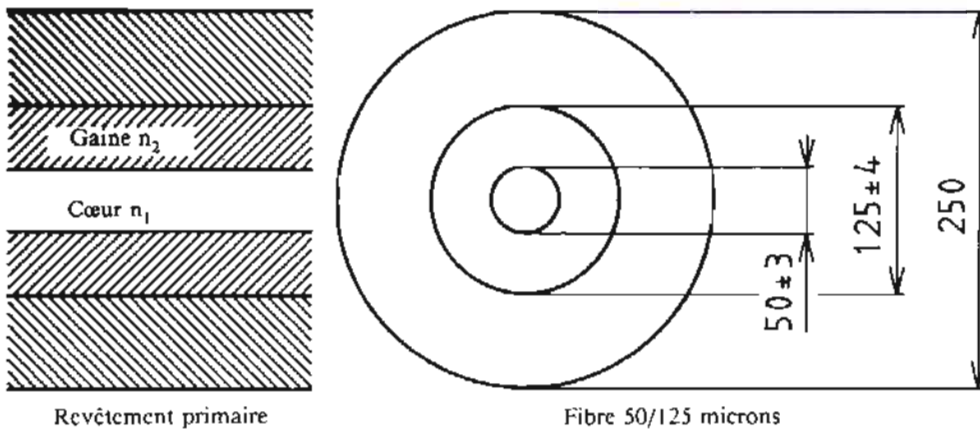


Figure 3.1 Coupes longitudinale et transversale d'une fibre ( $n_1 > n_2$ ).

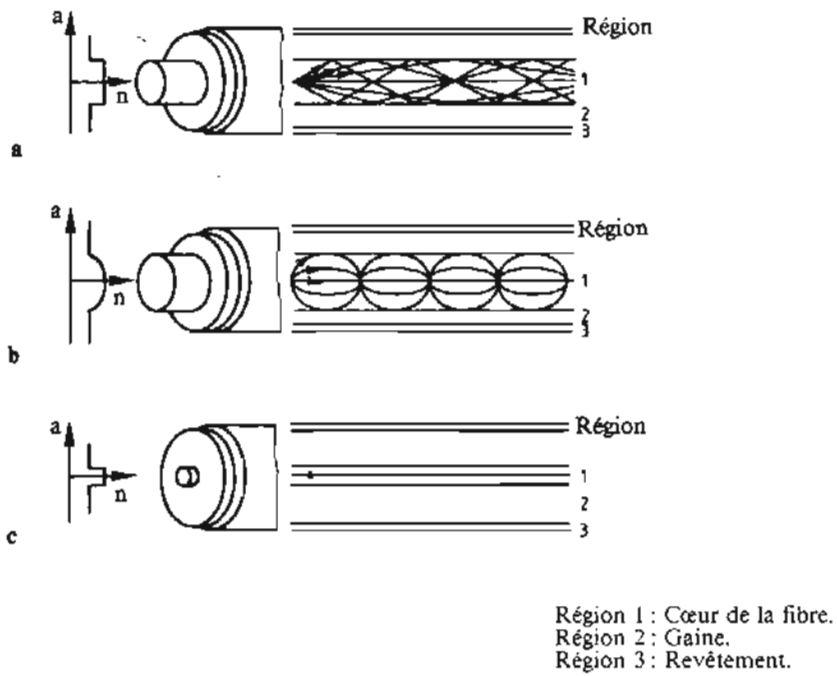


Figure 3.2 Variation de l'indice de réfraction  $n$  dans les trois principales fibres.

- a Fibre à saut d'indice.
- b Fibre à gradient d'indice.
- c Fibre monomode.

### ● Fibres monomodes

Dans ces fibres, la dimension du cœur (quelques  $\mu\text{m}$ ) est proche de la grandeur de la longueur d'onde d'utilisation et ne permet donc qu'un mode de propagation des rayons lumineux : suivant l'axe de la fibre (Fig. 3.2 c, page 15). Il n'y a donc pas de phénomène de dispersion des temps de propagation.

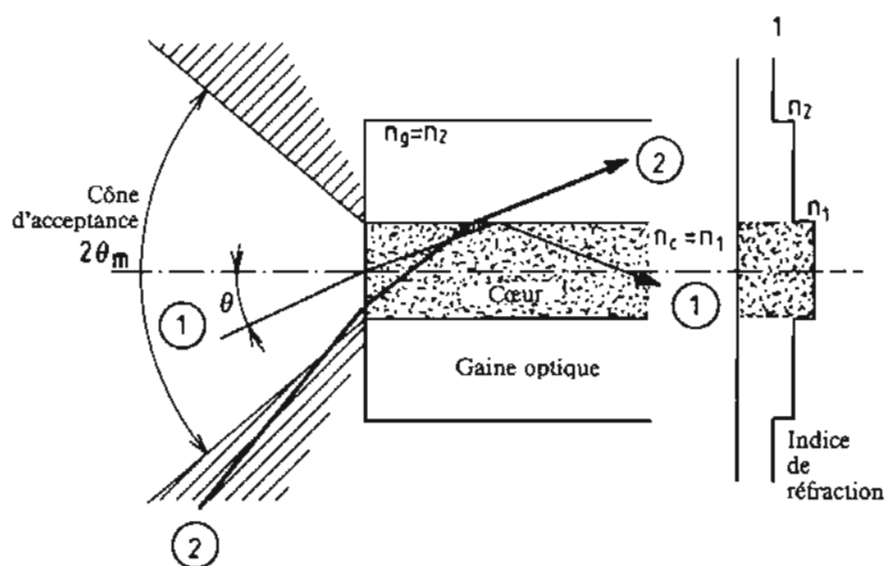
#### 1.1.2 Affaiblissement de transmission

Différents paramètres font que le signal lumineux subit un affaiblissement lors de sa propagation dans une fibre.

A, représentant les pertes, peut se décomposer en différents termes :

$$A = A_o + A_i$$

avec  $A_o$ , pertes dues au matériau et  $A_i$ , pertes dues aux imperfections du guide.  $A$  est exprimé en dB/km.



c = Cœur.

g = Gaine.

① = Rayon  $R_1$  guidé.

② = Rayon  $R_2$  perdu.

$$\text{ON} = \sin \theta_m = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1 \sqrt{2} (n_1 - n_2).$$

Figure 3.3 Trajet des rayons dans la fibre et indices de réfraction.

### 1.1.2.1 Pertes dues au matériau

#### ● Pertes par absorption

Elles sont dues à des phénomènes de résonance moléculaire, soit du réseau  $\text{SiO}_2$  lui-même, soit des impuretés piégées dans la fibre lors de sa fabrication. Ces absorptions correspondent principalement à :

- Une queue d'absorption infrarouge.
- Des pics d'ions hydroxydes  $\text{OH}^-$ .

#### ● Pertes par diffusion

Elles sont de deux types :

- Diffusion Rayleigh liée à la structure atomique de la silice et de ses dopants.
- Diffusion Mie occasionnée par des imperfections du verre (bulles et variations locales de l'indice de réfraction).

Les variations de ces pertes dues au matériau, en fonction de la longueur d'onde de la lumière utilisée, ont permis de définir trois fenêtres de transmission optimale dans le proche infrarouge :

- 1<sup>re</sup> fenêtre autour de  $0,8 \mu\text{m}$ .
- 2<sup>e</sup> fenêtre autour de  $1,3 \mu\text{m}$ .
- 3<sup>e</sup> fenêtre autour de  $1,55 \mu\text{m}$ .

### 1.1.2.2 Pertes dues aux imperfections du guide

#### ● Affaiblissement différentiel : pertes à longue période

On définit l'affaiblissement différentiel comme la différence entre l'affaiblissement d'un rayon incliné et celle d'un rayon axial.

Ces perturbations sont causées essentiellement par la variation de diamètre du cœur et la variation de l'ouverture numérique. C'est un paramètre non mesurable lors de la fabrication de la fibre.

Prenons l'exemple d'un tronçon de fibre dans lequel le diamètre du cœur diminue de  $1 \mu\text{m}$  sur une longue période (distance supérieure à  $10 \text{ cm}$ ). Ce phénomène se traduit par une augmentation de l'affaiblissement des modes d'ordre élevé (rayons très inclinés).

#### ● Couplage de modes : pertes à courte période

Ces perturbations sont causées essentiellement par des microcourbures de la fibre. Celles-ci entraînent des échanges d'énergie entre les différents modes (couplage de modes).

#### ● Longueur d'équilibre

En réalité, ces deux types d'imperfection vont se combiner. La répartition de l'énergie tend vers un équilibre stable au bout d'une certaine longueur (quelques dizaines de mètres à quelques centaines de mètres suivant le type de fibre) appelée « longueur d'équilibre ». Au-delà de cette longueur, la lumière se propage dans des conditions dites « d'équilibre de modes ».

En ce qui concerne l'affaiblissement, il n'a de sens que si l'on a dépassé la longueur d'équilibre et s'exprime en termes d'affaiblissement moyen (dB/km).

### 1.1.2.3 Causes diverses

Ces causes sont examinées dans le reste du livre, car elles ont pour origine les raccordements, la connectique, la fabrication et la pose des câbles.

### 1.1.3 Bande passante des fibres optiques

La bande passante d'une fibre optique, appelée par ailleurs réponse en bande de base, mesure la capacité de cette fibre à transmettre des informations. Sa limitation couramment admise est liée à la coupure à -6dB électrique (soit -3dB optique) du signal transmis.

En effet, la variation est de la forme :

$$B.L^{-a}$$

où B est la bande passante et L, la longueur de la fibre ;  $a \approx 1$  dans le cas de fibres sans mélange de modes et sans atténuation différentielle de mode ;  $a = 0,5$  pour un mélange rapide de modes. En réalité,  $a$  est à déterminer d'une manière empirique et se situe entre 0,5 et 1. Bien que sa connaissance soit importante, elle est rarement mesurée sur le site.

Le plus souvent, la bande passante est exprimée en mégahertz.kilomètre, étant implicitement entendu que  $a = 1$ , ce qui n'est généralement pas le cas.

Par ailleurs, la mesure sur une certaine longueur de fibre ne permet pas d'obtenir la valeur de la bande passante de n'importe quelle longueur de la même fibre. Plus l'ouverture numérique est faible, et plus la largeur de la bande passante est importante.

Trois facteurs principaux influent sur cette bande passante :

#### ● Dispersion modale

Comme nous l'avons vu précédemment, il existe entre les différents modes des différences de temps de propagation de sorte qu'ils se chevauchent partiellement à l'intérieur de la fibre optique. En optimisant la valeur de l'exposant paramétrique du gradient d'indice, on égalise presque parfaitement les vitesses de propagation des modes.

#### ● Dispersion due au matériau (ou dispersion chromatique)

Les sources optiques utilisées ont un spectre d'émission plus ou moins large et, du fait que l'indice de réfraction du verre varie en fonction de la longueur d'onde, il y a une dispersion incohérente dans la lumière.

#### ● Dispersion de guidage

Cette dispersion est à prendre en compte dans le cas de fibres monomodes.

### 1.1.4 Comparaison des fibres optiques

#### 1.1.4.1 Fibres multimodes à saut d'indice

Ce type de fibres optiques (Tableau 3.1) a une bande passante relativement faible (20, ..., 100 MHz) sur une longueur de 1 km et une atténuation importante (3, ..., 20 dB/km), mais il a l'avantage d'être bon marché, facile à connecter à une autre fibre optique et de permettre une transmission d'informations sûre sur des distances de l'ordre du km. Cette distance est en fait directement liée aux problèmes de bande passante et d'affaiblissement (exemple : la fibre 100/140 pour les réseaux informatiques).

#### 1.1.4.2 Fibres multimodes à gradient d'indice

Il existe actuellement plusieurs fibres (Tableau 3.1) :

- la fibre 50/125 désignée encore « fibre télécom » en Europe,
- la fibre 62,5/125 préconisée par IBM<sup>1</sup> pour les réseaux locaux,
- la fibre 85/125 pour les réseaux de vidéocommunication.

Elles conviennent donc à des transmissions à longue distance.

Tableau 3.1 Comparaison des différentes fibres optiques.

Caractéristique	Fibre multimode à saut d'indice	Fibre multimode à gradient d'indice	Fibre monomode
Diamètre du cœur	100 $\mu\text{m}$ < $\varnothing$ < 600 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$ < $\varnothing$ < 100 $\mu\text{m}$	8 à 10 $\mu\text{m}$
Diamètre de la gaine	140 $\mu\text{m}$ < $\varnothing$ < 1 000 $\mu\text{m}$	125 $\mu\text{m}$ < $\varnothing$ < 150 $\mu\text{m}$	125 $\mu\text{m}$
Indice du cœur	constant	décroit du centre à la périphérie	constant ou décroissant
Ouverture numérique	0,30	0.20 à 0.27	très faible ( $\approx 0$ )
Bande passante	20 à 100 MHz.km	200 à 1 200 MHz.km	> 10 GHz.km mais non significatif
Affaiblissement selon la fenêtre : 0,85 $\mu\text{m}$ 1,3 $\mu\text{m}$ 1,55 $\mu\text{m}$	3 à 20 dB/km	2,5 à 4 dB/km 0,6 à 1,5 dB/km	0,3 à 0,5 dB/km 0,156 à 0,3 dB/km

<sup>1</sup> Ainsi que par ATT et les principaux organismes de normalisation.

### 1.1.4.3 Fibres monomodes

Le cœur est si fin (diamètre de cœur : 8  $\mu\text{m}$  ; diamètre de gaine : 125  $\mu\text{m}$ ) que la transmission peut uniquement se faire en mode fondamental.

Les avantages sont notables : pas de dispersion modale et pertes de transmission insignifiantes (moins de 0,16 dB/km pour une longueur d'onde de 1 550 nm). En revanche, la connectique est plus délicate du fait du faible diamètre du cœur.

La bande passante atteignant quelque 10 GHz.km, la fibre monomode convient tout particulièrement aux transmissions sur de très grandes distances à bande passante élevée (Tableau 3.1, page 19).

## 1.2 Câbles à fibres optiques

Le comportement particulier de la fibre optique intervient pour beaucoup dans la conception d'un câble optique (Fig. 3.4).

En premier lieu, il convient de tenir compte de la grande sensibilité des fibres aux contraintes engendrées par des rayons de courbure ou de micro-courbure (voir 1.1.2).

La multiplication de ces contraintes dans un câble se traduira par une augmentation des pertes de transmission pouvant atteindre plusieurs décibels par kilomètre.

On s'efforcera de concevoir une structure modulaire qui permet de s'adapter à un maximum d'applications, dont l'encombrement et le poids seront les plus faibles possible, une structure facile à raccorder par des moyens fiables et industriels.

Les longueurs de câbles sur touret sont actuellement de 2 400 mètres et 1 200 mètres (recommandations PTT).

De nombreuses structures de câble ont été étudiées dans différents pays. Les causes principales de cette diversité de choix reposent essentiellement sur :

- L'analyse des paramètres qui permet de minimiser les pertes sur micro-courbures ou par courbures lors du câblage ou en exploitation. Cette analyse doit aussi prendre en compte les problèmes de coefficient de dilatation des matériaux employés, leur résistance mécanique (résistance à la traction, allongement), les incertitudes liées aux matériaux plastiques lors de leur transformation (extrusion, usinage, collage, formage, etc.) ou lors de leur emploi (fissuration, retrait, etc.).
- La gamme d'applications envisagée.

Les capacités des câbles peuvent être extrêmement diverses et il est clair que les problèmes posés aussi bien par les câbles que par les procédés de raccordement sont très différents.

Actuellement, et bien qu'une telle classification puisse apparaître arbitraire ou incomplète, il semble possible de classer les différentes structures en

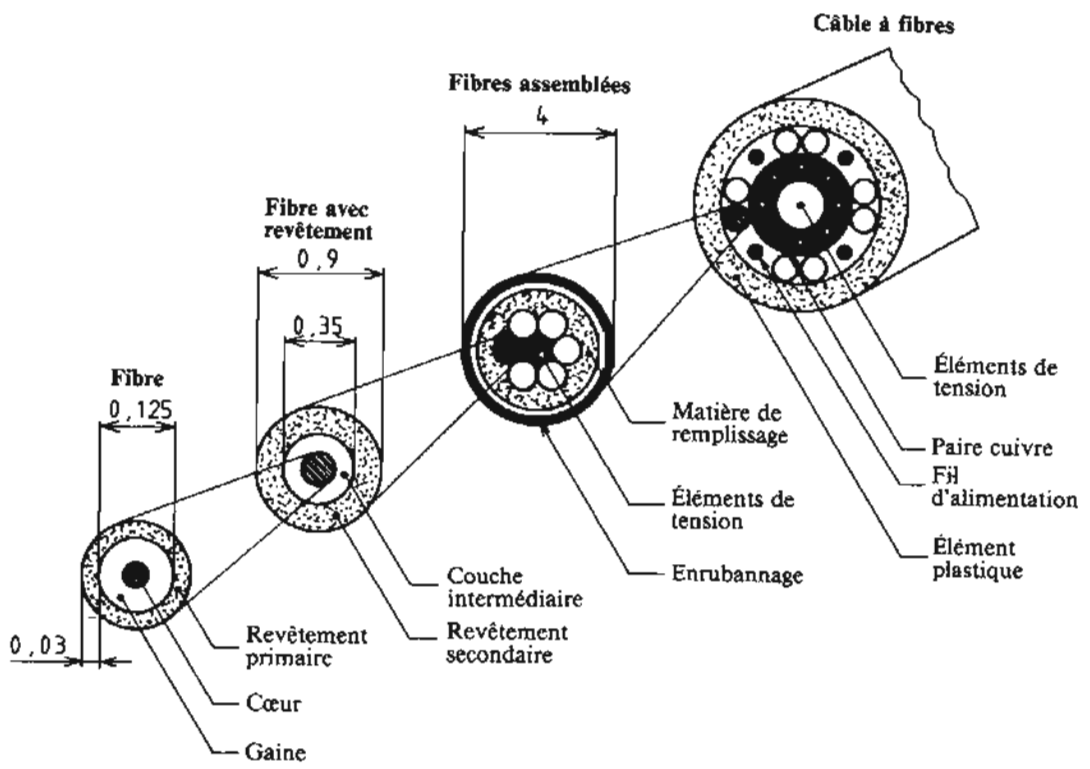


Figure 3.4 Différentes étapes de la réalisation d'un câble à fibres optiques.

deux grandes catégories en se référant à la nature des phénomènes induits dans le câble :

- Les structures à fibres dites « serrées » où la fibre est noyée dans une matière plastique dont le comportement a une influence sur le milieu de transmission.
- Les structures à fibres « libres » où le support alvéolaire doit avoir des caractéristiques bien déterminées pour éviter les phénomènes de courbures et de microcourbures.

### 1.2.1 Structures dites « serrées »

#### 1.2.1.1 Structures gainées assemblées

Ce type de câble est fondé sur le renforcement et la protection de la fibre par extrusion d'un gainage ou de plusieurs gainages plastiques avant assemblage soit par groupes (Fig. 3.5 et 3.6) soit par couches.

La fibre gainée a des propriétés mécaniques qui autorisent l'emploi des procédés traditionnels de câblerie : les fibres sont alors rassemblées autour d'un porteur central. Il est possible de disposer d'une ou plusieurs couches sur un seul porteur central ou de constituer un câble par assemblage ultérieur de plusieurs éléments.

La gaine extérieure définitive doit être conçue pour l'utilisation finale en réalisant les enveloppes nécessaires aux efforts envisagés.

La technique la plus développée actuellement est une technique double ou triple couche de gainage. L'aspect matériau des couches est fondamental pour l'obtention de faibles pertes additionnelles. De tels câbles sont des câbles robustes ne nécessitant pas de matériel spécial pour les fabriquer. Cependant, le processus d'assemblage est délicat et les pertes ajoutées au câblage peuvent atteindre 0,5 dB/km. L'encombrement de ce type de câblage devient important au-dessus de 30 fibres.

L'absence de modularité de la structure complique l'opération de raccordement en ligne (dégainage unitaire des fibres) et rend difficile l'utilisation d'un procédé global.

Les principaux avantages de ces fibres sont que :

- La fibre est très bien protégée et la résistance mécanique (traction, pression) est élevée.
- Les procédés et machines de fabrication sont bien connus.
- Leur stabilité en température est assez bonne.

Parmi les inconvénients, il faut noter :

- Un encombrement assez important, chaque fibre étant renforcée individuellement.
- Un coût de fabrication élevé à cause des reprises nécessaires.
- Un raccordement individuel des fibres avec dégainage préalable.

### 1.2.1.2 Structures rubans « serrés »

Des problèmes tels que le raccordement d'un grand nombre de fibres et la recherche de câbles de forte capacité ont amené les concepteurs de câbles à rechercher des structures compactes et ordonnées.

Une des solutions les plus spectaculaires consiste à réaliser des rubans les plus compacts possible et assembler ces rubans en une matrice de  $m \times n$  qui est ensuite torsadée pour permettre au câble de subir des courbures convenables (Fig. 3.7).

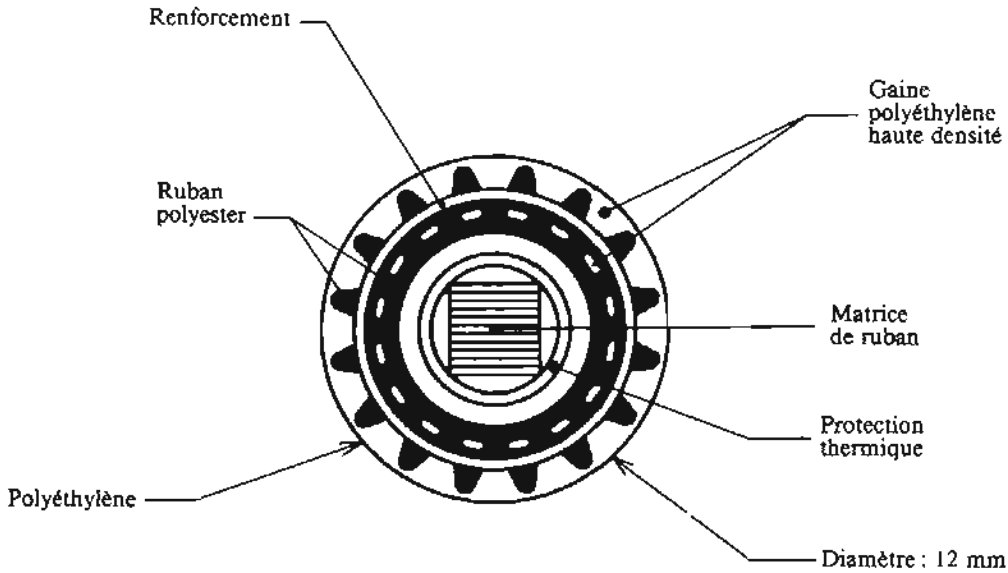


Figure 3.7 Structure rubans « serrés ».

Un ruban est constitué de la pose parallèle en  $n$  fibres, le pas entre fibres étant de quelques centaines de microns entre deux feuilles de matière plastique, elles-mêmes composées de deux couches ~ une de polyéthylène, à faible module d'élasticité qui, sous l'effet de la chaleur adhère aux fibres – et une couche de polyester à haut module d'élasticité qui fournit la rigidité de l'ensemble.

Les avantages d'une telle structure sont :

- La grande densité.
- La possibilité d'une connexion globale des  $m \times n$  fibres.
- Le coût réduit.

Parmi les inconvénients, il faut citer :

- Le risque de rupture des fibres lors de la fabrication.

- La mauvaise répartition des contraintes sur les fibres lorsque le câble est soumis à un effort.
- Les difficultés du raccordement de  $m \times n$  fibres simultanément.

Le choix des matériaux d'enrobage de la fibre et des rubans plastique, et le problème du procédé de câblage sont fondamentaux pour les pertes additionnelles au moment du câblage et en exploitation. L'autre aspect important est l'opération de torsadage de la matrice qui implique des contraintes variables sur les fibres en fonction de leur place dans celle-ci.

## 1.2.2 Structures à fibres libres (ou lâches)

### 1.2.2.1 Structures à tubes assemblés

Dans ces structures, les fibres revêtues d'un revêtement primaire de quelques microns ou de quelques dizaines de microns d'épaisseur sont placées libres dans un tube de matière plastique extrudée.

Elles sont ensuite assemblées (Fig. 3.8) par couche autour d'un porteur central dont le rôle est de donner à l'assemblage un comportement mécanique et thermique en rapport avec le degré de liberté de la fibre dans le tube.

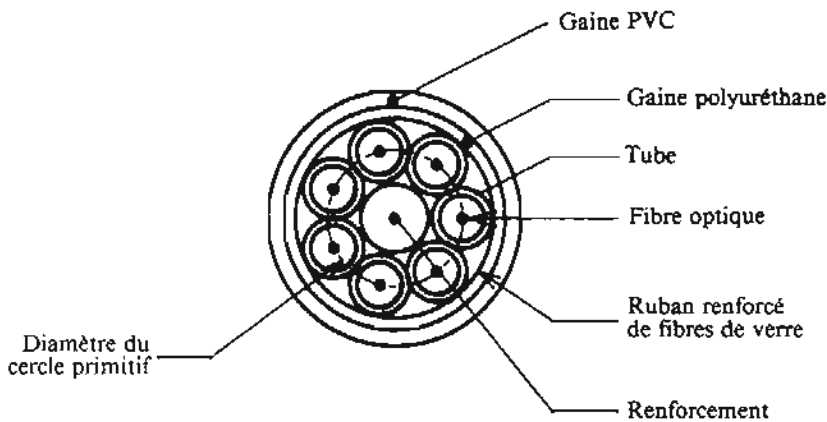


Figure 3.8 Structure à tubes assemblés.

La caractéristique principale de ce type de câble est en effet de donner à la fibre une possibilité de jeu, somme du jeu dans le tube et du jeu donné pour le pas d'assemblage autour du porteur.

L'atténuation de la fibre placée au câblage avec une sur-longueur moyenne de l'ordre de 0,3 à 0,8 % est ainsi stable tant qu'une élévation négative du câble (impression, effet de température, relaxation des matériaux) ne provoque pas de rayons de courbure pénalisant et tant qu'une élévation

positive du câble (traction, effet de température) ne provoque pas d'effets de microcourbure.

### 1.2.2.2 Structures rubans à fibres libres

L'élément de câblage est constitué par un ruban comportant cinq alvéoles de forme approximativement hexagonale (Fig. 3.9) ; le cercle inscrit de cet hexagone a un diamètre de 450  $\mu\text{m}$ .

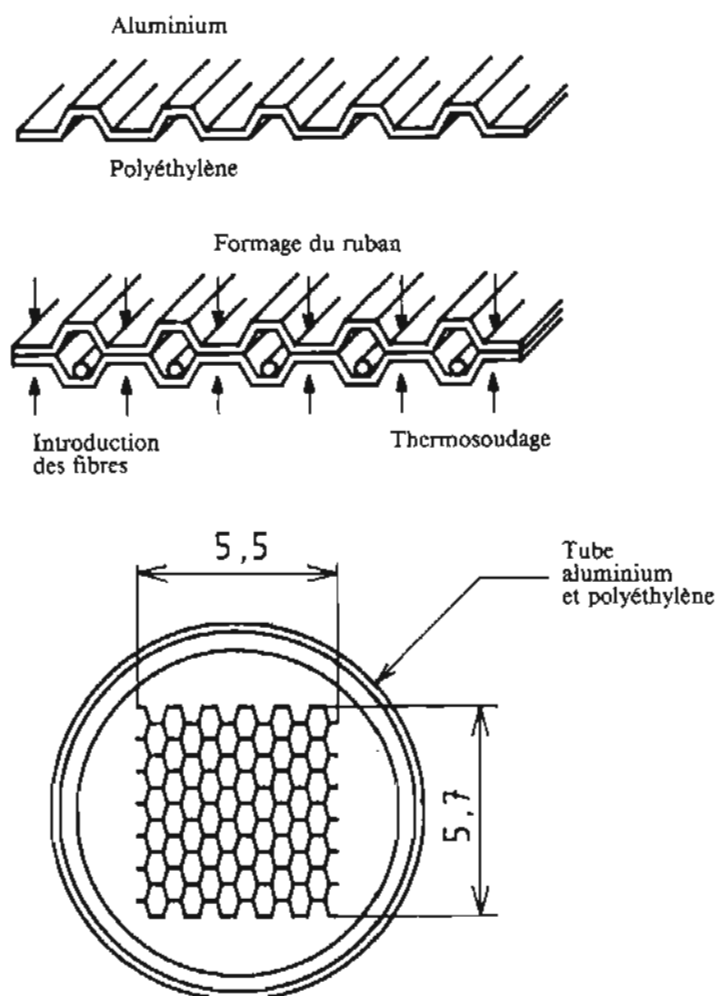


Figure 3.9 Coupe de câble à 50 fibres.

Les dimensions indiquées sont en mm ; le tube aluminium et polyéthylène a un diamètre de 14 mm.

Les rubans sont empilés par imbrication des creux dans les bosses à concurrence de 10 et recouverts de 2 rubans protecteurs.

Le câble d'une capacité de 50 fibres est complété par une enveloppe constituée d'une gaine d'aluminium soudée et d'une gaine polyéthylène haute densité.

Ce type de câble donne donc un degré de liberté à la fibre par le jeu dans l'alvéole, degré de liberté qui varie avec la place de la fibre dans la matrice après torsadage (analogie avec le câble ruban serré).

Les câbles réalisés à partir de rubans serrés enregistrent systématiquement une augmentation d'atténuation au câblage ainsi que des ruptures de fibres. C'est pourquoi un certain nombre de constructeurs préfèrent utiliser un ruban élémentaire lâche.

Les avantages que présente cette structure au niveau du poids, de l'encombrement, de la facilité de raccordement par un procédé d'épissurage de masse, sont contrebalancés par le comportement souvent instable de ce type de câble lorsqu'il est soumis à des contraintes mécaniques et thermiques.

### **1.2.2.3 Structures cylindriques rainurées**

La structure du type « cylindrique rainurée » a été développée à la suite d'une étude menée par le CNET à partir des critères de base suivants :

- Absence totale de pertes dues à la fabrication et à la pose avec recherche du comportement le plus stable possible lors de l'application des contraintes.
- Utilisation de fibres revêtues uniquement d'un revêtement primaire fin et résistant afin de faciliter l'épissurage et d'améliorer le coefficient de remplissage.
- Les rainures sont hélicoïdales continues ou alternées assurant ainsi un degré de liberté supplémentaire à la fibre et donnant un « câblage » direct de la fibre sans contrainte.

Toutefois, il faut mentionner l'obligation de manipuler des fibres sans revêtement secondaire et la fragilité des fibres situées au voisinage de la gaine extérieure du câble.

L'élément de câblage est constitué d'un jonc cylindrique rainuré (Fig. 3.10, page 28), dans lequel les fibres sont déposées sous tension avec une légère sur-longueur. Le jonc central est renforcé par un porteur central qui assure les qualités mécaniques et thermiques de l'ensemble (résistances à la traction et à la compression, pourcentage d'allongement et coefficient de dilatation).

Le câble complet peut être constitué soit d'un jonc, soit d'un assemblage de joncs par groupe.

La figure 3.11, page 28 représente un câble à 70 fibres et la figure 3.12, page 29, un câble à 1 000 fibres.

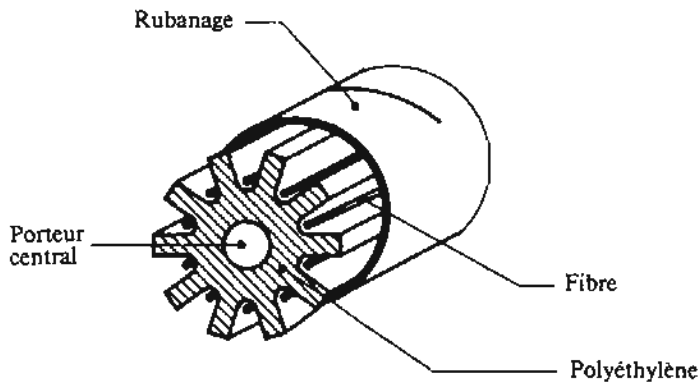


Figure 3.10 Câble à 10 fibres.

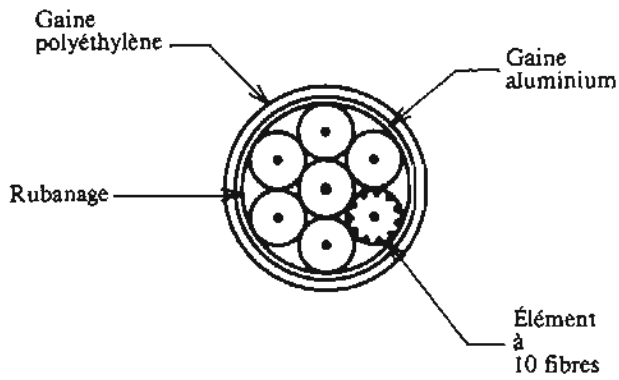


Figure 3.11 Câble à 70 fibres.

### 1.2.3 Performances des câbles

#### 1.2.3.1 Coefficient de remplissage des câbles

Le tableau 3.2 permet de comparer les coefficients de remplissage des différentes structures.

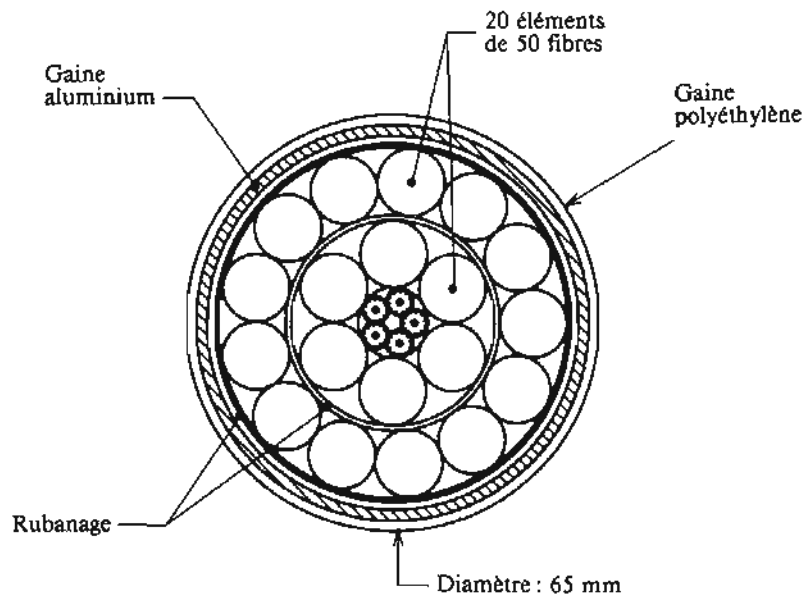


Figure 3.12 Câble à 1 000 fibres (structure cylindrique rainurée).

Tableau 3.2 Coefficient de remplissage des différentes structures de câbles à fibres optiques.

	Câbles existants			Nombre maximal de fibres ( $\varnothing_{ext} = 60$ mm)	Coefficient de remplissage ( $\varnothing_{ext} = 60$ mm maxi)
	$\varnothing_{ext}$	Nombre de fibres	Coefficient de remplissage ( $N/mm^2$ )		
Structure classique	18	19	0,07	120 à 140	0,046
Structure rubans serrés	12	144	1,27	1 200 à 1 400	0,46
Structure rubans à fibres libres	15	50	0,28	800 à 900	0,30
Structure cylindrique rainurée	20	70	0,22	900 à 1 000	0,34

### 1.2.3.2 Pertes ajoutées au câblage

Un bon câblage optique se caractérise par l'absence de pertes ajoutées au câblage.

L'analyse des résultats du tableau 3.3 montre que seuls les câbles à structures lâches sont actuellement capables de conserver l'atténuation moyenne des fibres.

**Tableau 3.3 Résultats publiés pour les différentes structures de câbles à fibres optiques.**

Structure	Valeur moyenne de l'atténuation de la fibre à la fabrication (dB/km)	Valeur moyenne de l'atténuation de la fibre dans le câble (dB/km)
Câble classique à fibres gainées (48 fibres)	2,8	2,9
Câble classique à fibres libres	3	3
Câble rubans à fibres libres	3,5	3,5
Câble rubans serrés 144 fibres	4,7	6*
Câble cylindrique rainuré	2,9	2,5**

\* Des contraintes sont apparues sur la fibre.

\*\* Au contraire, les contraintes existantes sur les bobines se sont libérées sur le câble.

### 1.2.3.3 Autres paramètres

Il convient aussi de comparer le comportement mécanique, le comportement thermique et la durée de vie des câbles.

Le comportement thermique des câbles à fibres optiques est très significatif de l'influence du procédé de câblage et du choix des matériaux. Il permet de révéler les contraintes néfastes au bon comportement de la fibre en transmission, de mettre en évidence de possibles effets de relaxation ou de vieillissement des matériaux, de connaître le degré de liberté des fibres dans le câble et donc d'en déduire le comportement thermique et mécanique en exploitation.

Quant aux performances mécaniques, on peut noter généralement qu'il est facile de réaliser des câbles à fibres optiques robustes résistant bien aux contraintes d'exploitation. Un allongement important, sans action sur la fibre, est permis par le degré de liberté des structures à fibres libres.

Compte tenu de la diversité des réalisations, il est difficile de résumer l'ensemble de l'activité sur les câbles à fibres optiques.

On peut cependant retenir qu'afin de minimiser les pertes par courbure et microcourbure, divers grands principes ont guidé la conception des câbles qui s'est ensuite diversifiée pour atteindre d'autres objectifs techniques et économiques.

Le résultat est un ensemble très disparate qui conduit à des écarts de performances optiques, mécaniques et thermiques assez sensibles.

## 1.3 Connectique

Les techniques mises en œuvre dans l'aboutement des fibres optiques ne sont industrialisées que depuis peu d'années. Des progrès restent à faire dans ce domaine ; on va cependant vers des performances et des coûts optimaux.

La liaison optique, formée de tronçons, peut être réalisée une fois pour toutes (caractère permanent) ou scindable à souhait (maintenance, reconfiguration).

La technologie s'adapte à ces cas de figure, en offrant des raccordements permanents par épissurage (soudure, collage) ou des dispositifs autorisant de multiples connexions et déconnexions (connecteurs, borniers).

Les techniques sont choisies en fonction de l'utilisation que l'on fait du réseau ; les performances concernent les pertes d'insertion et la souplesse d'emploi. Les raccordements permanents sont établis par épissurage sur des tronçons optiques, pour avoir la liaison d'un seul tenant ou dans les réparations, suite à une rupture de fibres. Connecteurs et borniers sont utilisés pour les liaisons semi-permanentes ou démontables. Les borniers peuvent être utilisés pour les réparations provisoires.

Dans tous les cas, il s'agit de mettre bout à bout deux cylindres en faisant coïncider leur axe et en rapprochant les faces le plus possible ; c'est l'enjeu du centrage géométrique assuré par différents types de raccordement.

Des normes internationales concernant les connecteurs sont en cours de mise au point. (cf. Annexe en fin d'ouvrage).

### 1.3.1 Centrage géométrique des fibres

Cette notion essentielle contribue à toute technologie de raccordement. En effet, abouter deux cylindres de quelques dizaines de microns relève de la haute précision, les ajustages se faisant au micron près !

#### ● Problèmes relatifs au raccordement

Les défauts de raccordement de deux fibres sont dus pour la majorité à :

- une mauvaise préparation des extrémités ;
- un écartement exagéré, couche d'air trop importante ;
- un désalignement axial, les fibres ne sont plus « face à face » ;
- une inclinaison axiale, les fibres formant un angle ;
- une différence d'ouverture numérique ;
- une différence de diamètre des cœurs.

#### ● Problèmes relatifs au câble optique et à la fibre

Actuellement, un même connecteur ne peut pas toujours convenir à tous les types de câbles utilisés (notamment ceux comportant des fibres de diamètres différents). Il faut des éléments mécaniques tels les ferrules aux

dimensions différentes. On comprend qu'à un connecteur donné il corresponde une référence, avec une série de sous-références concernant les options et variantes pour répondre aux besoins.

De plus, même dans le cas où le montage est « mécaniquement » réalisable, les performances ne sont pas toujours identiques ; un connecteur qualifié avec un câble peut très bien ne pas convenir à un autre type de câble.

Il est nécessaire, en attendant une normalisation dans ce domaine, de préciser le type de câble utilisé. Les caractéristiques suivantes seront indiquées :

- fiche technique d'identification du câble comportant notamment les indications du diamètre extérieur et les caractéristiques de la structure du câble intervenant pour l'amarrage du connecteur (fibre libre ou non, « porteurs », ...)
- fiche technique d'identification de la fibre, avec les caractéristiques géométriques du cœur, de la gaine optique, du revêtement externe ainsi que leur nature.

### ● Centrage des fibres

Des techniques semblent se dégager et répondre aux objectifs. Elles ont donné naissance à des connecteurs du commerce.

La fibre est montée dans une ferrule calibrée et maintenue par collage à l'intérieur. Les deux embouts ainsi réalisés sont maintenus face à face par l'intermédiaire d'un cylindre également calibré. Ce raccordement offre l'avantage d'être démontable mais nécessite une préparation délicate des embouts (Fig. 3.13).

La fibre est positionnée dans un vé calibré. Les extrémités des fibres sont tenues par l'intermédiaire de presseurs éventuellement amovibles, pour faciliter la déconnexion (Fig. 3.13).

La fibre est insérée a minima entre trois piges cylindriques calibrées. La fibre est centrée automatiquement si le cercle inscrit correspond à son diamètre externe. L'ensemble est solidarisé et constitue un embout. La connexion est effectuée en maintenant les deux embouts face à face, par exemple dans un tube calibré (Fig. 3.13).

La fibre est guidée par un équipage déformable, à deux degrés de liberté, selon un axe horizontal et un axe vertical. Les axes de déplacement du dispositif de centrage, perpendiculaires à la fibre, permettent d'aligner exactement le support par rapport au connecteur.

Une fois centrée, la fibre est collée au connecteur. Un micromètre mesure le polissage de l'embout, tandis que le centrage est vérifié par une lunette à réticule.

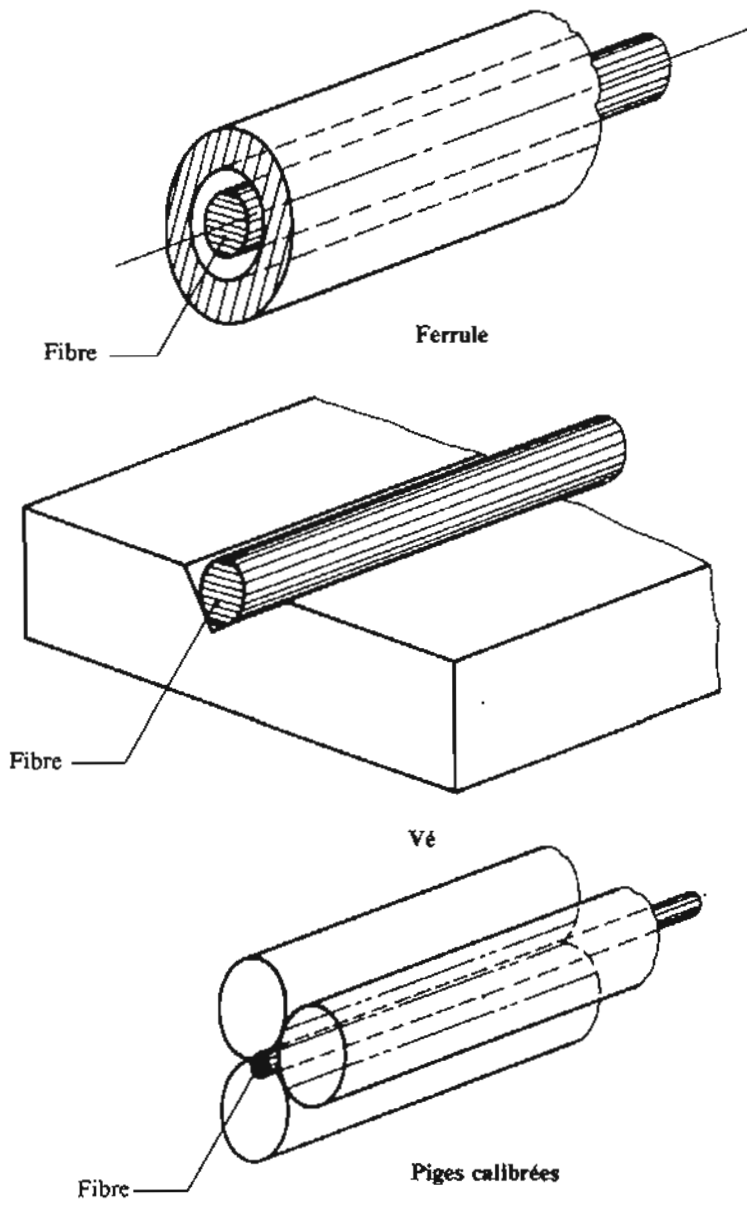


Figure 3.13 Méthodes de positionnement.

### 1.3.2 Raccordement permanent

L'épissurage réalise une jonction irréversible de deux fibres, d'une très haute qualité. Cette technique nécessite un appareillage plus ou moins sophistiqué et fait appel en général à un personnel spécialisé. On distingue deux variantes : fusion et collage.

#### 1.3.2.1 Épissure soudée

La méthode de jonction par fusion consiste à appliquer une source de chaleur localisée à l'interface entre deux extrémités de fibres mises bout à bout et préalablement alignées par un dispositif de guidage. Cette opération a pour effet de les rendre solidaires par fusion, à une température d'environ 2000 °C pendant une fraction de seconde.

Les techniques utilisées mettent en œuvre des chalumeaux, des arcs électriques ou des lasers. L'arc électrique est la source de chaleur la plus employée (échauffement uniforme, réglable et utilisable facilement sur chantier). Les chalumeaux peuvent entraîner une pollution de la jonction ; les lasers sont dangereux à manipuler. Les équipements sont onéreux et offrent pour la plupart les possibilités de positionnement automatique optimisant les flux transmis.

Ce type d'épissure garantit des performances inférieures à 0,3 dB selon les fibres et les matériels utilisés. L'absence de couche d'air entre les embouts y contribue fortement. Les raccordements sont individuels (fibre par fibre).

L'épissure elle-même et les longueurs de fibres adjacentes, du fait de leur fragilité, doivent être protégées contre les risques mécaniques (torsion, flexion, traction) et les risques d'environnement (humidité, poussières,...). L'utilisation de manchon thermorétractable renforcé par une tige en acier inoxydable est une technique performante lorsqu'elle est applicable.

#### 1.3.2.2 Raccordement par collage

Une fois le positionnement mécanique réalisé, l'on applique, au niveau des jonctions, une colle constituée souvent par une résine polymérisable par ultraviolet.

L'opération peut porter sur une ou plusieurs jonctions en même temps :

– Le collage individuel : les deux fibres sont collées par une résine polymérisable aux UV. Le matériel de mise en œuvre est simple et peu coûteux pour les fibres multimodes. Les performances sont remarquables : dans la majorité des cas, on obtient des affaiblissements de 0,3 dB en moyenne. Pour les monomodes, le coût des matériels reste du même ordre de grandeur que pour la fusion.

– Le collage global : le raccordement simultané de 10 fibres (cas du jonc rainuré) est possible. Cette technique implique un appareillage volumineux et cher. Les performances sont moyennes ; les affaiblissements sont compris entre 0,3 dB et 1 dB, voire plus.

Le collage, en général, présente des inconvénients de mise en œuvre à basse température (en dessous de zéro degré).

### 1.3.3 Raccordement démontable

Les opérations de connexion des câbles optiques sur les équipements de transmission, le brassage manuel des tronçons optiques dans un faisceau arrivée et un faisceau départ, la dérivation ou le changement de configuration, autant de manipulations qui requièrent une possibilité de connexion-déconnexion à la demande, avec une fiabilité, une reproductibilité dans le temps et dans l'espace des performances optiques.

L'offre est large : les qualités requises sont à adapter aux besoins. Une dispersion très grande des performances et des coûts, liée à des confort de fabrication et d'utilisation variables selon les connecteurs, demandent une vigilance particulière dans le choix des produits.

Parmi les raccords démontables, il existe deux grandes familles : les connecteurs et les borniers optiques.

#### 1.3.3.1 Connecteurs

Ces dispositifs installés en extrémité de liaison assurent la fonction de connexion-déconnexion. Ils peuvent être manœuvrés au cours de leur existence quelques centaines de fois. Les performances optiques des composants doivent être comprises dans une plage étroite pour assurer la reproductibilité du bilan optique des liaisons.

Deux types de composants sont les plus répandus sur le marché. L'un fait appel, pour sa mise en œuvre, à un transfert de précision entre l'outil de montage, l'embout du connecteur et la fibre. Son utilisation sur chantier, dans un environnement soumis à des vibrations, est délicat. Les performances d'affaiblissement vont de 0,4 dB à 0,6 dB.

L'autre type de connecteur utilise le centrage du cœur de la fibre en dynamique dans l'embout du connecteur. Le montage est beaucoup plus simple. Sur site, il s'adapte aux conditions sévères de l'environnement. Les valeurs d'affaiblissement se situent entre 0,1 dB et 0,3 dB, avec utilisation de liquide d'indice (0,4 à 0,8 dB sans liquide d'indice).

#### 1.3.3.2 Borniers optiques

On désigne sous cette appellation tous les composants permettant le raccordement des fibres à l'aide de dispositifs mécaniques alignant les deux fibres à raccorder en les maintenant bloquées. Ils peuvent être utilisés pour des réparations provisoires et faire l'objet d'une dizaine de manœuvres de connexion-déconnexion. L'utilisation d'un gel d'indice, parfois indispensable, améliore notablement les performances.

Dans l'ensemble, ces composants sont performants actuellement pour les fibres multimodes (affaiblissement inférieur à 0,5 dB). Leur mise en

œuvre est simple, peu onéreuse, et ne demande pas une compétence particulière. Il est toutefois important de nettoyer soigneusement les parties à raccorder pour obtenir de bonnes performances à chaque fois.

#### 1.3.4 Protection des raccordements et connexions d'extrémité

Les longueurs supplémentaires de fibre adjacente à l'épissure doivent être bobinées en dehors de l'épissure. Le logement doit fournir le support pour ces bobines et les épissures elles-mêmes, assurant qu'aucune partie de la fibre en dehors du câble n'est soumise à des efforts de flexion, de traction ou à des vibrations excessives. Pour éliminer la possibilité de rupture des fibres, aucune combinaison de circonstances ne doit permettre qu'une partie quelconque de la fibre soit soumise à une contrainte de traction qui, si elle est appliquée à l'endroit du défaut le plus important capable de supporter l'essai de traction du fabricant, donnerait lieu à une rupture au cours de la durée de vie théorique de la fibre.

En décidant du type et du positionnement des raccordements, les questions pratiques imposées par les opérations d'épissurage et de raccordement, c'est-à-dire temps, espace, protection du personnel, des équipements et des raccordements eux-mêmes, doivent également être prises en considération.

Les connexions d'extrémité seront habituellement situées dans les salles ou armoires d'équipements où l'environnement est favorable.

### 1.4 Coupleurs

Les fibres sont utilisées pour un mode de connexion point à point entre équipements. En revanche, les coupleurs offrent le mode de diffusion de l'information.

Les coupleurs sont des composants massifs qui mettent en relation  $n$  entrées avec  $m$  sorties.

Il existe divers types de coupleurs utilisant des techniques de fabrication différentes, dont quelques exemples sont donnés ici :

- méthode de juxtaposition de deux cœurs,
- méthode de polissage et assemblage,
- méthode de soudure et étirage,
- méthode avec mélangeur.

Les techniques de juxtaposition et de polissage sont principalement utilisées pour des coupleurs dissymétriques à une entrée et deux sorties, ou deux entrées et une sortie (Fig. 3.14 a et b).

Les techniques de fusion et de mélangeur permettent la réalisation de coupleurs symétriques à  $N$  entrées et  $N$  sorties travaillant en mode transmission du signal lumineux d'une voie d'entrée vers les  $N$  voies de sortie de

manière équitable (Fig. 3.15 a et b), ou en mode réflexion dans le cas du mélangeur avec paroi réfléchissante (Fig. 3.15 c).

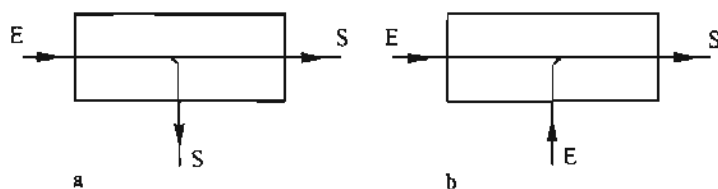


Figure 3.14 Coupleurs dissymétriques.

- a Dérivateur 1 entrée – 2 sorties.
- b Injecteur 2 entrées – 1 sortie.

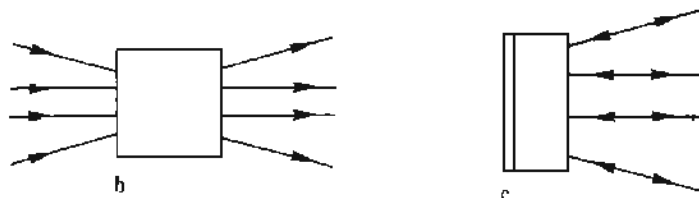
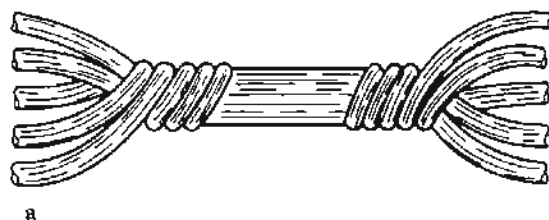


Figure 3.15 Coupleurs symétriques.

- a Coupleur de type fontaine lumineuse 5 entrées – 5 sorties.
- b Mélangeur en mode transmission 4 entrées – 4 sorties
- c Mélangeur à paroi réfléchissante 4 entrées – 4 sorties.

Pour le raccordement d'un coupleur à un réseau, il est important de connaître son bilan de pertes de puissance lumineuse. Dans le cas d'un coupleur étoile de type fontaine lumineuse, il correspond à l'équation suivante :

$$P = E + 10 \log N$$

où  $E$  est la perte propre du cœur de l'étoile (valeur indiquée par le fabricant), et  $N$  est le nombre de points de l'étoile.

L'affaiblissement du signal lumineux va donc limiter la portée des coupleurs dont la couverture en distance variera exponentiellement en fonction du nombre de points de l'étoile.

## 1.5 Caractéristiques des multiplexeurs-démultiplexeurs (« Muldex »)

Les multiplexeurs-démultiplexeurs optiques sont caractérisés par deux paramètres principaux :

### 1.5.1 Perte d'insertion

C'est le rapport entre la puissance optique disponible à la sortie du muldex et la puissance optique présente à l'entrée pour le canal considéré.

### 1.5.2 Diaphonie (ou plus exactement diaphotie)

Cette caractéristique définit la sélectivité du démultiplexeur au niveau du détecteur (rapport entre la puissance du signal perturbant et la puissance du signal utile).

Le niveau de diaphonie nécessaire dépend du type de modulation et du niveau de puissance émis par les sources.

Pour être inséré valablement dans une liaison, l'ensemble multiplexeur-démultiplexeur doit respecter les impératifs liés aux conditions d'exploitation. Il doit présenter :

- un faible affaiblissement d'insertion (quelques décibels) ;
- une faible diaphonie entre chaque voie ;
- une taille réduite ; l'encombrement doit être comparable à celui des composants opto-électroniques, la compacité doit permettre l'intégration du système dans les cartes électroniques ;
- la fiabilité ;
- une facilité de mise en œuvre ;
- et bien entendu, un coût attendu faible.

Devant l'intérêt de tels dispositifs, différents principes ont été étudiés et expérimentés.

A priori, la réalisation du multiplexeur est plus facile puisqu'il se réduit à une simple superposition, sur une même fibre, des énergies lumineuses

issues de différentes origines. En particulier, la technique des mélangeurs optiques a été appliquée pour multiplexer deux ondes. Les deux fibres émettrices de faible diamètre sont torsadées autour de la fibre de ligne et l'affaiblissement d'insertion obtenu est voisin de 1 dB.

La conception du démultiplexeur s'inspire largement des techniques d'analyse spectrale et nécessite l'utilisation d'éléments passifs présentant une réponse variable avec la longueur d'onde. Cette réponse peut prendre la forme d'une déviation géométrique du faisceau (prisme et réseau) ou d'une réflexion sélective (miroir dichroïque) (Fig. 3.16 et tableau 3.4, page 40). Généralement, les optiques nécessaires pour collimater le faisceau l'entrée et le localiser à la sortie du démultiplexeur sont des lentilles à gradient d'indice qui ont l'avantage de présenter de faibles aberrations.

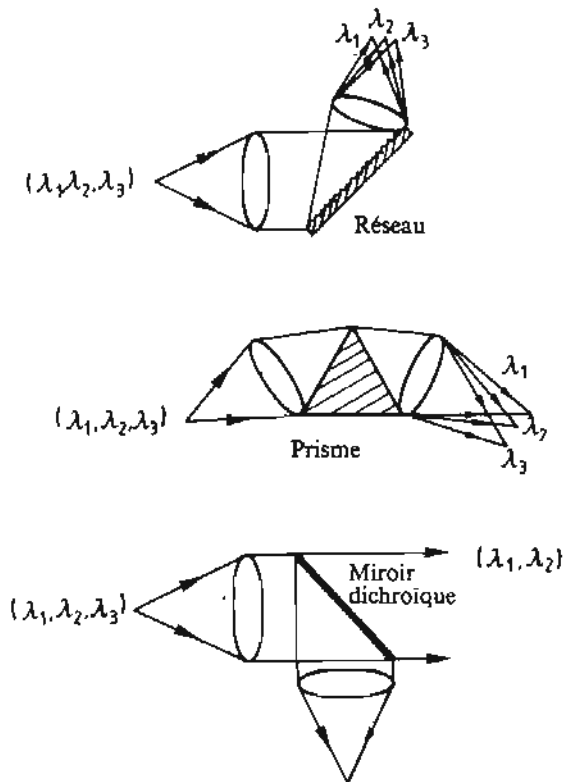





Figure 3.16 Principe des démultiplexeurs optiques.

Tableau 3.4 Comparaison des trois types de filtres optiques.

	Filtre optique	Perte optique	Nombre de voies	Coût	Difficulté de fabrication
Prisme		5 - 7 (3ch)	élevé	élevé	grande
Interférence		3 (3ch)	faible	faible	faible
Diffraction (réseau)		4	élevé	faible	faible

Remarquons que les démultiplexeurs décrits peuvent, en inversant le sens de propagation de la lumière, être utilisés en multiplexeurs.

Ce point est important, car il permet de réduire le nombre d'éléments différents à développer, ce qui va dans le sens d'une diminution des coûts de fabrication.

## 1.6 Atténuateurs

Il existe deux sortes d'atténuateurs : les atténuateurs fixes et les atténuateurs variables.

### 1.6.1 Atténuateurs fixes

Ils sont utilisés sur les liaisons opérationnelles lorsque la puissance reçue sur le photodétecteur est trop forte et sature ce dernier.

Leur réalisation fait appel à plusieurs procédés ; le plus simple consiste à écartier plus ou moins les deux embouts dans le raccord à l'aide de bagues. Une autre technique est le polissage en biais des embouts. Les valeurs d'atténuation peuvent être ajustées, dans une certaine limite, selon le positionnement, la force de serrage.

### 1.6.2 Atténuateurs variables

Beaucoup plus volumineux que les précédents, ils sont employés essentiellement dans le domaine de la métrologie et en laboratoire.

Chaque constructeur a sa technique de fabrication. A titre d'exemple, on peut en citer deux :

- La première technique consiste à déplacer, entre deux embouts, une lame de verre à affaiblissement progressif.
- La deuxième technique permet d'obtenir des atténuations variables en insérant entre les deux embouts un nombre variable de disques de verre ayant chacun un affaiblissement fixe. Avec ce type d'atténuation, on obtient des variations par bond alors qu'avec le précédent, on obtient une variation continue.

## 2 COMPOSANTS ACTIFS

### 2.1 Émetteurs

L'émetteur optique est un composant semi-conducteur dont la puissance optique émise est directement modulable par le courant d'injection et dont la surface émissive est compatible avec les dimensions de la fibre.

L'émission optique est générée dans des jonctions p-n polarisées en direct et réalisées dans des alliages à base d'arséniure de gallium pour lesquels les porteurs injectés à travers la jonction ont la propriété d'associer un rayonnement à leur recombinaison avec les porteurs majoritaires.

Les première et deuxième fenêtres de faible atténuation des fibres optiques (0,8  $\mu\text{m}$  et 1,3  $\mu\text{m}$ ) sont couvertes par des composants qui sont largement industrialisés et dont la fiabilité a été prouvée, à l'opposé des composants de la troisième fenêtre (de 1,55  $\mu\text{m}$ ).

### 2.1.1 Diodes électroluminescentes (DEL)

L'émission optique est de nature spontanée ou incohérente. La puissance injectée dans la fibre dépend de la puissance disponible de la source et du carré de l'ouverture numérique de la fibre :

$$P_i = f (P_s \times \text{ON}^2)$$

Pour  $\text{ON} = 0,153$ , on obtient une puissance injectée  $P_i$  entre - 16 dB et - 20 dB.

La caractéristique puissance émise/courant à travers la jonction est assez linéaire jusqu'à des courants de 100 mA, ensuite on observe une saturation due à l'échauffement.

#### ● Facilité d'emploi

Elle est grande car il n'y a pas de seuil, donc pas de circuit série spécifique.

En outre, le composant est stable en température.

#### ● Domaine d'application

La puissance injectée dans une fibre dépend essentiellement des caractéristiques des diodes et des fibres, mais elle est relativement faible. Elle peut aller de 10 W pour une fibre télécom, par exemple à 500 W pour une fibre à applications industrielles.

De plus, le rendement de couplage avec les fibres est assez médiocre (quelques %). Pour faciliter le couplage et l'installation de la diode, les constructeurs l'équipent d'une fibre amorce (« queue de cochon ») de la même famille que celle utilisée dans le câble de la ligne à une extrémité, la fibre amorce est collée ou maintenue mécaniquement très près de la surface active ; à l'autre elle est insérée dans un embout de connecteur et prête à être raccordée à la fibre de la ligne. Certains fabricants placent la diode émettrice directement contre le connecteur optique, ce qui permet d'éviter l'utilisation de la fibre amorce car dans ce cas la diode émet directement dans le connecteur.

La modulation par un signal électrique est aisée : elle se fait en superposant le courant de signal au courant de polarisation. La vitesse de modulation est limitée par la capacité de la jonction et par le temps de recombinaison

des porteurs. Actuellement, dans les meilleurs cas, on obtient des bandes de 200 MHz.

La grande largeur spectrale des diodes électroluminescentes (DEL) ne crée pas de bruit modal. Pour les longueurs d'onde comprises entre 700 et 900 nm, les diodes au silicium font parfaitement l'affaire. Pour les longueurs d'onde comprises entre 1110 et 1500 nm, on se trouve dans l'obligation de mettre en œuvre des diodes d'arséniure à émission latérale. Ce type de DEL permet de coupler environ deux fois plus de puissance.

Les DEL réalisent un compromis puissance émise – bande passante obtenu par diverses techniques de dopage et de réalisation de la couche active. Du fait du type de lumière émise (incohérente), la dispersion spectrale est importante. Il est donc nécessaire d'utiliser une mini-optique qui rendra parallèle le faisceau lumineux pour l'injecter dans la fibre.

● **Fiabilité**

Elle est excellente et une durée de vie d'un million d'heures est courante.

● **Coût**

Il varie suivant les performances mais reste bien en dessous de celui de la diode laser.

### 2.1.2 Diodes laser

C'est la recombinaison des paires électron-trou, dite stimulée, qui se produit à l'intérieur d'une cavité optique résonante. Il en résulte que le spectre d'émission est étroit (purement monochromatique pour les lasers monomodes) et qu'un laser émet de la lumière par deux faces opposées, suivant un diagramme directif qui permet un couplage efficace dans une fibre optique.

En émission spontanée, cas de la diode électroluminescente, la génération des photons s'effectue de façon individuelle indépendamment des émissions voisines. En émission stimulée, cas de la diode laser, la radiation est déclenchée par un photon voisin et les deux photons présents sont en phase et déclenchent d'autres émissions synchrones ; il y a effet multiplicatif ou apparition de gain.

● **Facilité d'emploi**

La diode n'émet de la lumière stimulée que lorsque le courant injecté a dépassé un courant de seuil spécifique à chaque type de diode laser. Le courant de seuil varie selon la température et dans le temps, il faut donc adjoindre à la diode laser un dispositif qui asservit les évolutions de ce courant de seuil. Il est donc nécessaire de stabiliser la température du laser.

On fait appel à des circuits de réaction pour comparer une fraction de la lumière injectée dans la fibre à un signal de référence (Fig. 3.17, page 44).

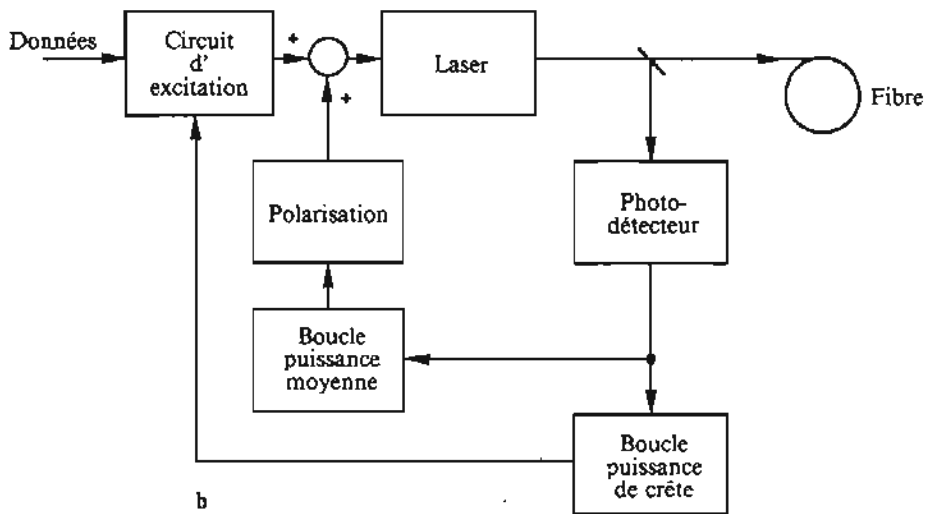
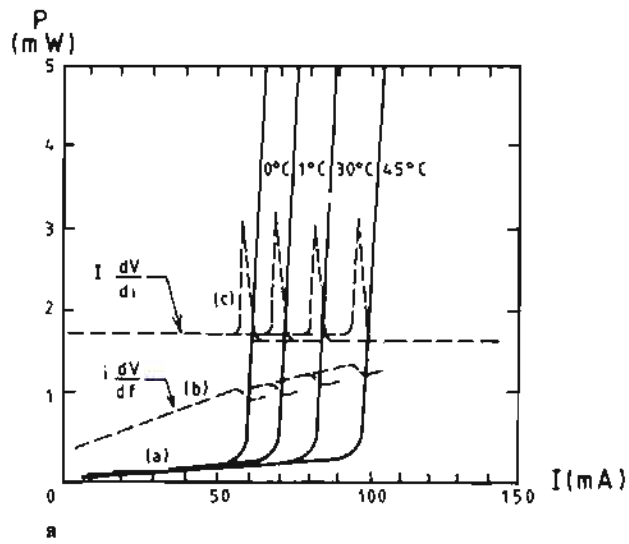


Figure 3.17.

- a Caractéristique Puissance lumineuse émise  $P$  – Courant laser  $I$ .  
 b Schéma de principe de la commande automatique de gain d'un laser.

La disposition la plus simple consiste à maintenir constante la puissance optique moyenne en réglant le niveau de polarisation : il ne faut pour cela qu'une boucle à courant continu.

### ● **Domaine d'application**

En raison du type de lumière (cohérent) qu'elles génèrent, les diodes laser peuvent se passer de tout dispositif de collimatage. Comme ce sont des sources à très haute radiance, elles permettent d'injecter une grande partie de la puissance émise dans tous les types de fibre, c'est-à-dire plusieurs milliwatts dans une fibre « télécom » classique (ouverture de 0,18 et diamètre de cœur de 50  $\mu$ m).

Les diodes laser fonctionnent parfaitement à 800, ..., 900 nm et 1300, ..., 1500 nm, et la fréquence de modulation peut atteindre 1 GHz.

Bien que le laser fonctionne mieux en « tout ou rien », il est possible d'utiliser ce composant dans des systèmes analogiques où une grande linéarité est requise. Un taux de deuxième harmonique de - 50 dB est possible, ce qui permet de couvrir la plupart des besoins de transmission vidéo par exemple.

Le fonctionnement des diodes laser peut être une source de bruit (oscillations spontanées, bruit de la rétroaction, bruit modal, bruit de partition) dans certains systèmes de transmission optique : liaisons analogiques à large bande, liaisons numériques à très haut débit, liaisons monomodes à grande distance.

### ● **Fiabilité**

Elle augmente régulièrement et une durée de vie de 100 000 heures devient chose commune.

### ● **Coût**

Il reste élevé si l'on considère les dispositifs associés.

## **2.1.3 Paramètres typiques de sources optiques à semi-conducteur**

Ils sont résumés dans les tableaux 3.5 et 3.6 page 46 et dans les figures 3.18 et 3.19 page 47.

## **2.2 Récepteurs**

Le récepteur optique est un photodétecteur qui convertit la puissance optique incidente en courant électrique.

En effet, dans certains matériaux exposés à un rayonnement d'énergie, il y a création de paires électron-trou (mobiles) par augmentation du niveau d'énergie des électrons des couches supérieures de la bande de valence à la bande de conduction.

Tableau 3.5.

Paramètre	DEL 1 <sup>re</sup> fenêtre	Diode laser 1 <sup>re</sup> fenêtre	DEL 2 <sup>e</sup> fenêtre	Diode laser 2 <sup>e</sup> fenêtre
Puissance de crête injectée dans la fibre (mW) (cœur : 50 $\mu\text{m}$ ; ouverture numérique : 0,2)	0,05 ou plus	1 ou plus	0,05	1
Courant de seuil (mA)	–	50 à 100	–	100 à 200
Maximum à mi-largeur de la raie (nm)	30 à 50	2 à 5	60 à 120	10
Largeur de bande électrique (MHz) à – 6 dB (soit – 3 dB optique)	50	200 ou plus	50 à 100	200 ou plus
Application typique	Jusqu'à 50 Mb/s	Jusqu'à 1 Gb/s	Jusqu'à 200 Mb/s	Jusqu'à 1 Gb/s

Tableau 3.6 Propriétés des DEL et des diodes laser fonctionnant en régime continu.

Paramètre		DEL	Diodes laser
Relation entre courant et puissance émise		Approximativement linéaire	Non linéaire (courant de seuil)
Puissance maximale		Quelques centaines de $\mu\text{W}$	1 à quelques mW
Efficacité du couplage dans une fibre	Surface émissive	Quelques centaines de $\mu\text{m}^2$ (émission de surface) Quelques dizaines de $\mu\text{m}^2$ (émission latérale)	Quelques $\mu\text{m}^2$
	Diagramme de rayonnement	Omnidirectionnel (émission de surface : diagramme lambertien)	Directif : $10^\circ \times (30^\circ \text{ à } 50^\circ)$
Largeur du spectre d'émission		40 nm (GaAlAs) 60 à 100 nm (InGaAsP)	0,2 à 3 nm (multimode) 0,1 nm (monomode)
Fréquence maximale de modulation		50 MHz (émission de surface) 200 MHz (émission latérale)	Plusieurs centaines de MHz à quelques GHz
Sensibilité à la température		Moyenne	Forte (GaAlAs) ou très forte (InGaAsP)
Mécanismes de dégradation		Propagation de centres non radiatifs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Idem DEL</li> <li>• Faces d'émission</li> <li>• Contact sur dissipateur thermique</li> </ul>
Durée de vie (valeurs extrapolées)		Supérieure à $10^6$ heures	$10^4$ à $10^5$ heures (GaAlAs) en amélioration

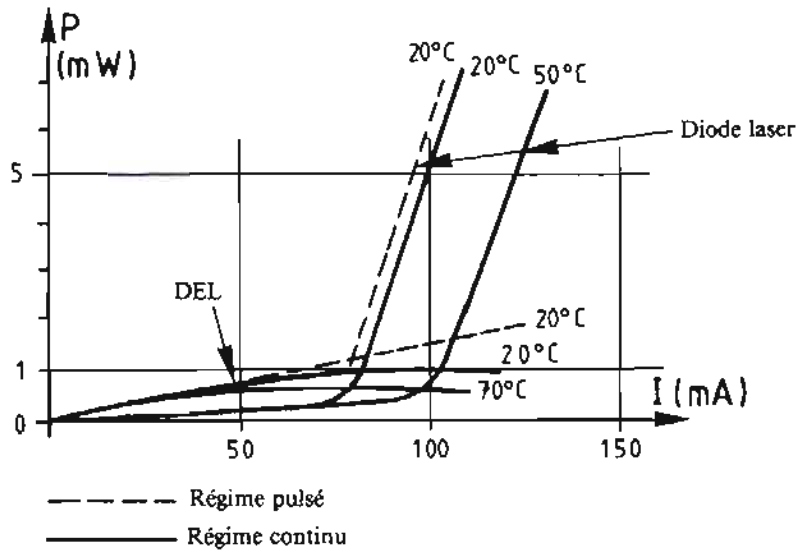


Figure 3.18 Diagramme de la puissance optique  $P$ .

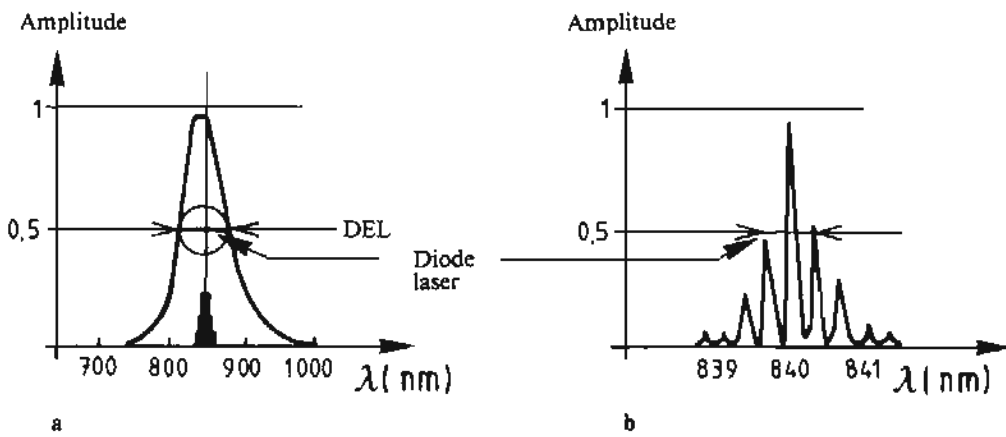


Figure 3.19.

- a Caractéristiques typiques des diodes laser 800 et DEL.
- b Grossissement de la caractéristique de la diode laser 800.

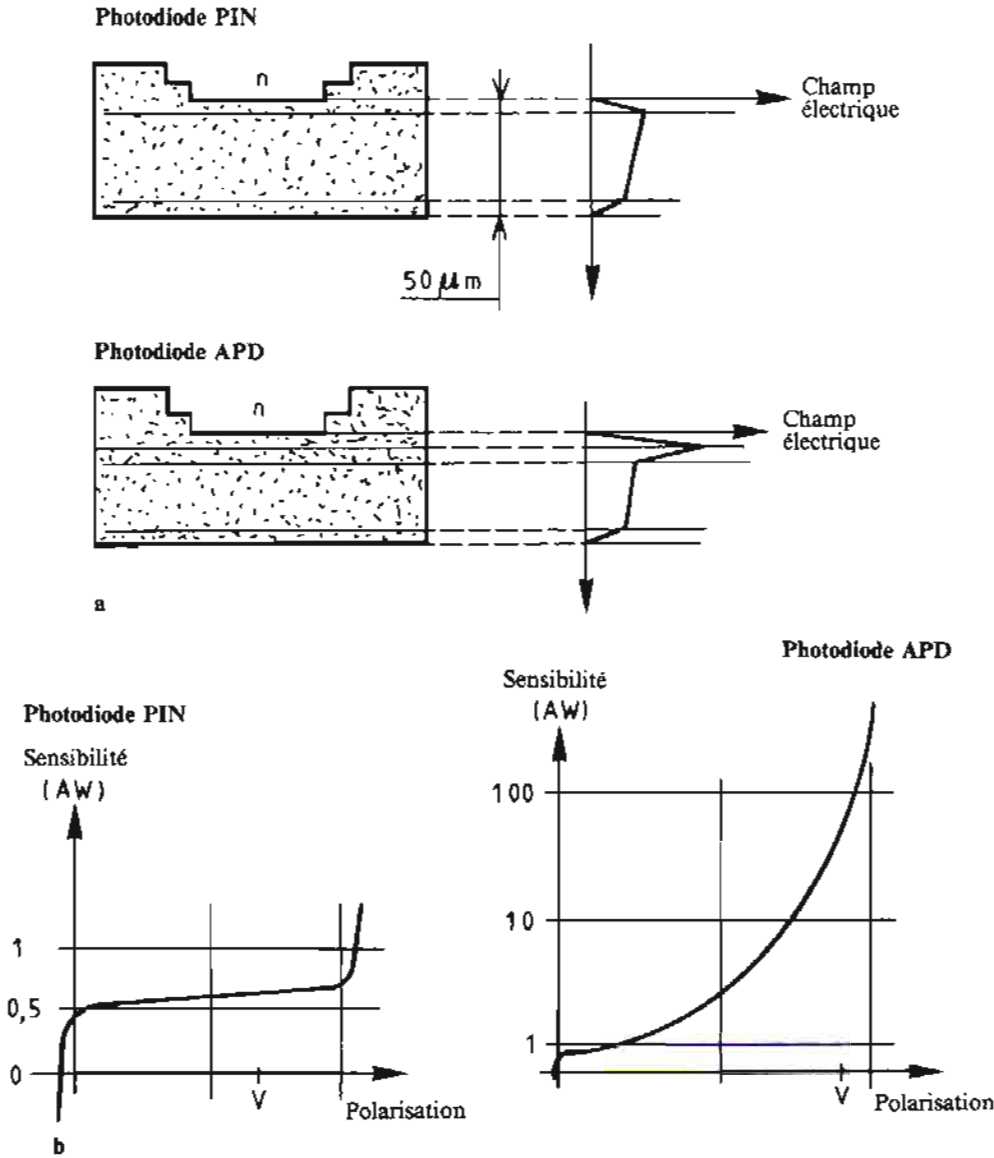


Figure 3.20.

- a Variation du champ électrique en fonction de la localisation dans les photodiodes PIN et APD.
- b Caractéristique des photodiodes. Pour la photodiode PIN,  $V \approx 10-15$  volts ; pour les photodiodes APD au silicium ( $\lambda = 0,8 \mu\text{m}$ ),  $V = 200$  volts ; pour les photodiodes APD au germanium ( $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$ ),  $V = 15$  volts.

Cette paire électron-trou dissociée par un champ électrique produit un courant de déplacement. Ce processus est réalisé dans les jonctions p-n polarisées en inverse, soit avec un effet multiplicatif, photodiodes à avalanche (APD), soit sans effet multiplicatif, photodiodes PIN (Fig. 3.20).

### 2.2.1 Photodiodes PIN

#### ● Principe

On crée entre les régions p et n fortement dopées une région déplétée (pas ou peu de charges mobiles) en choisissant un matériau faiblement dopé et en appliquant un champ élevé (Fig. 3.21).

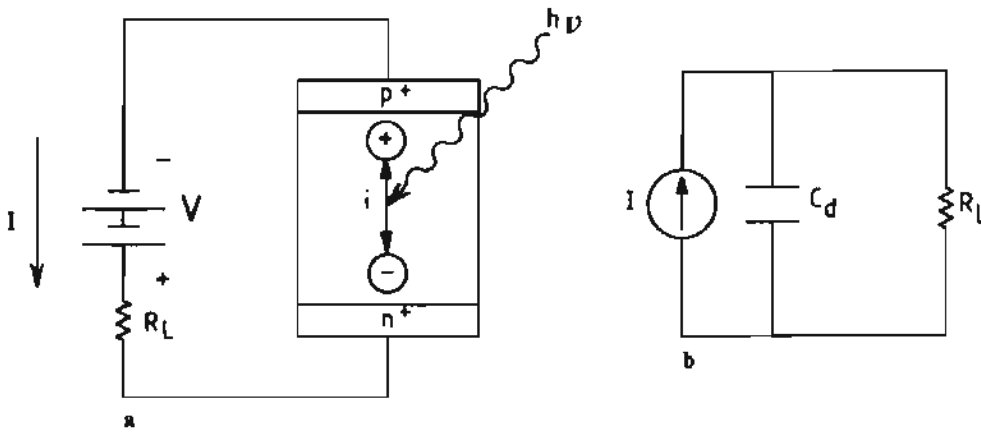


Figure 3.21.

- a Représentation schématique d'une photodiode PIN ; (p<sup>+</sup>, n<sup>+</sup>) = dopage fort ; i = région déplétée, région d'absorption (dopage faible – matériau intrinsèque).  
 b Circuit équivalent.

Les paires électron-trou créées par les photons pénétrant dans le matériau sont rapidement dissociées et collectées par les électrodes (électron sur l'anode et trou sur la cathode).

La profondeur de la zone de pénétration (ou d'absorption) des photons dépend du matériau et de la longueur d'onde du rayonnement incident.

La présence de la zone déplétée est optimisée pour obtenir un compromis entre la bande passante et le rendement quantique (rapport du nombre d'électrons créés sur le nombre de photons incidents).

La sensibilité du détecteur  $S$  est le rapport entre le courant et la puissance optique incidente :

$$S = \frac{I}{P_{\text{opt}}}$$

$S$  s'exprime en  $A.W^{-1}$  et caractérise le détecteur. Cette sensibilité est fonction du matériau utilisé (pour un détecteur au silicium avec  $\lambda = 0,85 \mu\text{m}$ ,  $S$  est égale à  $0,58 A.W^{-1}$ ). Il se produit alors une rupture de liaison de valence et création de paires secondaire électron-trou qui, dissociées et accélérées, accentuent le processus.

On définit le gain  $G$  comme le facteur de proportionnalité entre les paires secondaires et primaires.

Il présente un caractère aléatoire et de ce fait un bruit lui est associé. On s'efforce de réduire ce bruit en choisissant des matériaux homogènes et en générant les paires primaires dans une région de champ moyen et non maximal.

### ● Mise en œuvre

Les photodiodes PIN de par leur structure sont bon marché. Elles fonctionnent dans une plage de puissance s'étendant de  $-5$  à  $-45$  dBm. Elles sont caractérisées par une vitesse de réaction très élevée (inférieure à  $1$  ns, convenant donc parfaitement dans le cas d'une application avec diode laser), une tension de fonctionnement peu élevée, une implantation électrique peu complexe et des temps de montée et de chute compris entre  $2$  et  $7$  ns.

Elles sont aussi insensibles à la température et ont une bande passante importante.

Il reste cependant quelques problèmes côté bruit de fond. Ceci est d'autant plus gênant que la faible puissance de sortie de la photodiode PIN exige une amplification par un amplificateur-convertisseur d'impédance (Fig. 3.22).

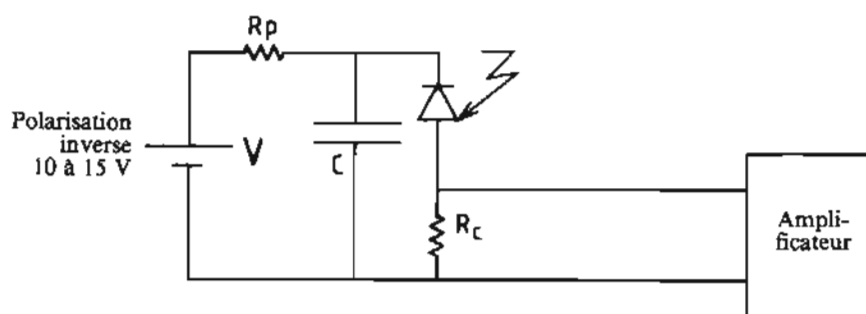


Figure 3.22.

### 2.2.2 Photodiodes à avalanche (APD)

La possibilité de disposer d'un gain interne améliore considérablement les conditions de réception de faibles puissances optiques en présence de bruit thermique.

#### ● Principe

On augmente l'énergie des porteurs issus de la paire électron-trou dissociée dans une zone à champ élevé, jusqu'à ce qu'ils atteignent l'énergie d'ionisation du matériau.

De la même façon que pour la photodiode PIN, il faut que la zone déplétée soit grande (Fig. 3.23).

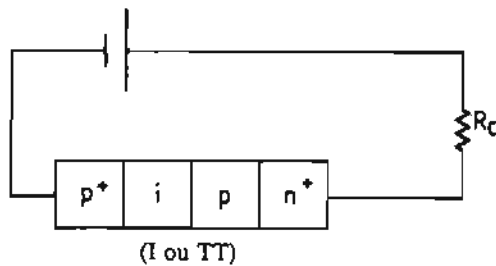


Figure 3.23.

#### ● Mise en œuvre

Le schéma est le même que celui de la photodiode PIN. Cependant, la tension de polarisation est bien plus élevée : quelques centaines de volts et on doit prendre certaines précautions étant donné la sensibilité du gain d'avalanche à la tension de polarisation et à la température.

Le produit gain-bande peut atteindre 100 GHz.

En présence de puissance optique « élevée » ( $30 \mu\text{W}$ ), il y a dégradation de la linéarité et du bruit.

Les photodiodes à avalanche sont plus sensibles que les photodiodes PIN et le niveau du signal qu'elles fournissent est déjà amplifié avec un gain compris entre 100 et 1000.

Mais leur fabrication est plus onéreuse, la largeur de bande de démodulation est plus faible et elles ne peuvent être utilisées qu'avec des signaux numériques. Il faut ajouter à cela une tension de fonctionnement très élevée (100, ..., 1000 V), tension limitant leur durée de vie potentielle.

## 2.3 Coupleurs

La distinction entre les coupleurs actifs et passifs réside dans la présence d'électronique nécessitant une alimentation électrique. Les coupleurs actifs sont donc des équipements optoélectriques.

En général, les coupleurs actifs se présentent sous la forme d'un boîtier muni d'une alimentation, et en fond de panier d'un bus sur lequel s'enchâssent des cartes électroniques de fonctionnalités diverses. La partie optique de ces équipements est située sur les cartes électroniques dont le rôle est d'assurer l'émission et la réception des signaux optiques.

Les coupleurs actifs sont spécifiques au type de réseau utilisé. Leur inconvénient majeur est la présence d'électronique qui fragilise l'équipement. Quant à leurs avantages, ils sont nombreux :

- Une plus grande modularité qui facilite les extensions éventuelles.
- Une couverture géographique plus grande, due à leur fonction d'amplificateur.
- Un diagnostic plus efficace dû à la possibilité de traiter le signal.
- Certains produits permettent un basculement automatique en cas de détection d'incident.

A l'heure actuelle, de nombreux efforts de développement se font dans ce domaine.

Pour compléter ce paragraphe, nous mentionnerons l'existence de répéteurs de déport. Ils se présentent sous la forme de deux répéteurs séparés par une liaison optique. Chaque répéteur assure, outre son rôle d'amplification, resynchronisation du signal électronique, les fonctions d'émission et réception du signal optique.

# Chapitre 4

## Systemes

### 1 SYSTEMES DE TRANSMISSION ANALOGIQUE

Les systemes de transmission analogique sur fibres optiques sont principalement destines à la transmission de signaux video.

Ils presentent, pour cette application, un grand interet en raison de la simplicite des circuits et de leur cout peu eleve par rapport à celui des terminaux video numeriques.

#### 1.1 Techniques de modulation

Le signal analogique peut etre transforme en une modulation d'intensite (MI) de la porteuse optique, par variation de courant qui circule dans la source optique autour d'un niveau de polarisation approprie.

Trois techniques de modulation qui influent directement sur la qualite de la transmission peuvent etre decrites :

- La modulation d'intensite ou modulation directe. C'est la plus facile à mettre en oeuvre. Le signal à transmettre, eventuellement amplifie, commande directement la source optique et module ainsi l'intensite lumineuse emise. En contrepartie de sa simplicite, la modulation d'intensite est directement tributaire des non-linearites de l'emetteur optique.

- La modulation de frequence. Avant de commander l'emetteur optique, le signal module prealablement en frequence une sous-porteuse electrique.

- Pour pallier ces problemes de non-linearite, des techniques « pseudo-numeriques » ont ete developpees, telles que la SPFM (Square Pulse Frequency Modulation) ou modulation de frequence puis ecrêtage. Ses avantages sont lies à la possibilite de regeneration et de commutation.

Les procédés de modulation décrits précédemment s'appliquent principalement aux diodes électroluminescentes (DEL) dont la caractéristique, bien que présentant des non-linéarités gênantes, a une pente suffisamment faible.

Ce n'est pas encore le cas avec tous les lasers semi-conducteurs actuellement disponibles.

## 1.2 Comparaison des modulations

La modulation d'intensité est la plus simple à réaliser (modulation directe, bande passante requise faible). Certes, elle est sensible aux non-linéarités de l'émetteur, ce qui impose des taux de modulation faibles et corrélativement des puissances reçues élevées.

La modulation FM sera utilisée chaque fois que l'on désirera transmettre simultanément  $n$  signaux vidéo sur une même fibre optique, ceci par le biais de  $n$  porteuses multiplexées en fréquence.

La modulation SPFM possède comme avantages :

- une possibilité de régénération, donc portée accrue,
- une dynamique plus importante,
- une simplification de la commutation.

En revanche, cette technique n'est pas utilisable lorsque l'on veut transmettre  $n$  signaux vidéo sur une même fibre optique en raison de son très large spectre.

## 2 SYSTÈMES DE TRANSMISSION NUMÉRIQUE

Un tel système a le schéma de principe suivant :

- A l'extrémité d'émission, un codeur convertit la séquence de symboles binaires (entrée des données) de débits  $f_b$  en une séquence de symboles de débit  $f_s = 1/T$  de propriétés adéquates.

- Ce signal, par l'intermédiaire d'un circuit d'excitation, module l'intensité lumineuse d'une source optique, qui peut être une diode photo-émettrice (DEL) ou un laser, si bien qu'une impulsion optique rectangulaire ayant un facteur de forme donné se trouve associée à chaque symbole d'entrée. La puissance émise étant à limitation de crête, le choix du facteur de forme résulte d'un compromis entre l'accroissement de l'énergie de l'impulsion injectée  $E_i$  et l'augmentation de bruit due au réseau de compensation du récepteur.

- Au récepteur, les impulsions optiques sont converties en impulsions électriques au moyen d'une photodiode PIN ou d'une photodiode à avalanche, puis amplifiées et égalisées de manière que l'on obtienne le rapport signal/bruit maximal. Le compensateur est généralement conçu de manière à four-

nir une impulsion de sortie sans brouillage entre symboles. Le signal compensé est régénéré au moyen de la référence de temps extraite du signal lui-même, puis décodé afin de restituer la séquence d'information originale (sortie des données).

## 2.1 Choix de la source

Les lasers d'une part et les DEL d'autre part ont des domaines d'application qui leur sont propres dans les systèmes optiques numériques (Tableau 4.1).

Tableau 4.1.

Fibres	Applications typiques	Sources préconisées
Fibres multimodes	Jusqu'à 50 Mb/s	1 <sup>re</sup> fenêtre 850 nm
	Jusqu'à 200 Mb/s	2 <sup>e</sup> fenêtre 1300 nm
	Jusqu'à 1 Gb/s	Laser 1 <sup>re</sup> fenêtre
	Jusqu'à 1 Gb/s	Laser 2 <sup>e</sup> fenêtre
Fibres monomodes	Jusqu'à 1 Gb/s	Laser 2 <sup>e</sup> fenêtre
	Jusqu'à 1 Gb/s	Laser 3 <sup>e</sup> fenêtre 1550 nm

En revanche, la sensibilité des caractéristiques du laser à la température et au vieillissement exige que l'on munisse l'émetteur d'une boucle de contrôle automatique de gain.

## 2.2 Choix du détecteur

En réception, on emploie des diodes PIN ou des photodétecteurs APD. Dans la 1<sup>re</sup> fenêtre, le mieux est d'utiliser un APD au silicium. Dans la 2<sup>e</sup> fenêtre, on utilisera de préférence un détecteur PIN, les performances des APD au germanium ou au quaternaire sont actuellement insuffisantes.

## 2.3 Codage en ligne

Une question importante dans la réalisation des systèmes de transmission numérique sur fibres optiques est le choix du code en ligne ou code de modulation.

- En fait, ce code doit satisfaire à de nombreuses conditions :
- l'optimisation de la densité spectrale de la puissance émise,
  - la récupération de l'horloge,
  - le verrouillage de trame.
- Une faible probabilité de propagation des erreurs au décodage.

On donne en général la préférence aux codes binaires afin d'éviter les difficultés pouvant résulter de la non-linéarité des caractéristiques de la source optique.

En fait, les codes les plus utilisés en optique sont les codes Manchester et CMI pour les débits faibles, et les codes bloc 4B/5B, 5B/6B, 7B/8B ou 8B/10B pour les débits les plus élevés.

### 3 MULTIPLEXAGE PAR RÉPARTITION EN LONGUEUR D'ONDE (MRL)

Le multiplexage fréquentiel ou temporel de plusieurs signaux est bien connu dans le domaine des transmissions conventionnelles. En optique, il faut ajouter le multiplexage spectral, appelé également multiplexage par répartition en longueur d'onde.

En effet, le fait que l'affaiblissement reste peu élevé dans une large portion du spectre conduit à penser que, par extension de la technique MRF bien connue (multiplexage par répartition en fréquence), on pourrait transmettre sur une même fibre plusieurs longueurs d'onde différentes modulées par des signaux d'information différents.

Cette technique, appelée « multiplexage par répartition en longueur d'onde (MRL) », permet de transmettre dans la même direction des signaux sur une multiplicité de voies de communication indépendantes – d'où la possibilité d'accroître notablement la capacité de la liaison – ou encore d'effectuer des transmissions bidirectionnelles et d'augmenter ainsi la souplesse du système (Fig. 4.1 et 4.2).

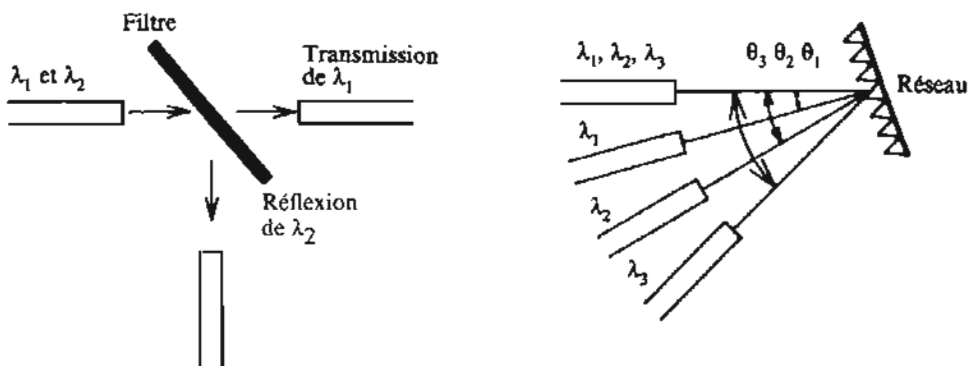


Figure 4.1 Principe du multiplexage par répartition en longueur d'onde (MRL).

- a Le filtre sélectif transmet  $\lambda_1$  et réfléchit  $\lambda_2$ .  
b Le réseau réfléchit la lumière selon un angle dépendant de  $i$ .

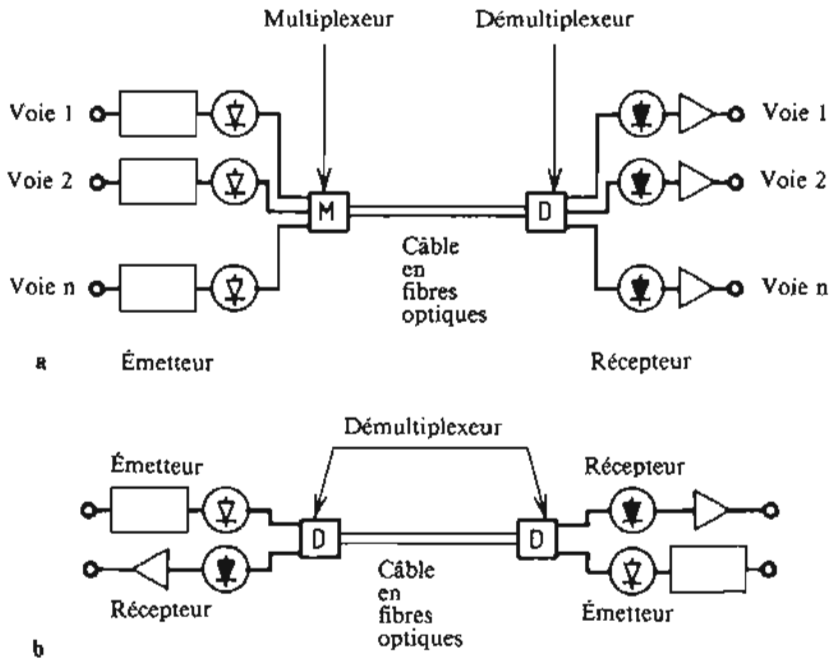


Figure 4.2 Systèmes de transmission MRL.

- a Système à un sens de transmission.  
 b Système à deux sens de transmission.

### ● Intérêt du multiplexage MRL

Pour véhiculer plusieurs informations sur la même fibre, la solution la plus usuelle consiste à multiplexer les signaux électriques correspondants avant de commander l'émetteur optique.

Le multiplexage peut être temporel (il est bien adapté aux signaux numériques) ou fréquentiel (il est essentiellement réservé aux signaux analogiques).

Cela réduit le nombre de composants (source, fibre, détecteur) mais peut présenter divers inconvénients :

- La puissance optique requise à l'entrée du récepteur pour assurer la qualité de transmission augmente avec le nombre d'informations multiplexées et peut imposer des valeurs élevées de la puissance émise. Cela réduit la fiabilité de la liaison et, dans le cas des signaux analogiques, renforce les non-linéarités de l'émetteur.

- Le multiplexage de signaux de forts débits conduit à des débits très élevés et impose des bandes passantes difficiles à réaliser actuellement dans l'électronique d'extrémité.

– Le multiplexage de signaux d’origines diverses, par exemple analogiques et numériques, complique la réalisation des équipements. Pour réduire ces difficultés, on peut se contenter d’un multiplexage électronique partiel et utiliser un émetteur pour chacun des signaux résultants. Les puissances optiques sont émises sur des longueurs d’onde séparées et superposées par l’intermédiaire d’un multiplexeur optique sur la même fibre. A la réception, un démultiplexeur en longueur d’onde effectue les opérations inverses et restitue les signaux composites.

Il semble que le multiplexage en longueur d’onde puisse trouver un gros débouché dans le domaine des réseaux multiservices, domaine où le multiplexage fréquentiel de plusieurs signaux analogiques impose aux sources optiques des linéarités trop élevées.

# Chapitre 5

## Études de faisabilité et qualification

### 1 NORMES ET SPÉCIFICATIONS

Utiliser les normes permet la rédaction de documents de référence qui servent de base aux contrats utilisateurs/fabricants.

La normalisation est un moyen de réduction des coûts et elle contribue à la maîtrise de la qualité.

Sur le plan national, il est recommandé de faire référence aux travaux de l'UTE (Union Technique de l'Électricité) et de l'AFNOR (Association Française de Normalisation).

#### ● Structure de la normalisation des fibres optiques à l'UTE

L'UTE se compose de plusieurs commissions dont une, la commission UTE/CEF 86, assure les travaux de normalisation dans le domaine de la fibronique (Fig. 5.1, page 60).

Les travaux entrepris par la commission UTE/CEF 86 sont principalement issus de ceux du comité 86 *Fibre Optics* de la CEI. Cependant, la commission UTE/CEF 86 a démarré des travaux de normalisation dans des domaines qui ne sont pas encore étudiés par la CEI et qui feront l'objet de propositions françaises :

- capteurs à fibres optiques,
- liaisons point à point pour les réseaux locaux d'entreprises.

D'autre part, la CEI élabore des procédures d'assurance de la qualité des composants électroniques basées sur celles du système européen CCEC (Comité des Composants électroniques du CENELEC<sup>1</sup>). Celles-ci permettent l'octroi de la marque ou d'un certificat de conformité aux normes internationalement reconnues.

<sup>1</sup> CENELEC : Comité Européen de Normalisation ELECTrotechnique.

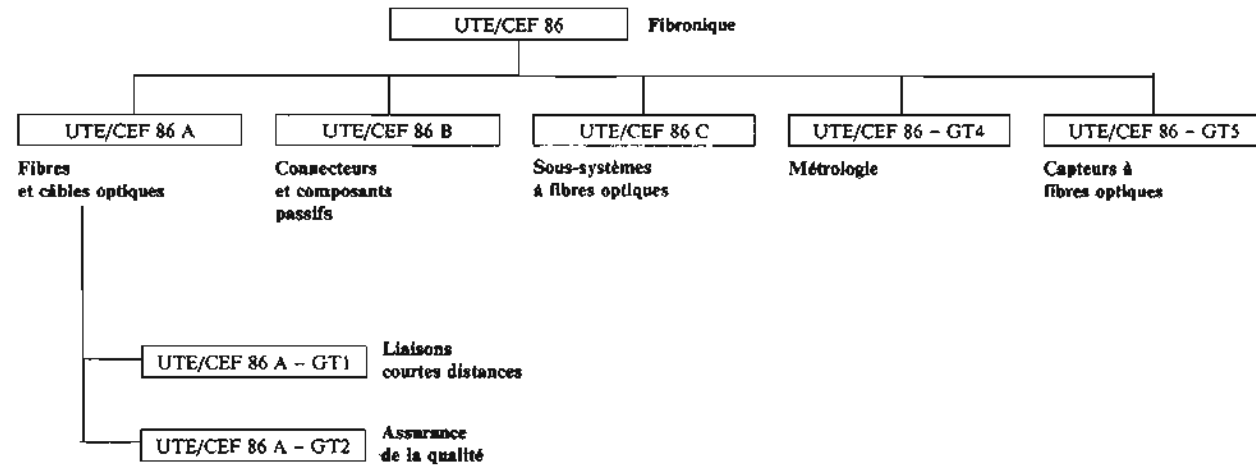


Figure 5.1 Organigramme des travaux de normalisation dans le domaine de la fibronique.

Dans la perspective du marché unique européen, trois groupes de travail au CCEC ont été créés en 1988. Ils couvrent l'activité normative dans le domaine des communications par fibres optiques.

En annexe, se trouve la liste des normes publiées ou en cours d'élaboration.

## **2 RÈGLES DE L'ART**

La mise en œuvre d'un réseau sur support optique nécessite certaines précautions qui se traduisent par diverses actions à mener avant l'installation proprement dite.

Le soin apporté à la réalisation de ces actions conditionne directement la qualité des prestations ainsi que la fiabilité du réseau et devrait rendre l'exploitation et la maintenance plus rationnelles.

### **2.1 Étude du site**

Une visite des lieux est indispensable pour mieux cerner les problèmes liés au site. Elle donne l'occasion de connaître les locaux, les différents passages.

Cette visite s'accompagne d'une étude des plans d'architecture. Ces plans servent à dresser la liste des contraintes de cheminement et permettent de déduire approximativement les longueurs des câbles ainsi que les locaux techniques et les travaux d'aménagement à envisager.

En principe, le choix des locaux techniques se porte sur des endroits bien secs et éloignés des sources de nuisances diverses (nuisance thermique, mécanique, électrique, magnétique, radiative...).

Il faut également tenir compte des projets de réaménagement ou d'extension à moyen terme.

### **2.2 Travaux de génie civil**

L'installation d'un réseau sur un site ou dans un immeuble ancien peut rendre nécessaires certains travaux pour pouvoir desservir des bâtiments jusqu'alors isolés ou pauvrement irrigués.

Des solutions onéreuses telles que galeries techniques, aux solutions moins chères telles que caniveaux munis de tubes, tous les cas de figure peuvent se présenter. Dans les galeries techniques, les supports de câbles, équerres ou chemins de câbles, doivent être posés sans gênes réciproques des autres services, selon des parcours si possible complètement indépendants et nettement séparés.

Dans la réalisation, il ne faut pas oublier les problèmes de tirage, d'intervention éventuelle sur le support. Aussi faut-il prévoir des « trous de visite » ou des « chambres » de tirage en nombre suffisant.

Les immeubles doivent être également aménagés en prévoyant si nécessaire des chemins de câbles, des gaines techniques entre étages par exemple.

Les aménagements ont pour but de préserver une autonomie relative à une évolution du réseau.

## **2.3 Pose proprement dite**

### **2.3.1 Contraintes de cheminement**

Contrairement aux câbles métalliques, le support optique n'est pas sensible aux émissions radioélectriques, à la diaphonie, à la foudre, aux courants de masse, etc. Aussi les contraintes de passage sont-elles réduites aux facteurs mécaniques. Il convient de :

- Emprunter le plus court chemin. Les détours affectent le budget de la puissance ou le bilan optique, limitant du même coup la « couverture » du site.
- Protéger le support des dommages mécaniques (écrasement, traction inopinée, coupure, morsure par rongeur...) et thermiques. L'incident à éviter est le tirage de câbles voisins d'un support optique non protégé et entraînant un étirement ou des blessures par usure de la gaine de protection. Sans compter qu'il y aura des équipements aux extrémités des fibres sur le même câble et qui risquent de subir le même phénomène.
- Prévoir une bonne accessibilité au support à des fins d'entretien (pose ou dépose d'équipements, fabrication de connexion...), avec une surface d'intervention correcte pour chaque point.

### **2.3.2 Contraintes de pose**

On évite de scinder la liaison en tronçons élémentaires, nécessitant dans ce cas des épissures qui apportent un affaiblissement supplémentaire. Ceci implique la pose du câble à fibres en grande longueur et si possible, de la liaison entière d'un seul tenant.

Il faut prendre des mesures afin d'éviter :

- un effort de traction incompatible avec la résistance du câble,
- un rayon de courbure trop faible,
- un frottement trop important dans les canalisations ou tubes.

Ces renseignements font partie de la fiche produit du câble.

### 3 CHOIX DE LA TOPOLOGIE

A partir du dossier de topologie comprenant les éléments pour la réalisation des avant-projets de câblage :

- plans d'ensemble (occupation des chemins de câble existants),
- plans d'aménagement à moyen terme,
- plans des locaux avec les conduits,
- localisation des points à desservir,
- prévisions d'extension du réseau.

On peut imaginer des architectes qui concevront des dessertes de locaux et qui tiendront compte de la faisabilité, des scénarios de câblage, ainsi que des concepts d'exploitation et de maintenance.

#### 3.1 Étude de faisabilité

A ce niveau, on se référera aux normes du réseau choisi pour les conditions de distance, de flux, de caractéristiques des composants ...

L'analyse des conditions topologiques et des résultats de simulation de trafic guidera dans le choix de la technologie à mettre en œuvre.

#### 3.2 Scénarios de câblage

Il semble raisonnable de proposer un choix de quelques scénarios de câblage, chaque version devant présenter une optimisation des critères suivants :

- fidélité aux normes,
- simplicité de réalisation,
- fiabilité,
- facilité des conditions d'exploitation,
- maintenabilité,
- évolutivité,
- coût.

On remarquera que certains critères sont incompatibles, mais des compromis peuvent néanmoins exister.

#### 3.3 Conditions d'exploitation et maintenance

Le réseau local doit en principe fédérer une grande population d'applications. Selon les conditions d'exploitation, il faut, en cas de dérangement du réseau, réagir plus ou moins vite afin d'assurer la continuité du service dans les meilleurs délais.

Une grande vitesse d'intervention demande une bonne organisation du réseau avec, par exemple, des possibilités d'îlotage et des outils appropriés. Les points d'intervention doivent, bien sûr, être accessibles. Il faut prévoir une aire de travail aussi confortable que possible.

### 3.4 Tableau de décision

La synthèse des résultats de l'étude topologique et l'apport de facteurs économiques (opportunité d'un réseau, urgence des travaux, coûts, délais de disponibilité des équipements...) doivent contribuer à mieux choisir le scénario optimal.

## 4 CONTEXTE ÉCONOMIQUE

### 4.1 Généralités

Le besoin de transmettre des données de type graphique, informatique ou image, impose la mise en place de supports de télécommunications permettant dans un environnement perturbé des hauts débits sur des sites industriels, des campus, des collectivités locales...

En matière d'ingénierie de réseau, il faut savoir que le but final est d'offrir un service de « bout en bout », de la meilleure qualité qui soit. A ce titre, il faut se poser un ensemble de questions : la durée de vie du réseau à concevoir, l'usage qu'on va en faire, l'effort financier consenti, l'utilisation de technologies nouvelles, et dans certains cas l'image de marque.

### 4.2 Pourquoi la fibre ?

On peut déjà donner un argumentaire pour les questions précédentes :

#### ● Qualité

Sans conteste, la fibre offre de grands débits, pour des distances plus grandes, en garantissant une bonne immunité aux bruits et un isolement galvanique qu'aucun support métallique n'est en mesure d'offrir.

Il convient de porter une attention particulière dans le choix des composants actifs (puissance d'émission, sensibilité à la réception, facteur de bruit, fiabilité) et leur intégration dans l'environnement commun des composants électroniques classiques.

#### ● Aspects financiers

Il est actuellement admis que le support optique coûte plus cher que le coaxial ou le bifilaire pour la majorité des applications. Ce surcoût est dû en

partie à sa faible consommation en France. L'ingénierie fibre coûte cher, par suite de la spécificité de compétence chez les installateurs. D'où quelques experts qui imposent le prix de prestation. Autant de facteurs à prendre en considération dans la composante coût !

#### ● **Durée de vie du réseau à concevoir**

Il convient de différencier la durée de vie de l'infrastructure optique de la durée de vie des composants actifs.

L'infrastructure optique peut être conçue dans le cadre d'un investissement global de l'entreprise utilisable par des services et des domaines d'application différents (CAO, bureautique, calcul scientifique, vidéo, imagerie...).

Si l'on prend les précautions d'ingénierie préconisées dans l'ouvrage, l'infrastructure optique pourra durer une dizaine d'années, voire plus.

En ce qui concerne les éléments actifs du réseau, leur durée de vie est inférieure et comparable aux éléments électroniques classiques.

#### ● **Usage qu'on va en faire**

Tous les signaux numériques et analogiques peuvent emprunter le support optique. La bande passante est confortable (centaines de MHz, quelques GHz).

Il faut savoir (voir chapitre 3) qu'il est possible de mélanger des signaux par modulation large bande à des prix raisonnables, mais que la technique de multiplexage et de démultiplexage en longueurs d'ondes est encore coûteuse.

Actuellement, dans un même câble, chaque fibre transmet un seul type de signal (vidéo, données...).

#### ● **Anticipation sur la technologie de demain**

On voit apparaître des produits du type FDDI (Fiber Distributed Data Interface, réseau optique à 100 Mbit/s) qu'il faudra sûrement utiliser pour les réseaux fédérateurs, pour les calculateurs scientifiques et pour les réseaux métropolitains (Metropolitan Area Networks).

#### ● **Image de marque**

Elle peut être un paramètre de stratégie de l'entreprise, en matière de communication et de relations publiques.

### **4.3 Considérations économiques**

Nous avons vu que là où se termine le champ d'application des systèmes « cuivre » commence celui des systèmes optiques, que ce soit pour des critères de volumes à transmettre, de temps de réponse, de distances à couvrir ou de contraintes d'environnement. Il faut savoir que, dans la majorité des cas, la fibre optique est apparue parce qu'elle était nécessaire et

que des « médiums » cuivre ne suffisaient plus ! Il n'est pas interdit d'envisager la coexistence des deux techniques.

Ainsi, la comparaison financière entre un système optique et un système « cuivre » ne se posait même pas. A l'inverse, l'industrialisation récente des composants optoélectroniques laisse envisager une baisse de coût telle que les systèmes optiques pourraient bien concurrencer directement les systèmes « cuivre » dans les dix ans à venir ! Pour bon nombre d'applications (CAO, calcul scientifique, systèmes industriels, imagerie médicale...), le coût des systèmes optiques atteint rarement 10 % du coût des matériels raccordés et, compte tenu des enjeux sous-tendus par ces applications, leur financement ne pose pas de problème particulier. En outre, la consommation française et par suite la production de fibres optiques, sont embryonnaires (quelques centaines de millions de kilomètres par an, par rapport à des quantités cent fois plus importantes aux États-Unis) ; aussi les fabricants français importent-ils des produits et licences de l'étranger dont les royalties de fabrication et d'exploitation sont élevées.

En fait, les questions que se pose le chef de projet sont plutôt relatives à la fiabilité, à la maintenance, à la capacité, au « design » des infrastructures qu'il a à concevoir et à mettre en œuvre, ainsi qu'aux classiques problèmes d'introduction d'une technologie nouvelle dans l'entreprise ; ces problèmes concernent notamment la détermination du niveau de maintenance des équipes locales et la formation des techniciens à la manipulation d'outils de diagnostic (photomètre + source optique...), au calcul de budgets optiques et au diagnostic rapide. L'ingénierie française est exigeante sur la qualité de réalisation et s'entoure de précautions qui coûtent cher. Les Anglo-Saxons, plus pragmatiques, tirent les câbles à moindre coût en faisant l'impasse sur la protection physique des supports et équipements (pas de chemin de câbles spécifiques, pas de fixation minimale). Deux techniques d'ingénierie à méditer et à adopter selon les budgets.

L'investissement, tant du point de vue matériel qu'humain, se doit d'être fait sous peine de rater le rendez-vous de l'optique ou plus dangereusement de se retrouver à la merci de vendeurs habiles !

## 5 BILAN DE LIAISON

### 5.1 Définition

Les performances d'une liaison optique point à point pour une longueur donnée sont obtenues par le calcul du bilan de liaison en effectuant une évaluation prévisionnelle de toutes les pertes. Celles-ci sont validées soit par simulation soit par mesure expérimentale.

Pour cela, il est nécessaire de connaître certains paramètres fonctionnels : bande passante ou débit maximal, rapport signal à bruit, ou taux d'erreur,

type de modulation, longueur de la liaison pour un système analogique ou numérique selon le cas.

La démarche à adopter pour que la liaison fonctionne correctement comprend différentes phases que nous allons étudier ci-après.

## 5.2 Choix du récepteur

On spécifie le récepteur PIN ou APD et on calcule la puissance minimale  $P$  à l'entrée, conduisant au rapport signal à bruit ou au taux d'erreur imposés au niveau physique hors protocole (éventuellement adaptation du code ou de la modulation).

La puissance maximale  $P_m$  reçue ne doit pas dépasser la valeur du seuil au-delà duquel le récepteur est saturé.

## 5.3 Choix de la source

On choisit la source de lumière en accord avec les exigences sur la bande passante et la fiabilité. La puissance moyenne émise (en dBm) est définie à partir des notices constructeurs.

Il est recommandé de prendre en compte les pénalités dues au type de modulation retenue (exemple : 3 dBm pour le NRZ, 6 dBm pour le RZ), par rapport à la puissance électrique avant la modulation. De plus, pour des raisons de fiabilité et de durée de vie, on peut limiter volontairement la puissance de sortie.

On calcule la puissance optique émise disponible  $P_o$ . La marge de puissance disponible sur la liaison  $M$  est donc :

$$M = P_o - P_m$$

## 5.4 Choix de la fibre

En fonction de la marge de puissance disponible  $M$  sur la liaison  $\lambda$ , de la longueur d'onde de l'émetteur et de la plus grande distance à couvrir, on en déduit le type de fibre.

## 5.5 Calcul des pertes

### 5.5.1 Pertes de couplage source-fibre

La puissance couplée  $P_{co}$  est donnée par la formule suivante :

$$P_{co} = \frac{n+1}{2} \left( \frac{A_r}{A_s} \right) \left( \frac{ON(f)}{ON(s)} \right)^2 \times P_o$$

avec  $A_f$ , la surface du cœur de la fibre,  $A_s$ , la surface émissive de la source,  $P_s$ , la puissance moyenne émise,  $ON(f)$ , l'ouverture numérique de la fibre,  $ON(s)$ , l'ouverture numérique de la source (généralement à mi-puissance), et  $n$ , l'exposant de  $(\cos\theta)^n$  représentant la distribution angulaire de la puissance émise.

Les pertes de couplage sont données par la formule :

$$10 \log \left( \frac{P_s}{P_\infty} \right)$$

Pour une diode DEL :  $n < 1$  ; pour une diode laser :  $2 < n < 4$ .

### 5.5.2 Pertes de couplage récepteur-fibre

Étant donné que les récepteurs sont à large surface, les pertes sont de l'ordre de 2 dB (souvent inférieures).

### 5.5.3 Pertes dues aux connecteurs d'extrémité et aux épissures

Elles dépendent du type de fibre utilisée.

Pour une fibre à saut d'indice, on comptera par exemple :

- 2 dB au maximum pour un connecteur,
- 1 dB au maximum pour une épissure.

Pour une fibre à gradient d'indice, on comptera par exemple :

- 0,7 dB au maximum pour un connecteur,
- 0,5 dB au maximum pour une épissure.

### 5.5.4 Pertes dues au vieillissement

Elles sont fixées arbitrairement. Par exemple, elles seront de l'ordre de 2 dB pour un couple DEL-PIN et de 5 dB pour un couple diode laser-APD.

### 5.5.5 Marge de maintenance

Elle est également fixée arbitrairement : par exemple, environ 0,5 dB/km dans le cas d'une fibre à gradient d'indice, soit une épissure au kilomètre.

### 5.5.6 Marge de fonctionnement

Elle constitue une garantie contre les imprévus susceptibles d'affecter l'intégrité d'une liaison optique au cours de son existence (condition d'environnement et extension). En général, elle est fixée à 3 ou 4 dB selon la longueur de la liaison et le type de composant.

## 5.6 Validation du bilan de liaison

On effectue la sommation des pertes ; si celle-ci est inférieure à la marge de puissance, le choix est acceptable ; dans l'autre cas, il faut revoir le choix de un ou plusieurs des composants (émetteur, récepteur, fibre) de façon à rendre cette sommation inférieure à la marge de puissance. Dans le cas des réseaux locaux, ce calcul s'applique pour chaque maillon considéré comme une liaison point à point ; sinon, il est impératif de prendre en compte l'ensemble des constituants propres au réseau (entre autres coupleurs) pour le calcul des pertes.

Cette validation est correcte lorsque les distances sont telles que l'état d'équilibre est atteint. Dans le cas contraire (courte distance), on obtient un majorant de la perte totale.

## 6 QUALIFICATION DU SYSTÈME

Le critère majeur du réseau est sa fiabilité, qui conditionne en partie la qualité du service rendu. Ceci nécessite une qualification complète des différents constituants du réseau par réalisation de maquettes afin de tester la compatibilité des composants entre eux.

La sélection peut se faire à deux niveaux :

- technologique,
- physique.

### 6.1 Sélection technologique

Les composants du réseau sont obligatoirement choisis après une qualification. Cette dernière peut être prononcée soit dans le cadre d'essais d'utilisateur, soit en se référant à des fiches produits. Cette qualification concerne les domaines suivants :

- perturbations radioélectriques,
- chocs électriques,
- vibrations mécaniques,
- vieillissement accéléré,
- ambiance climatique rude,
- feu pour certains câbles,
- ...

### 6.2 Compatibilité physique

Des tests de compatibilité physique entre les différents éléments d'un réseau seront menés. Ces tests seront faits surtout lors de l'utilisation, sur

un même réseau, de composants provenant de constructeurs différents ; ils détermineront les fonctionnements limites des composants. Des maquettes, les plus représentatives possible du réseau final, seront montées en laboratoire.

Les tests de compatibilité fonctionnelle (uniquement mentionnés ici) concernent le côté applicatif du réseau mais n'entrent pas en ligne de compte sur le choix des composants physiques.

Lorsque les tests de sélection technologique sont probants et lorsqu'on est sûr de la compatibilité vraie (physique et fonctionnelle), il est alors envisageable de procéder à l'approvisionnement.

# Chapitre 6

## Réalisation et recette

### 1 CONTRAINTES SPÉCIFIQUES D'INSTALLATION ET D'EXPLOITATION DANS UN SITE

Cette étude est menée en tenant compte de certains critères :

- conditions de réalisation (espace vital pour les travaux, présence d'une source d'énergie...);
- facilité d'accès aux matériels pour l'exploitation et la maintenance ;
- contraintes spécifiques du matériel données par le constructeur : gamme de température, taux d'humidité, compatibilité électromagnétique... ;
- protections diverses : protection du câble dans les chambres de tirage et autres passages délicats, protection contre les rongeurs, protection contre l'incendie ou la propagation de gaz nocif, éventuellement prévoir la fermeture à clé de certains locaux ;
- évolutivité éventuelle ;
- coûts en vue de leur optimisation.

Sur le site, cette étude est complétée par des visites des lieux en complément d'examen des plans existants. Cette démarche permet de cerner les problèmes liés à l'environnement, l'objectif étant de définir :

- un cheminement optimal pour le support physique ainsi que les éventuels emplacements des points d'épissurage et la réserve de câble à prévoir (loves) ;
- le dimensionnement correct des chambres de tirage et des conduites ;
- les conditions mécaniques de pose (rayons de courbure du câble, effort de traction...);
- les passages délicats (présence d'une ligne de transport d'énergie, traversée de chaufferie...);
- les emplacements des composants actifs : locaux, présence de sources d'énergie... ;
- l'élaboration du planning d'installation : distribution des tourets, sens du déroulage, enchaînement des travaux...

Ces différents examens peuvent aboutir à un aménagement du site, à savoir :

- création ou amélioration des chemins de câble, des fourreaux, création ou modification de locaux, chambre de tirage et galeries techniques ;
- accès aux différents éléments du réseau pour les tests, que l'on peut prévoir à deux niveaux : l'un réservé à l'exploitation, et l'autre à la maintenance.

## 2 RECETTE

Les différents contrôles abordés dans ce chapitre, ont pour but de vérifier que :

- l'installation répond aux différents plans spécifiés ;
- le système global satisfait à toutes les spécifications techniques fonctionnelles ;
- l'intégrité du système est assurée.

Trois étapes permettent de mener à bien ces contrôles :

- la définition des cahiers de recette (qui établiront la base contractuelle) ;
- l'identification du matériel nécessaire aux essais ;
- les recettes en usine ou sur le site, partielles ou globales.

### 2.1 Définition des cahiers de recette et essais (usine ou site)

Les cahiers de recette préparent les différentes étapes de réalisation du réseau. Ils seront soit rédigés par le concepteur et feront partie des spécifications, soit établis par le fournisseur et devront alors recevoir l'agrément du concepteur.

Ces cahiers porteront sur les éléments constitutifs de la liaison et sur les spécifications fonctionnelles et techniques du système. La rédaction des cahiers de recettes globaux ou des sous-cahiers, fera partie intégrante du projet.

Pour chaque étape de la recette, le cahier précisera :

- les essais à réaliser,
- les conditions de réalisation,
- les appareils à utiliser,
- les résultats à obtenir.

### 2.2 Identification du matériel d'essai

En ce qui concerne la recette en usine, le matériel est fourni par le constructeur.

Pour la recette sur le site, deux possibilités :

- le constructeur fournit les appareils ;
- l'utilisateur se dote du parc d'appareils nécessaires, et la recette est réalisée avec ceux-ci. L'avantage de cette solution est que les vérifications ultérieures se feront avec les mêmes bancs de mesure.

En ce qui concerne la recette et les essais de la partie optique du réseau, les matériels suivants sont recommandés :

- un réflectomètre optique adapté à la longueur d'onde ;
- un banc de mesure d'affaiblissement composé d'un émetteur de lumière calibré à la longueur d'onde d'utilisation et de radiomètre ou photomètre ;
- un atténuateur variable.

#### ● Dans le cas d'un système analogique

Utiliser un banc permettant d'effectuer des mesures de rapport signal à bruit et, dans le cas de la vidéo, un générateur de mires, un oscilloscope vidéo et un vecteurscope.

#### ● Dans le cas d'un système numérique

Utiliser un générateur de messages pseudo-aléatoires à la vitesse d'utilisation, un dispositif de mesure de taux d'erreurs.

## 2.3 Contrôles stipulés dans le cahier de recette

Les contrôles effectués, conformément aux cahiers de recette, porteront sur tous les éléments constitutifs du système. Dans la plupart des cas, ils seront réalisés en trois étapes :

- le contrôle en usine,
- les essais en cours d'installation,
- le contrôle final après installation.

Ces contrôles permettront, en outre, de constituer un ensemble de mesures qui serviront de référence durant l'exploitation du système.

### 2.3.1 Fibres (avant câblage)

Aucune mesure spécifique n'est prévue pour l'utilisateur. Toutefois, le client se réserve la possibilité d'obtenir de la part du câblage certaines caractéristiques des fibres entrant dans la composition des câbles présentés en recette :

- dimensions géométriques et tolérances,
- nature du (ou des) revêtement(s),
- ouvertures numériques théoriques maximales,
- caractéristiques de transmission (affaiblissement et bande passante),
- courbes de rétrodiffusion.

A titre d'exemple, pour la fibre « télécom », les paramètres suivants sont à exiger :

#### ● Dimensions géométriques

Les dimensions sont les suivantes :

- diamètre de cœur :  $50 +$  ou  $- 3 \mu\text{m}$ ,
- diamètre de gaine, « surface de référence » :  $125 +$  ou  $- 3 \mu\text{m}$ ,
- erreur de concentricité (partie verrière) :  $< 6 \%$ ,
- non-circularité du cœur :  $< 6 \%$ ,
- non-circularité de la gaine :  $< 2 \%$ ,
- diamètre de revêtement primaire :
  - 1<sup>o</sup> couche :  $250 +$  ou  $- 15 \mu\text{m}$ ,
  - 2<sup>o</sup> couche :  $250 +$  ou  $- 15 \mu\text{m}$ ,
- centrage du revêtement primaire :  $80 \%$ .

#### ● Caractéristiques optiques

Les caractéristiques optiques sont les suivantes :

- ouverture numérique :  $0,230 +$  ou  $- 0,015$ ,
- pour  $\lambda = 850 \text{ nm}$ , affaiblissement (selon la classe) de  $2,0$  à  $4,0 \text{ dB/km}$  et bande passante pour  $1 \text{ km}$  de  $300$  à  $600 \text{ MHz}$ ,
- pour  $\lambda = 1300 \text{ nm}$ , affaiblissement (selon la classe) de  $0,5$  à  $2,0 \text{ dB/km}$  et bande passante pour  $1 \text{ km}$  de  $600$  à  $1 \text{ GHz}$  et plus.

### 2.3.2 Câbles

#### ● Essais mécaniques et d'environnement

La nature et la réalisation de ces essais seront extraits de la norme NF C 93-850 « Composants électroniques – Spécification générique pour câbles à fibres optiques ». Il est à noter que ces essais ne sont pas fondamentalement différents de ceux concernant les câbles classiques.

#### ● Essais de transmission

Pour chaque longueur de câble, on réalise :

- Une mesure par rétrodiffusion à  $0,85 \mu\text{m}$ , pour chaque fibre, afin de vérifier la continuité optique et la régularité d'affaiblissement. Il ne devra pas être observé de pics de Fresnel autres que ceux des extrémités de la fibre en essai, ni de « marche » importante (de l'ordre de  $0,2 \text{ dB}$ , par exemple) sur la droite représentative de la courbe d'affaiblissement en fonction de la distance.
- Une mesure d'affaiblissement à la ou les longueurs d'onde d'utilisation ( $0,85 \mu\text{m}$  ou  $1,3 \mu\text{m}$ ) sur fibres au moyen de bancs d'insertion (en équilibre de modes) (Fig. 6.1 et 6.2, page 76).
- Une mesure de bande passante à la ou les longueurs d'onde d'utilisation ( $0,85 \mu\text{m}$  ou  $1,3 \mu\text{m}$ ). Afin d'obtenir une valeur significative, les fibres seront bouclées entre elles par soudure (longueurs plus importantes) et on prendra

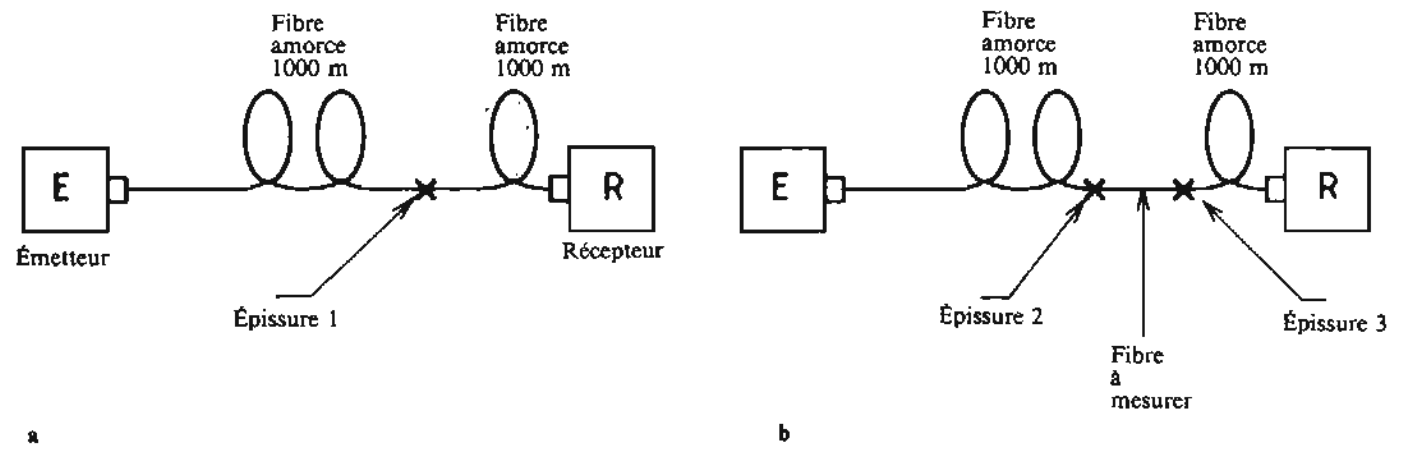


Figure 6.1 Mesures en usine sur fibres multimodes à 0,85  $\mu\text{m}$  et 1,3  $\mu\text{m}$  (insertion).  
 a Tarage à zéro.  
 b Mesure.

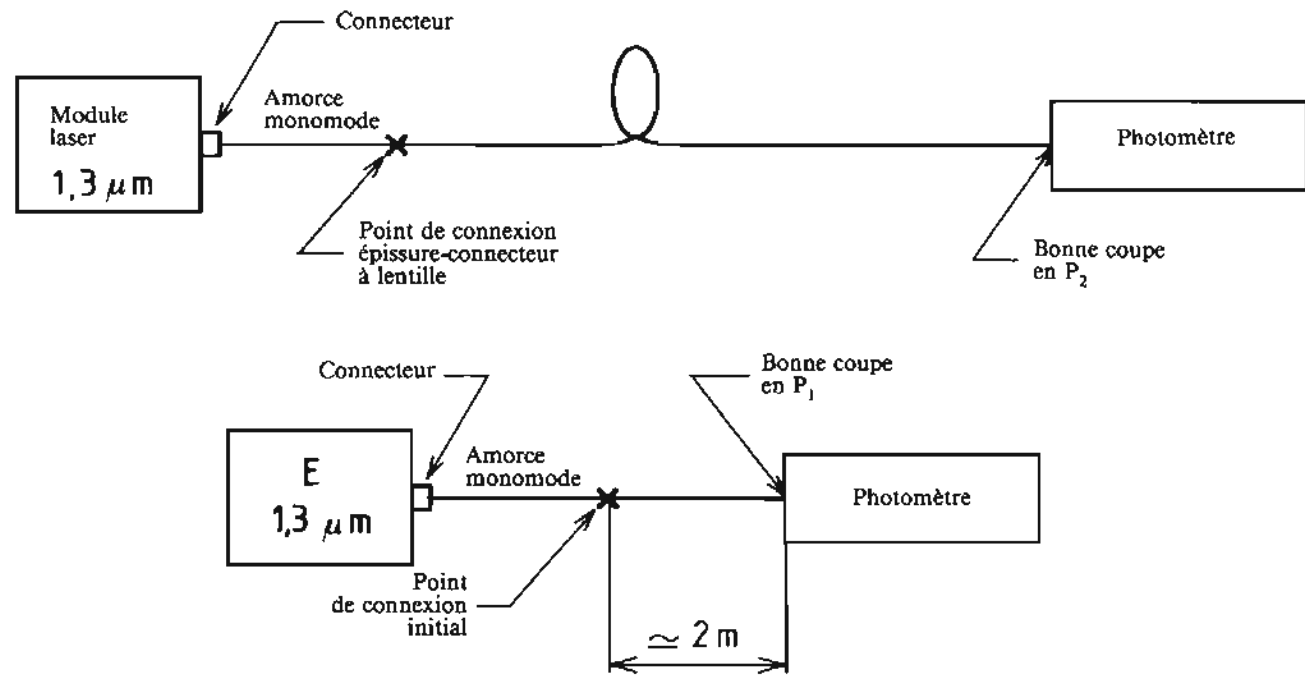


Figure 6.2 Mesures en usine sur fibres monomodes à 1,3 μm (fibre coupée).  
 a Mesure en P<sub>1</sub>.  
 b Mesure en P<sub>2</sub>.

le facteur de concaténation arbitrairement égal à 1.

Pour ce qui est des fibres monomodes, la même démarche est suivie ; toutefois la mesure de rétrodiffusion s'effectue à 1,3  $\mu\text{m}$  et la mesure de l'affaiblissement à 1,3  $\mu\text{m}$  (et éventuellement à 1,55  $\mu\text{m}$ ) ; de plus, la mesure de bande passante est remplacée par les mesures de dispersion (modale et chromatique).

Éventuellement, lors de la livraison des tourets sur le site, un contrôle des fibres par réflectométrie peut être effectué afin de s'assurer de l'absence de défauts survenus au cours du transport. L'intérêt de cette opération est qu'elle permet en cas de litige de définir les responsabilités de chacun des intervenants.

### ● Essais en cours d'installation

En cours d'installation, après pose, puis après raccordement de fibres, des contrôles par la méthode de rétrodiffusion seront effectués à une seule longueur d'onde et dans un seul sens à partir de l'extrémité libre de la fibre venant d'être épissurée (multimode et monomode), ceci afin de s'assurer que la pose du câble a été réalisée dans de bonnes conditions et pour évaluer à titre d'information l'atténuation additionnelle des points de soudure.

### ● Essais après installation

Ils portent sur les caractéristiques :

– **Affaiblissement.** Les valeurs d'affaiblissement sur chacune des fibres sont relevées par insertion dans les deux sens, de connecteur d'extrémité à connecteur d'extrémité à 0,85  $\mu\text{m}$  et éventuellement à 1,3  $\mu\text{m}$  et 1,56  $\mu\text{m}$  pour les monomodes (Fig. 6.3 et 6.4, pages 78 et 79).

– **Bande passante.** Les mesures de bande passante sur chaque fibre multimode sont effectuées dans les deux sens à 0,85  $\mu\text{m}$  et éventuellement à 1,3  $\mu\text{m}$ . Pour les fibres monomodes, cette mesure est remplacée par les mesures de dispersion.

## 2.3.3 Équipement

### ● En usine

Recette des équipements d'extrémité et répéteurs : lors de cette réception, il est procédé à des tests de fonctionnalité, conformément aux spécifications techniques et éventuellement à des tests de vieillissement.

Les vérifications des caractéristiques données par le constructeur des matériels concernés portent sur la totalité de la fourniture ou sur des échantillons selon l'importance du lot concerné.

### ● Après installation

Il convient d'effectuer les tests de fonctionnalité du système.

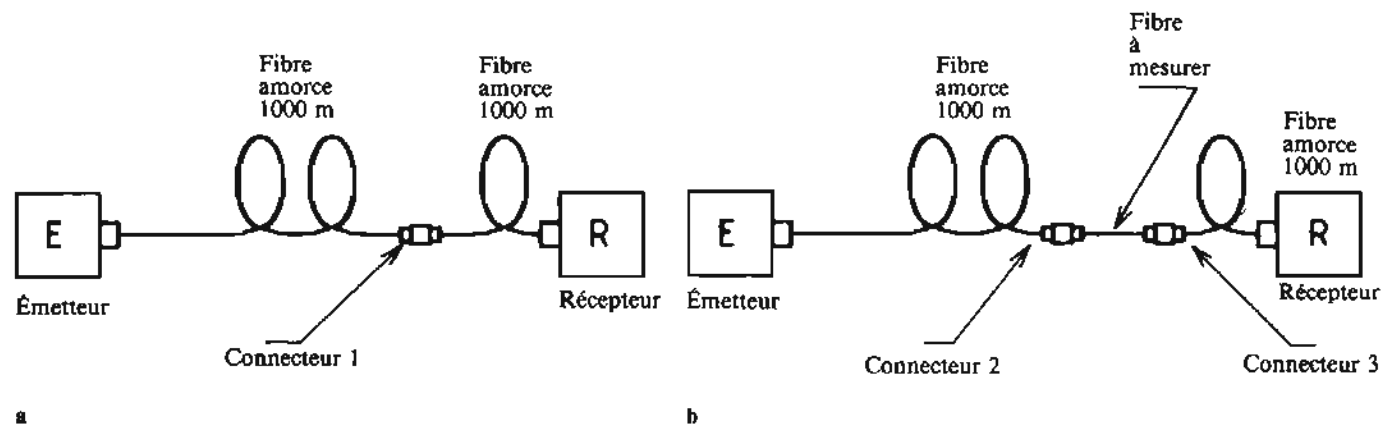


Figure 6.3 Mesures en usine sur fibres multimodes à  $0,85 \mu\text{m}$  et  $1,3 \mu\text{m}$  (insertion).

- a Tarage à zéro.  
 b Mesure.

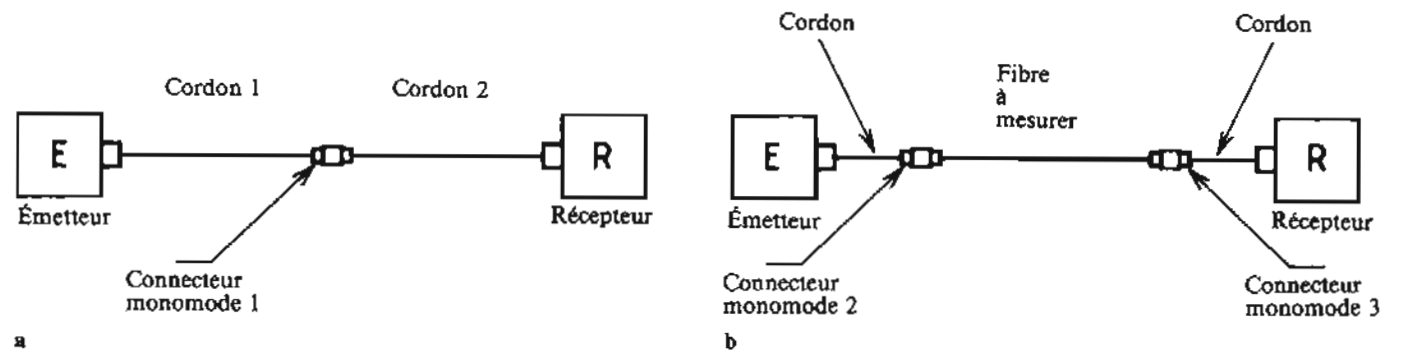


Figure 6.4 Mesures en usine sur fibres monomodes à 1,3  $\mu\text{m}$  (insertion).

- a Tarage à zéro.
- b Mesure.

#### **2.3.4 Concrétisation administrative de la recette**

La recette globale est prononcée après intégration des éléments actifs (réseau complet) et hors application dans un premier temps. La recette en simulation valide la continuité du réseau.

Dans un deuxième temps, la recette s'effectue avec l'application afin de vérifier la conformité fonctionnelle. Cette dernière étape constitue la recette provisoire.

La recette définitive est prononcée après un laps de temps de fonctionnement pouvant aller de six mois à deux ans. Au cours de cette période, les performances du réseau sont vérifiées ; de plus, les incidents, les pannes sont analysées, et la fiabilité du système est évaluée.

# Chapitre 7

## Documentation et formation

### 1 DOCUMENTATION

La documentation est un élément fondamental pour l'exploitation et surtout la maintenance du réseau. Elle doit faire partie des éléments contractuels liant les sociétés réalisatrices au promoteur du système.

Elle sera composée d'au moins quatre volets différents :

- la description fondamentale du réseau,
- les plans de câblage,
- les cahiers de recette (usine, site avant et après raccordement des éléments constitutifs du réseau),
- la description des composants.

#### 1.1 Description fonctionnelle

Elle comportera quatre parties :

- la description fonctionnelle du système mis en place (rappel du cahier des charges...),
- les schémas synoptiques du réseau, comportant la liste des équipements constitutifs en donnant leur numéro de référence,
- les schémas synoptiques des locaux techniques regroupant les éléments actifs,
- les schémas de raccordement : les câbles sont, en général, éclatés sur des têtes de câbles optiques dans des coffrets ou armoires. Chaque câble

est numéroté. Les extrémités des fibres de chaque câble sont repérées par des souplissos de couleurs différentes qui protègent mécaniquement la fibre. Les souplissos ont une longueur de 1,50 m environ et sont lovés dans des alvéoles prévues à cet effet.

## 1.2 Plans de câblage

Ce document consiste à reproduire sur les plans d'architecte le cheminement des câbles avec l'emplacement des étiquettes pour le repérage des câbles, des points de tests, des équipements raccordés avec notification de leur référence.

Il est nécessaire d'établir après la pose du ou des câbles un plan précis et métré. En effet, ces indications sont utiles en cas d'anomalies dans la transmission pour repérer (à l'aide d'un appareil de mesure qui donne la distance exacte, en mètres, du défaut par rapport à une extrémité) l'endroit précis du câble où il faut intervenir.

Ce plan donne en outre les longueurs exactes de chaque câble, ce qui permet de calculer les caractéristiques théoriques de chaque fibre qui sont fonction de la longueur.

## 1.3 Cahiers de recette

Un document réunira l'ensemble des cahiers de recette indiquant les procédures de recette, le matériel employé (avec caractéristiques techniques de ce matériel) et les résultats obtenus au cours des recettes. Il portera les signatures des intervenants lors de l'installation du réseau.

Le document servira de référence par la suite : après toute panne, les performances devront rester dans les tolérances définies par le document de recette ; il permettra de comparer les performances du réseau au cours du temps (vieillessement...).

## 1.4 Description des composants

En outre, pour assurer la maintenance du système, il semble intéressant de constituer un dossier, par équipement, comportant la liste des composants principaux, leur description physique, leurs caractéristiques techniques, ainsi que des recommandations de mise en service.

Ce document pourra être illustré de photos d'ensembles et de sous-ensembles. Les contraintes d'installation et les méthodes de mise en fonctionnement seront décrites en tenant compte des points de tests éventuels et des réglages à effectuer.

Enfin, les références d'achat des équipements et le nom des fournisseurs compléteront utilement ce dossier.

## 2 FORMATION

La formation tant au système qu'à la maintenance doit être prévue à la passation des marchés avec les entreprises qui pourront en assurer tout ou partie.

### 2.1 Formation système

La formation système est plus particulièrement préparée pour les exploitants du réseau ; elle consiste à décrire :

- la technologie générale du réseau, ainsi que sa topographie,
- le mode d'exploitation et les outils de tests ou de surveillance utilisés.

On pourra y inclure, selon l'importance du réseau, des données spécifiques ; à titre d'exemple, on peut citer :

- la liste séquentielle des opérations de remise en route,
- la liste des techniciens de maintenance à contacter en cas de panne.

### 2.2 Formation maintenance

Cette formation, a priori pratique, doit aussi reprendre la théorie du fonctionnement du réseau et des notions d'exploitation comme le calcul du bilan de liaison. Bien entendu, elle s'appuiera sur des cas typiques de dépannage avec travaux pratiques à l'appui et utilisation des outils de maintenance.

Ce cours s'accompagnera de la remise de la documentation (*voir plus haut*), de la liste des appareils de mesure avec leur guide d'utilisation, des descriptions des procédures de détection de pannes et de dépannage, ainsi que la liste du lot de maintenance du matériel.

# Chapitre 8

## Exploitation et maintenance

Il convient de distinguer la notion d'exploitation et celle de la maintenance. Selon l'organisation de l'entreprise, ces deux fonctions peuvent être ou non regroupées dans un même secteur d'activité.

### 1 FONCTION EXPLOITATION

La fonction exploitation est de la responsabilité de l'administrateur du réseau. Ses objectifs sont la gestion complète du réseau et la planification des extensions en fonction des besoins de l'entreprise et des possibilités de l'infrastructure existante.

### 2 FONCTION MAINTENANCE

L'objectif de la maintenance est de garantir le taux de disponibilité demandé au réseau. On distingue deux types de maintenance, la préventive et la curative, chacune ayant trait aux infrastructures et aux systèmes.

En fonction des compétences et du savoir-faire ainsi que des moyens matériels (appareils de test, outils...) dont l'entreprise choisit de se doter, ces activités seront supportées par une équipe interne ou sous-traitées à l'extérieur. Cette répartition sera aussi fonction des niveaux d'intervention : fréquence et complexité des interventions.

A ce jour, du fait de la non-normalisation des systèmes de modulation et de traitement du signal optique, il est impératif d'interconnecter sur une

même fibre du matériel d'un même constructeur et vendu pour être compatible. Ceci nécessite d'avoir du matériel de rechange dans chaque catégorie de matériel utilisé. Le nombre de matériels en rechange doit être fonction des délais d'approvisionnement et de réparation du matériel optique qui sont souvent longs et qu'il convient de prendre en compte.

L'importance du lot de maintenance sera fonction de la fiabilité théorique (MTBF) des composants du système et également de la fréquence de manipulation de certains d'entre eux (connecteur, jarretière optique...).

## 2.1 Maintenance préventive

Elle pourra être en partie assurée par l'équipe d'exploitation si elle dispose d'outils de diagnostic ad hoc.

La forme et les fréquences de campagnes de mesure relatives à la maintenance préventive de l'infrastructure optique devront tenir compte des contraintes d'exploitation.

Si la sophistication des matériels ne permet pas de mesurer en continu des paramètres pertinents (niveau d'émission) de fonctionnement des composants actifs, il est nécessaire d'interrompre l'exploitation du système plus longtemps pour effectuer leur maintenance préventive.

## 2.2 Maintenance curative

La méthodologie de diagnostic devra être définie avec soin avant la mise en service du système, afin de réduire les délais de localisation, d'intervention et de mise en service du réseau. Cette méthodologie englobera l'infrastructure et les systèmes.

Pour les systèmes, l'intervention se limitera à un échange standard de carte. Pour les infrastructures, l'intervention peut se faire en deux étapes :

- une réparation provisoire mais rapide avec, dans certains cas, une exploitation légèrement dégradée,
- une réparation définitive après réparation provisoire.

# Annexe 1

## Glossaire

**APD** : Photodiode à avalanche.

**Bande passante** : Bande de fréquence utilisable pour codifier et transporter le signal. La bande passante est la différence entre la fréquence basse et la fréquence haute du support utilisé.

**Bornier** : Dispositif démontable de raccordement de fibre.

**Commutation** : Action d'interconnecter des unités fonctionnelles, des voies de transmission ou des circuits de télécommunications aussi longtemps qu'il est nécessaire pour acheminer les signaux.

**Connecteur** : Dispositif destiné à transférer l'énergie rayonnante entre des fibres optiques, et qui est normalement fixé à un appareil ou à l'extrémité d'un câble optique afin de permettre la connexion et la déconnexion d'un câble optique. Prise utilisée pour relier des unités.

**Décibel** : Dixième partie du bel, unité servant à évaluer l'intensité des sons.

**DEL (Diode Électroluminescente)** : Dispositif semi-conducteur à jonction qui émet un rayonnement optique incohérent par émission spontanée lorsque les électrons ou des trous sont injectés à travers la jonction.

**Diélectrique** : Substance dont la propriété électrique fondamentale est d'être polarisable par un champ électrique.

**DL (Diode Laser)** : Laser constitué d'un dispositif semi-conducteur jonction PN.

**Duplex (ou bidirectionnel)** : Mode de transmission permettant le transfert d'information dans les deux sens simultanément.

**FDDI (Fiber Distributed Data Interface)** : Spécification de réseau à fibre optique à très haut débit (100 Mb/s).

**Fenêtre d'utilisation** : Intervalle de longueur d'onde dans lequel l'affaiblissement de transmission d'un guide d'ondes optiques est assez faible pour permettre un fonctionnement satisfaisant d'un système de transmission.

**Ferrule** : Accessoire mécanique, généralement un tube rigide, destiné à maintenir l'extrémité dénudée d'un faisceau de fibres ou d'une fibre optique.

**Filtre dichroïque** : Filtre optique destiné à séparer un rayonnement optique en bandes spectrales distinctes.

**Gel d'indice** : Substance, généralement un liquide ou un ciment, dont l'indice de réfraction est presque égal à celui du cœur d'une fibre optique et qui est destiné à réduire les réflexions de Fresnel sur une surface terminale de la fibre.

**Horloge** : Dispositif qui produit des signaux périodiques destinés à la synchronisation.

**ISO** : International Organization for Standardization – Organisation internationale de normalisation.

**Love** : Réserve de fibre sous forme d'enroulement.

**Monomode (fibre)** : Fibre optique dans laquelle un seul mode lié peut être entretenu à la longueur d'onde considérée.

**Multimode (fibre)** : Fibre optique dans le cœur de laquelle plusieurs modes liés peuvent être entretenus à la longueur d'onde considérée.

**Multiplexage** : Procédé qui permet à plusieurs sources de données de partager un même support de transmission de sorte que chacune d'elles dispose de sa propre voie de transmission de données.

**NRZ** : Non-retour à zéro.

**OSI (Open System Interconnection)** : Modèle défini par l'ISO pour l'interconnexion des systèmes ouverts.

**Photomètre** : Appareil destiné à la mesure des grandeurs photométriques.

**PIN (photodiode)** : Récepteur photoélectrique dans lequel l'absorption du rayonnement au voisinage d'une jonction p-n entre deux semi-conducteurs, ou d'un contact entre un semi-conducteur et un métal produit une variation de résistance dépendant du sens du courant.

**Radiomètre** : Appareil destiné à la mesure des rayonnements en unités énergétiques.

**Réfectomètre** : Appareil destiné à la mesure des grandeurs concernant la réflexion. Il permet en particulier de visualiser la cartographie d'une fibre.

**Répéteur** : Dans un réseau local, appareil situé à un nœud pour régénérer les signaux afin d'accroître la portée des transmissions entre stations de données et d'interconnecter deux branches.

**Rétrodiffusion** : Diffusion de particules ou d'un rayonnement par la matière suivant des directions formant des angles supérieurs à  $90^\circ$  par rapport à leur direction initiale.

**RZ** : Retour à zéro.

**Transmission série** : Transmission séquentielle des éléments de signal d'un groupe représentant un caractère ou toute autre donnée.

**UTE** : Union Technique de l'Électricité – Organisme français de normalisation électrique.

## Annexe 2

# Travaux de normalisation

### 1 Normes françaises publiées

#### ● Fibres et câbles optiques

- NF C 93-840** Composants électroniques – Spécification générique pour fibres optiques.
- NF C 93-850** Composants électroniques – Spécification générique pour câbles à fibres optiques.
- UTE C 93-850** Composants électroniques – Câbles et fibres optiques.
- NF C 93-851** Spécification intermédiaire – Câble à fibre optique monofibre à usage industriel – Diamètre 3,8 mm.
- UTE C 93-860** Composants électroniques – Fibres et câbles optiques – Guide pour la réalisation de support de transmission par fibres optiques sur courte distance.

#### ● Connecteurs pour fibres optiques

- NF C 93-810** Composants électroniques – Dispositifs d'interconnexion et composants passifs à fibres optiques – Spécification générique pour connecteurs pour fibres optiques.
- NF C 93-811** Dispositifs d'interconnexion et composants passifs à fibres optiques.
- NF C 93-812** Composants électroniques – Dispositifs d'interconnexion et composants passifs à fibres optiques – Spécification intermédiaire des connecteurs pour fibres et câbles optiques – Type CF04.
- NF C 93-813** Composants électroniques – Dispositifs d'interconnexion et composants passifs à fibres optiques – Spécification intermédiaire des connecteurs pour fibres et câbles optiques – Type CF05.

**NF C 93-814** Composants électroniques – Dispositifs d'interconnexion et composants passifs à fibres optiques – Spécification intermédiaire des connecteurs pour borniers optiques.

● **Composants optoélectroniques**

**NF C 86-500** Composants électroniques – Système CENELEC d'Assurance de la Qualité – Dispositifs à semi-conducteurs optoélectroniques et à cristaux liquides – Spécification générique. (IDT CECC 20 000.)

**NF C 86-503** Composants électroniques – Système CENELEC d'Assurance de la Qualité – Phototransistors, transistors photodarlington et réseaux de phototransistors – Spécification particulière cadre. (IDT CECC 20 003.)

**NF C 86-505** Composants électroniques – Système CENELEC d'Assurance de la Qualité – Photodiodes, réseaux de photodiodes – Spécification particulière cadre. (IDT CECC 20 005.)

**NF C 86-506** Composants électroniques – Système CENELEC d'Assurance de la Qualité – Photodiodes PIN pour fibres optiques – Spécification particulière cadre. (IDT CECC 20 006.)

**UTE C 86-508** Composants électroniques – Diodes électroluminescentes, diodes émettrices en infrarouge pour systèmes et sous-systèmes à fibres optiques – Spécification particulière cadre et méthodes de mesures – Prescriptions provisoires.

**UTE C 86-509** Composants électroniques – Tête laser optique avec fibre amorce – Spécification particulière cadre et méthodes de mesures.

**NF C 93-871** Émetteurs numériques utilisant une diode électroluminescente.

**NF C 93-872** Récepteurs numériques utilisant une photo PIN.

## **2 Normes internationales et projets de normes internationales (DIS) sur la topologie et les méthodes d'accès**

**ISO 8802-3** Systèmes de traitement de l'information – Réseaux locaux – Partie 3 : Accès multiple par surveillance du signal et détection de collision et spécifications pour la couche physique.

- ISO 8802-4.2** Systèmes de traitement de l'information – Réseaux locaux – Partie 4 : Spécification par la méthode d'accès et la couche physique relatives au bus à passage de jeton.
- ISO 8802-5** Systèmes de traitement de l'information – Réseaux locaux – Partie 5 : Spécification pour la méthode d'accès et la couche physique relatives à l'anneau à jeton.
- ISO 9314-1** Systèmes de traitement de l'information – Interface de données distribuées sur fibre (FDDI) – Partie 1 : Protocole de la couche physique de l'anneau à jeton.
- ISO 9314-2** Systèmes de traitement de l'information – Interface de données distribuées sur fibre (FDDI) – Partie 2 : Mécanisme d'accès au support de l'anneau à jeton (MAC).
- ISO 9314-3** Systèmes de traitement de l'information – Interface de données distribuées sur fibre (FDDI) – Partie 3 : Spécification pour la couche physique déterminée par le milieu.

### **3 Projet de rapport technique international sur les connecteurs pour réseaux locaux**

- ISO DTR 9578** Information technology-computer interface connectors used in local area networks.

### **4 Travaux en cours au sein de la commission UTE/CEF 86**

- Guide de conception des capteurs à fibres optiques.
- Système d'assurance de la qualité des fibres et câbles optiques.
- Établissement d'un plan qualité relatif aux liaisons optiques point à point en usine et sur site.
- Spécification générique sur les liaisons point à point à fibres optiques (calcul du budget, de la marge, méthodes de mesure).
- Spécification de produits – Fibres optiques du type : 50/125 µm, 62,5/125 µm, 85/125 µm, 100/140 µm.

### **5 Normes publiées par la Commission Électrotechnique Internationale (CEI)**

- CEI 793-1** Fibres optiques – Première partie : Spécification générique (2<sup>e</sup> éd.).

- CEI 793-2**    Fibres optiques – Deuxième partie : Spécifications de produit (1<sup>re</sup> éd.).
- CEI 794-1**    Câbles à fibres optiques – Première partie : Spécification générique (2<sup>e</sup> éd.).
- CEI 874-1**    Connecteurs pour fibres et câbles optiques – Première partie : Spécification générique (2<sup>e</sup> éd.).
- CEI 875-1**    Dispositifs de couplage pour fibres optiques – Première partie : Spécification générique (1<sup>re</sup> éd.).
- CEI 875-1**    Dispositifs de couplage pour fibres optiques – Deuxième partie : Spécification intermédiaire. Coupleur de transmission en étoile (1<sup>re</sup> éd.).
- CEI 875-3**    Dispositifs de couplage pour fibres optiques – Troisième partie : Spécification intermédiaire. Multiplexeur-démultiplexeur en longueur d'onde de 1 à n (1<sup>re</sup> éd.).
- CEI 876-1**    Interrupteurs pour fibres optiques – Première partie : Spécification générique (1<sup>re</sup> éd.).