

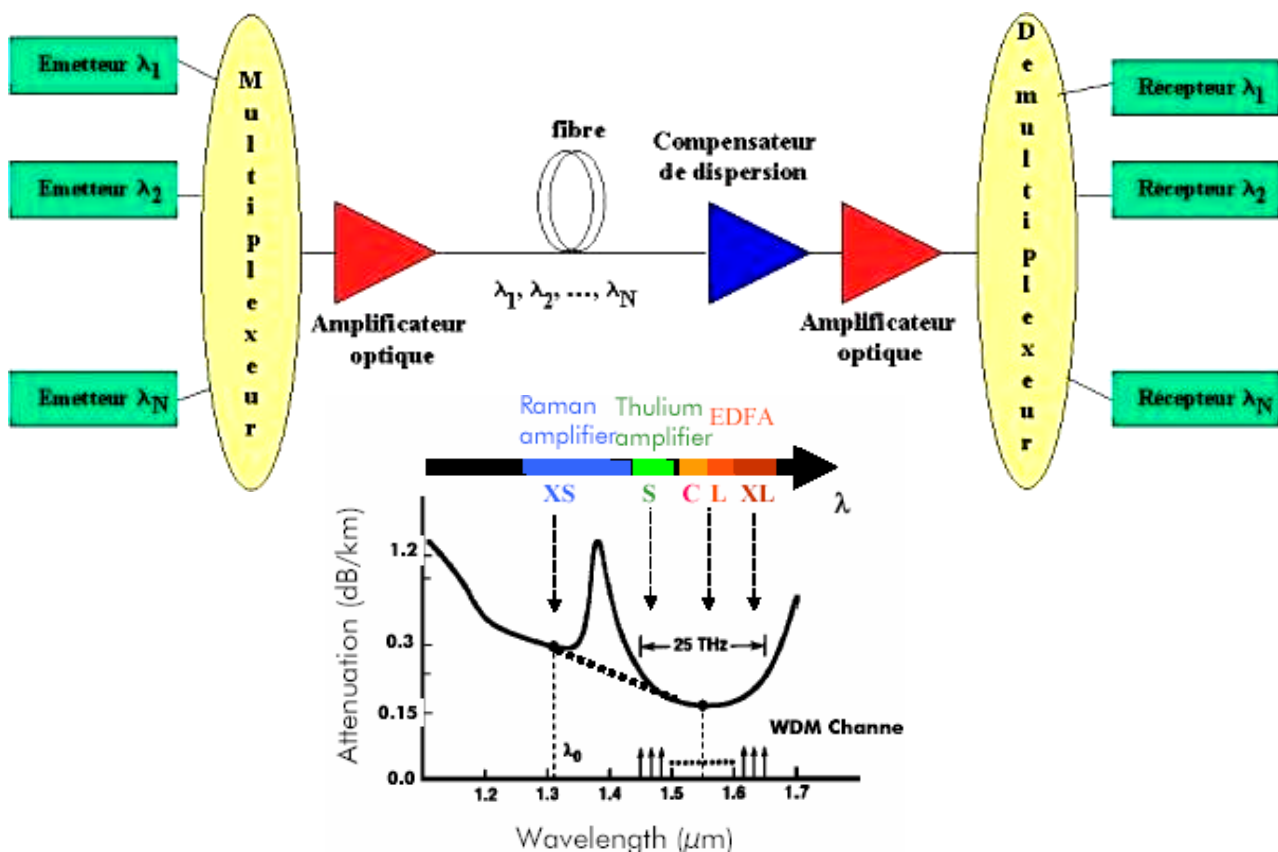
# EXAMEN PROBATOIRE

Présenté au  
Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris  
Département STIC

dans la spécialité  
**ELECTRONIQUE**

Par  
Jérôme LAURENT

## COMMUNICATIONS OPTIQUES A TRES HAUT DEBIT



### ○ Plan :

- *Synoptique des systèmes à transmission optique*
- *Les effets de la dispersion du milieu de transmission*
- *Les conséquences des effets non-linéaires*
- *Techniques de multiplexages*
- *Modules d'émission : "Source"*
- *Modules de réception : "Détection"*
- *Amplificateurs optiques*
- *Probabilité d'erreur et codage du canal de transmission*
- *Quelques applications*

Présenté le 3 décembre 2004



# Remerciements

---

Ce rapport fait le point, sur l'état de l'art des télécommunications optiques à très haut débit, dans le cadre de l'oral probatoire du diplôme d'ingénieur en électronique, préparé au Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris.

Il est le fruit de six semaines de « travail nocturne », le nez plongé dans les articles et ouvrages sur le sujet, les yeux rivés sur l'écran jusqu'à atteindre l'autisme, ou la joue posée gentiment une nuit de novembre sur le clavier, afin de pouvoir y graver AZERTY avant de partir travailler.

Ce travail a pu être finalisé, grâce aux différentes discussions sur le sujet, à la contribution et l'encouragement de ma famille, d'ami(e)s, de collègues de travaux, de compagnons de galère du CNAM, etc.

C'est pourquoi, je tiens à remercier particulièrement Nadia, Bernard, Yacine, Fredo, Jean, Jia,...

Encore merci !

# RESUME

---

Les signaux optiques ont été reconnus capables de transmettre une certaine information depuis des époques très reculées et utilisés dans ce but : citons par exemples les signaux de fumée ou l'héliographe à miroir de Jules Leseurre qui fut construit en 1855 pour établir des liaisons dans le sud Algériens : un obturateur permettait d'envoyer des impulsions longues ou courtes de lumière solaire, et de transmettre ainsi un message en code Morse. Mais l'invention de Chappe en 1791, désignée par le terme de télégraphe optique, fut réellement un système de transmission à grande distance, et représenta un progrès considérable par rapport aux moyens existants à l'époque.

On retrouve donc les notions de base des transmissions optiques actuelles :

- transmission d'information,
- codage de l'information.

Pendant de nombreuses décennies, le cuivre a constitué le matériau de base qui a permis de couvrir notre planète d'un vaste réseau de transmission de l'information. A l'exception importante des réseaux hertziens, dont la place s'est étendue dans le troisième quart du XX<sup>ème</sup> siècle à la suite de développement des faisceaux hertziens centimétriques, puis des télécommunications par satellites, la transmission était en général assurée soit par des lignes bifilaires, soit par des câbles coaxiaux. L'invention du laser en 1960 a ouvert la voie à une autre solution, celle des télécommunications optiques, qui semblait offrir une capacité de transmission quasi-illimitée. De nombreux laboratoires, comme le CENT, centre de recherche de France Télécom, se sont aussitôt lancés dans l'aventure aux perspectives prometteuse, mais encore floues et semées de défis à relever, pour faire de ce rêve une réalité.

« ...Enfin, considérez que les rayons se détournent aussi, en même façon qu'il a été dit d'une balle quand ils rencontrent obliquement la surface d'un corps transparent, par lequel ils pénètrent plus ou moins facilement que par celui d'où ils viennent, et cette façon de se détourner s'appelle en eux **REFRACTION** »

**René DESCARTES, 1596-1650**

Discours premier : de la lumière

Œuvre philosophique : « La Dioptrique » (1637)

# Glossaire

---

<i>APD</i>	<i>Avalanche PhotoDiode</i>
<i>AOSC</i>	<i>Amplificateur Optique à SemiConducteur</i>
<i>AWG</i>	<i>Arrayed Wave Guide Grating</i>
<i>DCF</i>	<i>Dispersion Compensation Fiber</i>
<i>DBR</i>	<i>Distributed Bragg Reflector</i>
<i>DFB</i>	<i>Distributed Feedback Laser</i>
<i>DWDM</i>	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
<i>EDFA</i>	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier (1525-1560 nm)</i>
<i>FBG</i>	<i>Fiber Bragg Grating</i>
<i>FEC</i>	<i>Forward Error Code</i>
<i>FWM</i>	<i>Four Wave Mixing</i>
<i>LASER</i>	<i>Light Amplification by Simulated Emission of Radiation</i>
<i>MEMS</i>	<i>Micro Electro Mechanical Systems</i>
<i>MSM</i>	<i>Metal Semiconducteur Metal</i>
<i>MZ</i>	<i>modulateur Mach-Zehnder</i>
<i>NRZ</i>	<i>Non Return to Zero</i>
<i>NZDSF</i>	<i>Non Zero Dispersion Shift Fiber</i>
<i>OADM</i>	<i>Optical Add/Drop Multiplexer</i>
<i>OTDM</i>	<i>Optical Time Division Multiplexing (ou ElectronicTDM)</i>
<i>OXC</i>	<i>Optical Cross Connect</i>
<i>PDFFA</i>	<i>Parseodymium Doped Fuore Fiber Amplifier (1280-1330 nm)</i>
<i>PHASAR</i>	<i>Phased Array</i>
<i>PIN</i>	<i>Positives Intrinsic Negative photodiodes</i>
<i>PMD</i>	<i>Polarisation Mode Dispersion</i>
<i>PSCF</i>	<i>Pure Silica Core Fiber</i>
<i>RAB</i>	<i>Remote Amplifier Box</i>
<i>RDF</i>	<i>Reverse Dispersion Fiber</i>
<i>RIN</i>	<i>Relative Intensity Noise</i>
<i>RS</i>	<i>Reed-Solomon</i>
<i>SEQ</i>	<i>Shape EQualizer</i>
<i>SPM</i>	<i>Self Phase Modulation</i>
<i>TEQ</i>	<i>Tilt EQualizer</i>
<i>VCSEL</i>	<i>Verical Cavity Surface Emitting Laser</i>
<i>VOA</i>	<i>Variable Optical Attenuator</i>
<i>WDM</i>	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
<i>WDMA</i>	<i>Wavelength Division Multiple Access (AMR<math>\lambda</math>)</i>
<i>XPM</i>	<i>Cross Phase Modulation</i>



# Communications optiques à très haut débit

Jérôme LAURENT

Conservatoire National des Arts Métiers de Paris

Département STIC

Oral Probatoire, Présenté le 3 décembre 2004

<b>1- Introduction</b>	<b>2</b>
<b>2- Synthétique des systèmes à transmission optique</b>	<b>3</b>
2.1. Principe de base	3
2.2. Les fibres optiques monomodes	3
<b>3- Les effets de la dispersion du milieu de transmission</b>	<b>7</b>
3.1. Modulation de fréquence parasite	8
3.2. Dispersion de polarisation (PMD, Polarisation Mode Dispersion)	8
<b>4- Les conséquences des effets non-linéaires</b>	<b>8</b>
4.1. Effets Kerr	9
4.2. Effets Raman et Brillouin	9
<b>5- Techniques de multiplexages</b>	<b>10</b>
5.1. Multiplexage en longueur d'onde (WDM, Wavelength Division Multiplexing)	10
5.2. Multiplexage temporel (TDM, Time Division Multiplexing)	11
5.3. Principe du multiplexage optique	11
<b>6- Module d'émission : Sources</b>	<b>12</b>
6.1. Les diodes lasers	13
6.2. Les modulateurs	15
<b>7- Module de réception : Détection</b>	<b>16</b>
7.1. Photodiodes	17
<b>8- Amplificateurs optiques</b>	<b>18</b>
8.1. Amplificateur optique à semi-conducteurs (AOSC)	18
8.2. Amplificateur optique à fibre dopée (EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier)	19
8.3. Amplificateur Raman	19
<b>9- Probabilité d'erreur et codage du canal de transmission</b>	<b>20</b>
9.1. Probabilité d'erreur (BER, Bit Error Rate)	20
9.2. Code correcteurs d'erreurs (FEC, Forward Error Correction)	21
<b>10- Quelques applications</b>	<b>23</b>
10.1. Liaisons terrestres	23
10.2. Liaisons sous-marines	24
<b>11- Conclusion</b>	<b>26</b>
<b>12- Bibliographie</b>	<b>27</b>
<b>13- Annexes</b>	<b>29</b>
13.1. Les fibres optiques	29
13.2. Les fibres à trous et les MEMS	29
13.3. Code correcteur d'erreur : Reed-Solomon	30
13.4. Transmissions par solitons	31
13.5. Tableau récapitulatif des principaux effets : « causes et remèdes », pour un système fonctionnant à 10 Gb/s.	32

# **1- Introduction**

Afin d'approcher et d'apprécier les techniques des communications optiques à très haut débit, j'aimerais retracer avec vous, leurs histoires, leurs évolutions, montrant ainsi les étapes et l'essor exponentiel que connaissent aujourd'hui ces véritables « Autoroutes de l'Informations ».

Au début des années 50, l'idée de transmettre des signaux à haut débit en utilisant des porteuses dans les régions optiques était déjà établie. Malheureusement, à cette époque là, n'étaient disponibles ni source de lumière, ni milieu de transmission appropriés. En 1960, suite à l'invention de la diode laser, l'attention des chercheurs s'est focalisée sur le développement d'un milieu de transmission adéquate.

A la fin des années 60, le concept de confinement de la lumière, ainsi que la possibilité d'utiliser des fibres optiques, comme milieu de transmission étaient largement diffusés. Le seul problème qui restait à résoudre, était le haut niveau de perte de propagation qui, à l'époque atteignait 1000 dB/km.

Au début des années 70, deux événements ont beaucoup favorisé le développement des transmissions par fibres optiques. D'une part, la première diode laser AsGa a été réalisée. D'autre part, des fibres optiques avec des atténuations de l'ordre de 20 dB/km, pour des longueurs d'onde proche du micron, ont été développées.

La 1<sup>er</sup> génération commerciale de système de communication à fibre optique est disponible dès 1980, (par fibre multimode en silice à  $\lambda = 0,8 \mu\text{m}$  et un répéteur tous les 10 km), atteignant ainsi un débit de 45 Mb/s. En même temps une 2<sup>ème</sup> génération voit le jour, mais cette fois-ci avec des fibres optiques à  $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$ . Alors que la première utilisait des lasers avec des hétérojonctions du type GaAs/GaAlAs, la deuxième utilisait des composants avec des hétérojonctions de type InGaAsP/InP. Au début de leurs introductions, l'avantage le plus important, était une plus faible atténuation des fibres à  $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$  ( $\sim 1 \text{ dB/km}$ ), et donc une augmentation de la distance entre répéteurs, avec un débit de 100 Mb/s (cette limite est due à la dispersion intermodale des fibres multimodes).

A la fin des années 80, grâce aux fibres monomodes, étaient disponibles sur le marché, des systèmes avec des débits de transmission de 1,7 Gb/s, et des séparations entre répéteurs de 50 km avec des fibres monomodes de silice, présentant une atténuation d'environ 0,6 dB/km à  $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$ . D'autre part, le niveau d'atténuation le plus faible, lui se trouve à  $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$  (fenêtre de transmission). Ceci a motivé le développement d'une troisième génération de systèmes de transmission optique.

En 1989, les systèmes utilisent la longueur d'onde à 1,55  $\mu\text{m}$  avec un débit de 10 Gb/s. Cependant pour atteindre ce débit de transmission sur de longue distance, il aura été nécessaire d'utiliser des diodes lasers monomodes et des fibres à dispersion décalée. Pour les systèmes de 3<sup>ème</sup> génération, les distances de régénération atteignent 60 à 70 km en utilisant le schéma classique de la détection d'amplitude (récepteur hétérodyne ou cohérent). En 1990, les amplificateurs optiques dopés à l'erbium (EDFA) apparaissent, ils introduisent un gain de 40 dB, séparés de 60~100 km, ils permettent ainsi des liens de transmissions sur plusieurs milliers de kilomètres (régénération purement optique !!!).

Nous voilà maintenant entrés dans la « 4<sup>ème</sup> génération », avec les techniques de multiplexage temporel (TDM) et multiplexage en longueur d'onde (WDM), couplé aux amplificateurs optiques, sources lasers accordables en longueur d'onde. Cela permet actuellement d'obtenir des débits de transmission de l'ordre de 40 Gb/s (début du très haut débit) sur des dizaines de milliers de km (comme les liaisons transocéaniques) avec des répéteurs tous les 100~150 km. C'est cette technologie de communication optique que nous allons approfondir, à partir du chapitre suivant !

Comme nous le verrons dans le chapitre des perspectives, une 5<sup>ème</sup> génération est en train de se dessiner. Par l'utilisation de nouvelle technique, comme la transmission par soliton, l'emploi de fibre optique à base de cristaux photoniques ( $\mu$ structurées) ou fibre à trous, la transmission en double bande (C+L), la réduction de l'écart spectral entre chaque longueur d'onde, l'augmentation du nombre de longueurs d'ondes, etc. Une fois ces techniques maîtrisées le débit passerait au Tb/s (160 Gb/s  $\sim$  10 Tb/s testé actuellement en laboratoire), certains « pseudo rêveurs » parlent déjà du Pb/s, ce qui laisse entrevoir l'énorme potentiel des communications optiques à très haut débit.



## 2- Synoptique des systèmes à transmission optique

### 2.1. Principe de base

Comme nous l'avons vu en introduction, l'utilité de transmettre l'information de manière optique, est d'obtenir des débits de transmission très importants, et ceci sur les plus grandes distances possible. Les avantages de l'utilisation de la fibre optique sont par exemple: la large bande passante (15 THz à  $\lambda = 1,3$  et  $\lambda = 1,5 \mu\text{m}$ ), donc des débits binaires élevés, leurs affaiblissements minimisés, l'immunité électromagnétique, la faible sensibilité aux facteurs extérieurs (température, humidité...). Leurs faibles encombrements et leurs faibles poids... en font un support de transmission de premier choix.

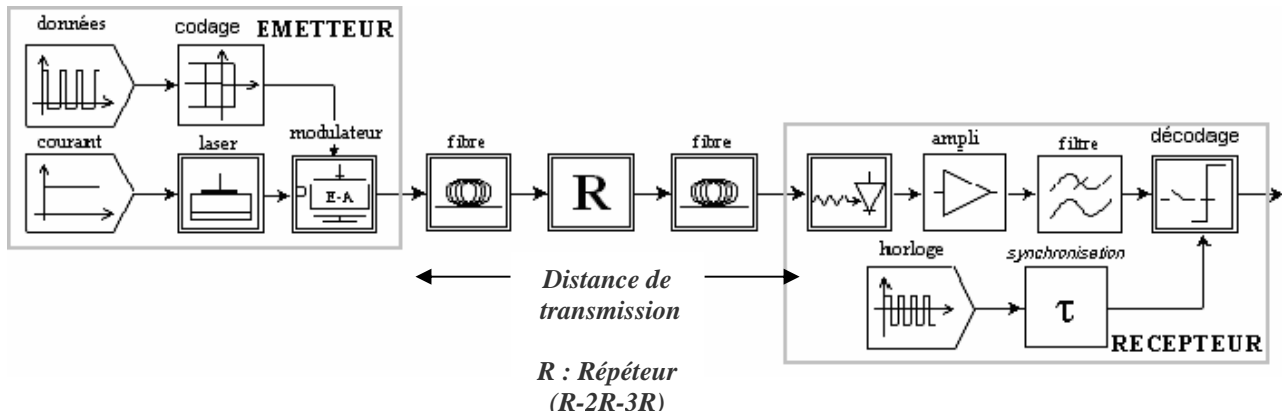


Fig. 1 Schéma de principe d'une ligne de transmission sur fibre optique

L'idée, pour transmettre l'information sur fibre optique, reste basée sur les principes, employés lors des transmissions en bande de base. Dans notre cas, le canal de transmission sera réalisé à l'aide de fibre optique. L'information sera codée (pour augmenter le gain de transmission), convertie en signal lumineux, puis modulée avec une source optique cohérente monochromatique (diode laser). Permettant de porter le signal à  $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$  (fenêtre de transmission des systèmes actuels), bande spectrale où se trouve l'atténuation minimale des fibres optiques, qui sera de type monomodes, dont la principale caractéristique est d'avoir une atténuation d'environ 0,2 dB/km, bien inférieure aux autres type de fibre (gradient d'indice, multimode,...). Propagé sur des distances, le plus souvent importantes (milliers de km), atténué et dispersé, le signal optique aura besoin d'être régénéré (R), remis en forme (2R) voir re-synchronisé (3R), rôle que devront remplir les répéteurs placés tout au long de la ligne. Enfin l'information pourra être récupérée après conversion optoélectronique (photodiode), remis en forme, démodulée (filtre passe-bas) ou ramenée en bande de base, re-synchronisée, puis décodée et corrigée (le taux d'erreur binaire accepté dans les systèmes actuels est un  $\text{TEB} < 10^{-12}$  norme de l'UIT, Union International des Télécommunication).

### 2.2. Les fibres optiques monomodes

Une onde lumineuse, est une onde électromagnétique composée des champs électrique et magnétique E et B, elle se propage aux vitesses  $c^2 = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} = 3.10^8 \text{m/s}$  dans le vide et  $v = \frac{c}{n} \Rightarrow \lambda = \frac{c}{nf}$  dans un milieu d'indice n. Si  $n_2 > n_1$  le rayon s'écarte de la normale et si  $\theta_1 > \arcsin(n_2/n_1)$ , il y a réflexion totale.

Equ. 1  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$  Loi de Snell-Descartes

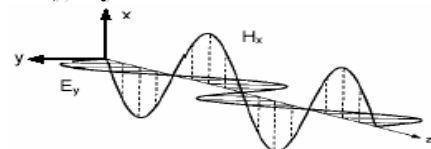


Fig. 2 Propagation optique

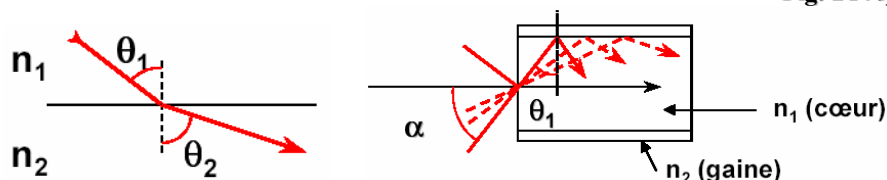


Fig. 3 Angle d'incidence d'entrée dans une fibre optique

L'angle d'incidence maximal ( $\alpha_{\max}$ ) à l'entrée d'une fibre c'est à dire l'ouverture du cône d'acceptance, appelée ouverture numérique, est défini par la relation suivante :

$$\text{Equ. 2} \quad \text{ON} = \sin \alpha_{\max} = n_1 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{\text{lim}}\right) = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}$$

Les fibres optiques sont des guides d'onde où la propagation des signaux lumineux se décrit au moyen de modes de propagation, chaque mode étant une solution spécifique de l'équation d'onde. La fibre est essentiellement constituée d'un cœur entouré d'une gaine, l'indice de réfraction du cœur étant légèrement supérieur à celui de la fibre. Si le rayon du cœur est suffisamment petit, la fibre accepte seulement le mode fondamental de propagation, ce qui est le cas des fibres monomodes. A l'heure actuelle les fibres monomodes présentent la bande passante la plus large et le niveau de pertes le plus bas. C'est pourquoi elles sont universellement utilisées pour la transmission de signaux à haut débit et sur de longues distances. La figure 4, illustre la topologie d'une fibre monomode.

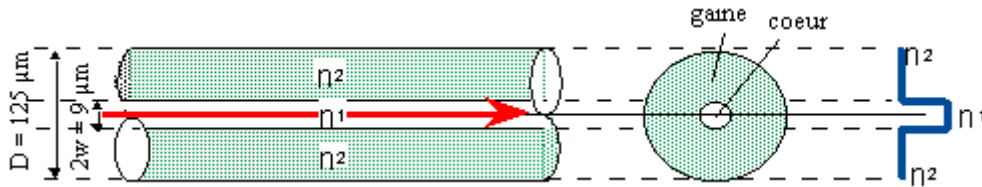


Fig. 4 Topologie d'une fibre optique monomode

Au niveau des télécommunications, une autre caractéristique est essentielle : la propagation monomode. En effet, pour éviter qu'un signal de longueur d'onde  $\lambda$  transmis par la fibre arrive en plusieurs temps, il ne doit se propager qu'avec une seule vitesse. Pour cela, la condition suivante sur le rayon du cœur  $a$ , doit être vérifiée :

$$\text{Equ. 3} \quad a \leq \frac{2,405\lambda}{2\pi\sqrt{n_1^2 - n_2^2}} \Rightarrow \lambda_c = \frac{2\pi}{2,405} a \text{ON} \quad \lambda_c \text{ longueur d'onde de coupure de la fibre}$$

### 2.2.1. Atténuations linéique

Le niveau de puissance d'un signal qui se propage dans une fibre optique, s'affaiblit exponentiellement en fonction de la distance de propagation :  $P(z) = P_{\text{in}} e^{-\alpha z}$ . Où  $\alpha$  est le coefficient d'atténuation (Neper/m), mais l'atténuation s'exprime plus généralement en dB/km (linéique).

$$\text{Equ. 4} \quad A = \frac{10}{L} \log \left( \frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{out}}} \right) \quad \text{Relation liant A et } \alpha : A_{\text{dB/km}} = 4,34 \cdot 10^3 \alpha_{\text{m}^{-1}}$$



Fig. 5 Effet de l'atténuation

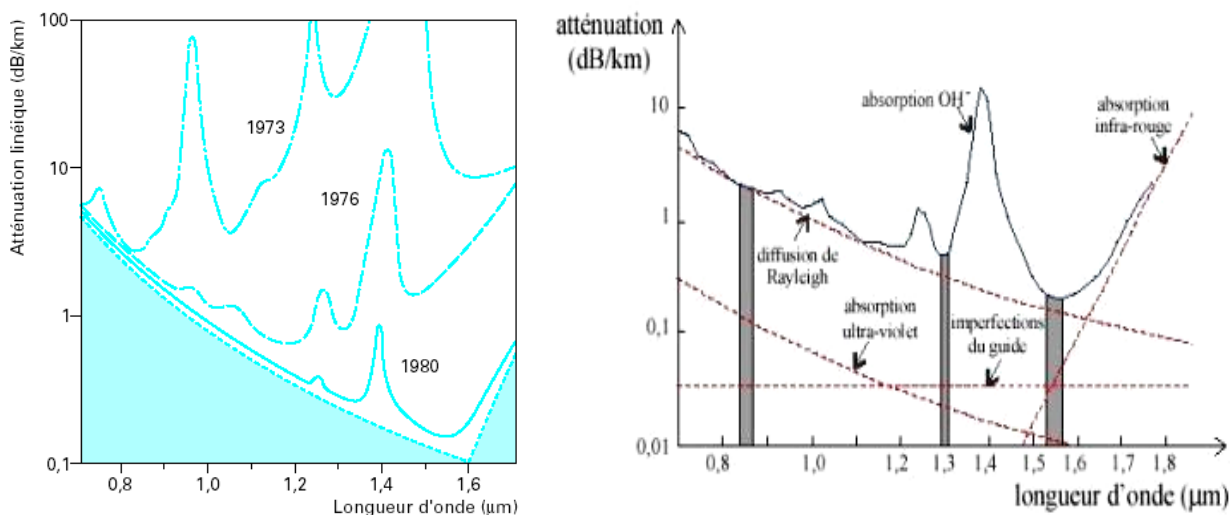
L'atténuation dans les fibres monomodales est due à plusieurs effets :

- L'absorption intrinsèque du matériau constitutif provoque une augmentation très rapide des pertes aux basses longueurs d'onde ( $\lambda = 1,8 \mu\text{m}$ ). En plus la présence d'impuretés peut créer diverses bandes d'absorptions, la plus forte d'entre elles, correspond à la résonance de l'ion  $\text{OH}^-$  à  $\lambda = 1,39 \mu\text{m}$ .

- La combinaison de l'effet Rayleigh et de l'absorption intrinsèque multiphonons, conduit à un minimum théorique d'atténuation de 0,14 dB/km à  $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ . Les irrégularités involontaires de structure provoquent des pertes par diffusion.

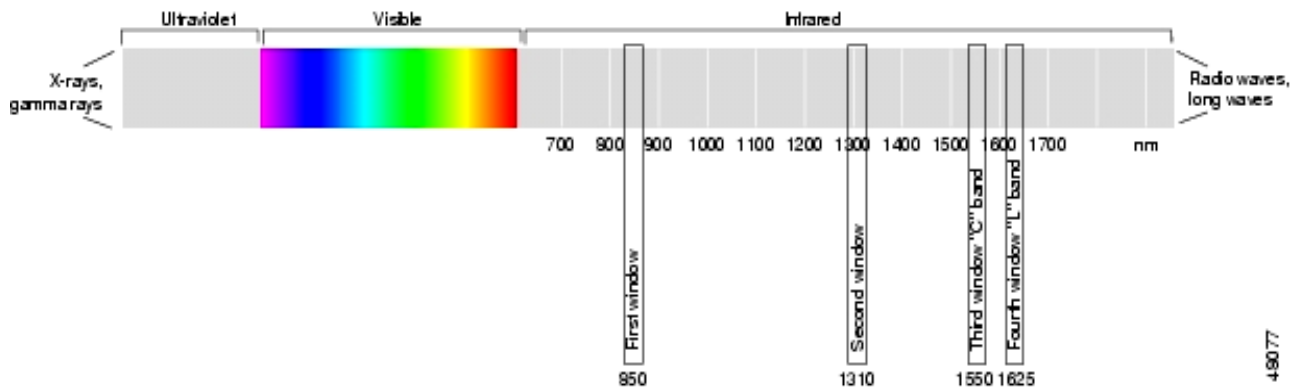
- L'effet Rayleigh, dû aux fluctuations de composition dans le verre (d'origine thermodynamique), est inévitable. Il provoque une montée en  $\lambda^{-4}$  de l'atténuation aux courtes longueurs d'ondes.
- Autre effet beaucoup plus sensible aux grandes longueurs d'ondes : lorsque la fibre est courbée, une partie de l'énergie lumineuse est réfractée, donc échappe au guidage et se perd dans la gaine. Ce phénomène s'appelle « perte par courbure ».
- Autre phénomène, qui intervient cette fois-ci, lors de la fabrication même de la fibre, le phénomène appelé « perte par micro-courbure ». Lorsque celle-ci est soumise à des contraintes mécaniques (allongement, écrasement, torsion...), celles-ci provoquent des microdéformations du cœur, entraînant ainsi des pertes de lumière. A peu près indépendantes de la longueur d'ondes, ces pertes augmentent très vite lorsque le diamètre de la fibre diminue (9  $\mu\text{m}$  pour une fibre monomode).
- Enfin, les fibres sont toujours utilisées par tronçons de longueur finie raccordés par des épissures (soudure laser). Chaque épissure peut provoquer une perte de raccordement.

La figure 6 montre à la fois les progrès réalisés en trente ans sur la diminution de l'atténuation spectrale d'une fibre et l'atténuation actuelle dans les fibres modernes en silice. Elle montre en même temps les pertes expliquées plus haut et les fenêtres de transmission judicieusement choisies pour les transmissions optiques. L'atténuation minimale de 0,22 dB/km est très proche du minimum théorique pour la silice.



**Fig. 6** Atténuation spectrale dans une fibre optique

La figure 7, permet de montrer plus explicitement la position spectrale des fenêtres de transmissions, par rapport au spectre infrarouge, visible et ultraviolet.



**Fig. 7** « Spectre lumineux »

Un petit mot tout de même sur le vieillissement de la fibre, il est garanti pour un fonctionnement normal égal voir supérieur à 25 ans, ceci montre encore une fois l'énorme intérêt d'utiliser les fibres optiques (gage de fiabilité), comme support de transmission.

### 2.2.2. Dispersion chromatique

A l'heure actuelle, c'est la dispersion, et non pas l'atténuation, le facteur limitant de la transmission de signaux à haut débit sur de longues distances. La dispersion chromatique se manifeste par un élargissement des impulsions au cours de leur propagation, comme le montre la figure 8, (la fibre se comporte donc comme un filtre passe-bas).

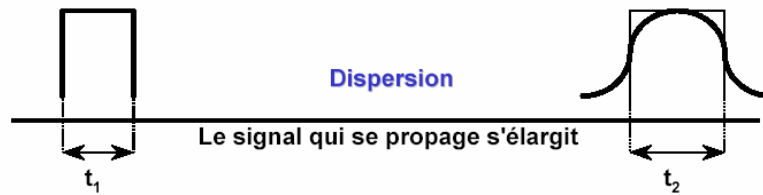


Fig. 8 Effet de la dispersion chromatique

La figure 9, montre un graphe de dispersion chromatique (en ps/nm.km), en fonction de  $\lambda$  (en nm). Calée sur les fenêtres de transmission actuelles, dans la silice et sur les régions proche de l'infrarouge, la dispersion est: négative aux longueurs d'ondes courtes, nulle à la longueur d'onde à peu près de 1,3  $\mu\text{m}$ , et positive aux longueurs d'onde plus larges. Dans une fibre monomode standard, le coefficient de dispersion chromatique est à peu près de  $\pm 4$  ps/nm.km à une longueur d'onde de 1,3  $\mu\text{m}$ , et à peu près de 17 ps/nm.km à une longueur d'onde de 1,55  $\mu\text{m}$ . La dispersion du guidage dépend de la géométrie du matériau de la fibre. Dans la pratique, il est possible d'ajuster ce type de dispersion pour compenser la dispersion du matériau et ainsi obtenir des fibres optiques à dispersion décalée dans lesquelles le zéro de dispersion se trouve à 1,55  $\mu\text{m}$ . Il est également possible d'obtenir des fibres optiques à dispersion plates, qui présentent une dispersion faible dans l'intervalle de longueur d'onde entre 1,3  $\mu\text{m}$  et 1,55  $\mu\text{m}$ .

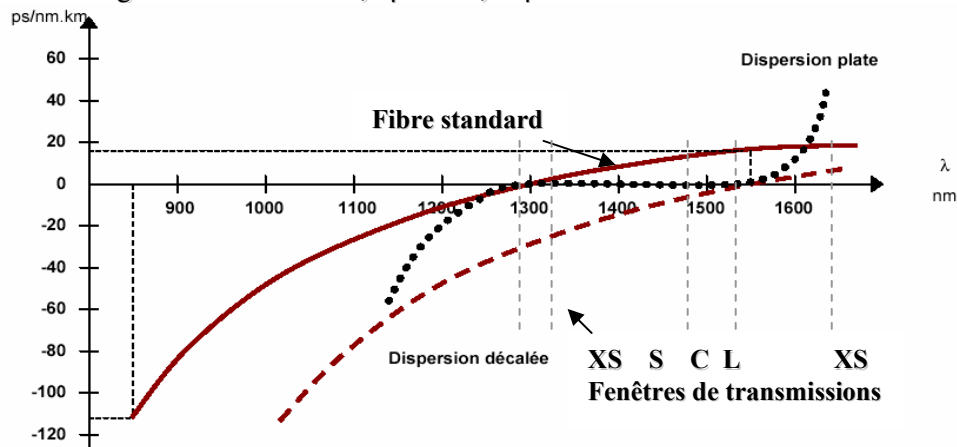


Fig. 9 Graphe de dispersion chromatique

### 2.2.3. Les fibres de compensation

La dispersion chromatique peut être compensée par un dispositif créant des fonctions de transfert inverse de celle d'une fibre standard, comme les fibres à compensation de dispersion (DCF, Dispersion Compensative Fiber). On peut aussi citer trois autres types de fibre de compensation, PSCF (Pure Silica Core Fiber), NZDSF (Non Zero Dispersion Shift Fiber), RDF (Reverse Dispersion Fiber), le graphe ci-dessous, montre comment compenser la dispersion chromatique sur la ligne.

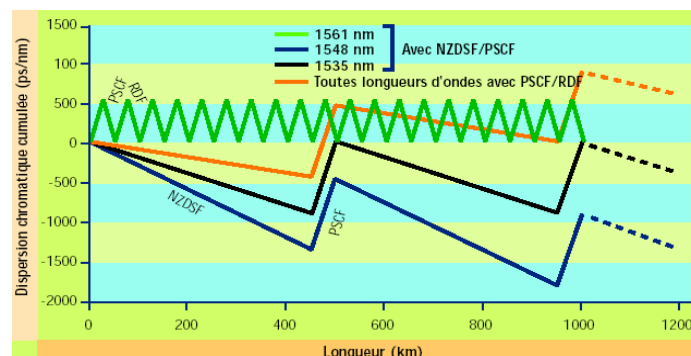


Fig. 10 Exemple d'utilisation de fibre de compensation

### 2.2.4. Bande passante de la fibre monomode

Pour une fibre monomode, la bande passante est définie par la relation suivante qui est inversement proportionnelle à  $D(\lambda)$  dispersion chromatique, à l'écart spectral (en nm) du laser et la longueur  $L$  de la fibre, soit :

$$\text{Equ. 5} \quad B = \frac{0,35}{D(\lambda) \Delta \lambda L}$$

### 2.2.5. Débit binaire – longueur de fibre

Pour une largeur spectrale  $\Delta \lambda$  et un coefficient de dispersion chromatique  $D(\lambda)$  donné, la valeur maximale du couple débit binaire x longueur de fibre ( $\text{Db} \times L$ ) peut se traduire par la relation suivante :

$$\text{Equ. 6} \quad (\text{Db} \cdot L)_{\max} = \frac{1}{2D(\lambda) \cdot \Delta \lambda}$$

Enfin le tableau suivant présente une synthèse des fibres utilisées dans ce type de transmission, qui sont défini par les normes UIT en vigueur.

Tableau. 1 <i>Exemples de caractéristiques de quelques fibres optiques normalisées</i>					
Norme UIT (Union International des Télécommunications)		G. 652 monomode	G. 653 monomode	G.655 (NZDSF)	G.655 (Téralight)
Propriétés géométriques	Diamètre coeur ( $\mu\text{m}$ )	9	9	9	9
	Diamètre fibre ( $\mu\text{m}$ )	125	125	125	125
Propriétés optiques (à 1550 $\mu\text{m}$ )	Atténuation (dB/km)	0,25	0,25	0,25	0,22
	Dispersion Chromatique (ps/nm/km)	17	0	0,07	8
	Coefficient de non-linéarité ( $\text{W/m}^2$ )	$2,7 \cdot 10^{-20}$	$2,7 \cdot 10^{-20}$	$2,7 \cdot 10^{-20}$	$2,7 \cdot 10^{-20}$
	Section effective ( $\mu\text{m}^2$ )	80	57	57	65
	PMD ps.km <sup>-1/2</sup>	0,05 à 0,08	0,1 max.	0,1 max.	0,04

## 3- Les effets de la dispersion du milieu de transmission

L'interférence entre symboles est la conséquence de l'effet de dispersion du milieu de transmission sur les signaux transmis qui se retrouvent déformés. Cette déformation entraîne, pour un rapport signal à bruit donné, une dégradation de la probabilité d'erreur, ou une diminution de la sensibilité du récepteur. Dans notre cas c'est la dispersion chromatique qui est responsable de la déformation des impulsions et de l'interférence entre symbole.

Le paramètre de dispersion chromatique  $D(\lambda_s)$  (en ps/(nm.km)), est défini comme la dérivée du temps de propagation de groupe (en ps) par rapport à la longueur d'onde (en nm) pour une longueur de fibre  $L$ . Sur une largeur  $\Delta \lambda$  autour de  $\lambda_s$ , la variation de temps de groupe  $\Delta \tau_g$  est donc :

$$\text{Equ. 7} \quad \tau_g = \frac{L}{v_g} = L \frac{d\beta}{d\omega} \quad \frac{\Delta \tau_g}{\Delta \omega} = \frac{d\tau_g}{d\omega} = L \frac{d^2 \beta}{d\omega^2} = L \beta_2(\lambda_s)$$

$$\text{Equ. 8} \quad \Delta \tau_g = D(\lambda_s) \cdot \Delta \lambda \cdot L \quad \text{avec} \quad \lambda = c/f$$

La dispersion chromatique peut aussi être caractérisée par la dérivée seconde de la phase par rapport à la pulsation  $\omega$ , définie à la longueur d'onde  $\lambda_s$ , que l'on note  $\beta_2(\lambda_s)$ , reliée à D par la relation :

$$\text{Equ. 9} \quad D(\lambda_s) = -\frac{2\pi \cdot c \cdot \beta_2(\lambda_s)}{\lambda_s^2} = -(6\pi \cdot 10^5) \frac{\beta_2(\lambda_s)_{(ps^2 / km)}}{\lambda_s^2_{(nm)}}$$

### 3.1. Modulation de fréquence parasite

Dans de tel systèmes, la modulation de l'information est souvent accompagnée d'une modulation de fréquence parasite, appelée « chirp », qui peut être due à la dispersion chromatique, mais également à la conversion amplitude-fréquence des lasers.

### 3.2. Dispersion de polarisation (PMD, Polarisation Mode Dispersion)

En principe, la polarisation dans une fibre parfaitement circulaire ne devrait pas évoluer le long de la fibre. Un petit tronçon de fibre apparaît généralement comme une lame biréfringente avec un mode dit rapide et un mode dit lent qui ont des polarisations rectilignes orthogonales. De plus, dans une fibre réelle, cette biréfringence et la direction des axes propres varient constamment et de manière incontrôlée, la polarisation devient alors rapidement imprévisible.

Ce phénomène est dû à la non-symétrie de la révolution du profil d'indice dans le cœur de la fibre, non-symétrie intrinsèque à la fabrication de la fibre et/ou extrinsèque lors de la pose de la fibre. Les origines intrinsèques peuvent être une symétrie géométrique circulaire imparfaite de la fibre (non-homogénéité de l'indice). Les causes extrinsèques peuvent être dues à un écrasement, un étirement, une torsion ou une courbure de la fibre.

Ceci induit un effet photo-élastique, d'où une biréfringence et une polarisation variable. Quand on envoie un signal sur une fibre biréfringente, sans se soucier de sa polarisation, on excite les deux modes à la fois. Chacun d'entre eux a sa propre vitesse de propagation. Ce décalage des temps de propagation de groupe a pour effet le dédoublement du signal à la sortie de la fibre, et donc un brouillage de l'information.

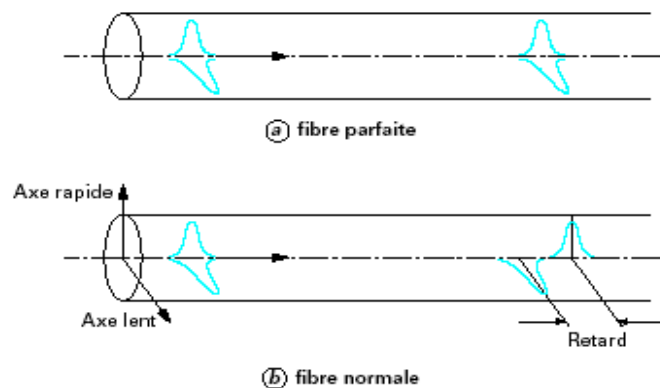


Fig. 11 Illustration des effets de la dispersion modale de polarisation PMD

La fibre optique apparaît ainsi comme un milieu fluctuant. La valeur moyenne du retard n'est donc pas suffisante pour le décrire totalement, il faut donc ajouter des données statistiques. La mesure principale est le temps de groupe différentiel (DGD Differential Group Delay), entre les deux composantes correspondant aux états principaux de la propagation.

$$\text{Equ. 10} \quad \text{DGD} = \text{biréfringence linéique} \times (\text{longueur de couplage} \times \text{longueur de la fibre})^{1/2}$$

## 4- Les conséquences des effets non-linéaires

Les systèmes de télécommunication sur fibre optique sont conçus dans l'hypothèse d'une transmission linéaire, les effets non-linéaires sont alors des effets parasites qui dégradent les performances quand les puissances véhiculées deviennent élevées. Aujourd'hui les systèmes de transmission à haut débit et grande



distance utilisent des amplificateurs de puissance à l'émission, ce qui conduit à des puissances injectées dans la fibre très élevées et des effets non-linéaires non négligeables.

#### 4.1. Effets Kerr

L'effet Kerr en optique géométrique est une extension des lois de réfraction de la lumière lors de la propagation de cette lumière dans des milieux d'indices variables. L'indice de réfraction  $n$  peut alors s'exprimer sous la forme d'une fonction non-linéaire, du champ électrique  $E$  (anisotropie du matériau).

$$\text{Equ. 11} \quad n = n_0 + n_2 |E|^2$$

Cet effet prend une importance considérable dans l'industrie des télécommunications. Une première conséquence de l'effet Kerr se traduit par de l'automodulation de phase, de la modulation de phase croisée et du mélange à quatre ondes.

##### 4.1.1. Automodulation de phase (SPM, Self Phase Modulation)

La variation de l'indice de réfraction en fonction, de la puissance présente localement dans la fibre, induit une modulation de phase parasite qui, sous l'effet de la dispersion chromatique, se traduit par un élargissement de l'impulsion et donc la création d'interférences entre symboles. Elle est bien sûr liée à la puissance injectée.

##### 4.1.2. Modulation de phase croisée (XPM, Cross Phase Modulation)

L'indice de réfraction vu par le signal se propageant dans un canal est modifié par les impulsions se propageant dans les autres canaux. Quand une impulsion est transportée dans un canal, elle subit une modulation de phase et se retrouve, après croisement, affectée d'un déphasage proportionnel à la puissance du signal interférant. Ce déphasage constant n'a pas d'influence ensuite sur la suite de la propagation, sauf dans le cas où le croisement se fait dans un amplificateur de ligne. Dans ce cas en effet, l'impulsion interférant voit sa puissance variée à la traversée de l'amplificateur et le signal perturbé est donc affecté d'un déphasage dépendant du temps, ce qui entraînera une déformation sous l'effet de la dispersion chromatique.

La grandeur significative est la longueur de battement (walk-off) qui peut-être reliée à la durée des impulsions  $T$ , la dispersion chromatique  $D$ , et l'écart spectral  $\Delta\lambda$  entre chaque canal :

$$\text{Equ. 12} \quad L_{wo} = \frac{T}{D \Delta \lambda}$$

*L'impulsion s'élargit d'autant plus vite, que la dispersion est grande !*

##### 4.1.3. Mélange à quatre ondes (FWM, Four Wave Mixing)

Si deux ondes se propagent dans la fibre, la non-linéarité induit une modulation de phase croisée, ainsi que des phénomènes connus sous le nom de mélange à trois ou quatre ondes, sources d'intermodulation entre les différents canaux d'un système de transmission utilisant plusieurs longueurs d'ondes. Le battement de deux canaux aux fréquences  $f_1$  et  $f_2$  engendre des produits d'intermodulation aux fréquences  $2f_1 - f_2$  et  $2f_2 - f_1$  dont l'effet est particulièrement néfaste lorsqu'une de ces fréquences est égale à celle d'un autre canal multiplex.

#### 4.2. Effets Raman et Brillouin

- L'effet Raman est le plus connu des effets non linéaires. Il s'agit d'une interaction photon-phonon, c'est-à-dire d'échange d'énergie entre l'onde optique et les vibrations du matériau.

- L'effet Brillouin est de même nature que la diffusion de Raman, mais l'interaction se fait avec des phonons acoustiques, c'est-à-dire avec les vibrations de l'ensemble du matériau, qui se propagent à la vitesse des ondes acoustiques.

Ces effets sont sensibles dès que la puissance injectée dépasse un certain seuil. Une solution mise en œuvre pour les combattre consiste à moduler en amplitude à très basse fréquence le courant d'injection des lasers

par un signal sinusoïdal, ceci provoque une modulation de fréquence du signal optique émis et élargit le spectre jusqu'à quelques GHz.

La combinaison des effets linéaires et non-linéaires, joue un rôle essentiel. En effet l'automodulation de phase se traduit par une modulation de fréquence parasite, avec augmentation de la fréquence instantanée à l'avant de l'impulsion. Dans les conditions de dispersion normale ( $\beta_2(\lambda_s)$  positif), la tête de l'impulsion se propage encore plus rapidement tandis que l'arrière se propage encore plus lentement. La dispersion chromatique et l'effet Kerr se conjuguent pour élargir l'impulsion. En revanche dans les conditions de dispersion anormale ( $\beta_2(\lambda_s)$  négatif), l'avant de l'impulsion se trouve ralenti tandis que l'arrière est accélérée : les deux effets jouent en sens inverse et on peut imaginer qu'ils se compensent exactement, ce qui entraînerait alors que l'impulsion ne se déformerait pas au cours de la propagation (régime soliton). Dans ce régime de propagation particulière, la dispersion chromatique et les effets non-linéaires ne sont plus des facteurs de dégradation, mais au contraire des effets du milieu de propagation dont la propagation conduit à la non-déformation des signaux transmis.

## 5- Techniques de multiplexages

La bande passante potentielle d'une fibre optique, définie comme la fenêtre sur laquelle l'atténuation reste suffisamment faible pour permettre la transmission, est énorme 15 THz autour de 1,3  $\mu\text{m}$  et autant autour de 1.5  $\mu\text{m}$ . Théoriquement, même en utilisant un code binaire, les débits qui peuvent être transmis sont donc extrêmement élevés. Néanmoins, l'utilisation de cette capacité théorique se heurte à divers problèmes, ne serait-ce que la dégradation due à l'interférence entre symboles provoquée par la dispersion de la fibre, qui devient de plus en plus importante lorsque le débit augmente, et le traitement électronique avant modulation et après détection.

C'est pourquoi au lieu de transmettre une seule onde optique à la fois, l'idée est de partager le débit numérique à transmettre  $D_b$  entre  $N$  porteuses optiques à différentes longueurs d'onde transmettant chacune un débit  $D_b/N$ .

### 5.1. Multiplexage en longueur d'onde (WDM, Wavelength Division Multiplexing)

Le multiplexage en longueur d'onde consiste à utiliser des longueurs d'ondes distinctes pour transmettre différents signaux sur une même fibre. Cette technologie a permis d'élargir le débit de transmission dans les liens point à point. Plusieurs signaux générés indépendamment dans le domaine électronique sont convertis vers le domaine optique en utilisant des diodes lasers de différentes longueurs d'onde (modulation sur porteuse optique). Les signaux résultants sont ensuite multiplexés et couplés à une fibre optique.

Dans le récepteur, un démultiplexeur sépare les différentes longueurs d'ondes qui sont ensuite reconverties vers le domaine électronique au moyen de photodiodes. La capacité d'un système WDM peut être augmentée en jouant soit sur le débit de chaque canal, soit sur le nombre de canaux. La figure 12 montre le schéma de principe DWM avec trois longueurs d'ondes.

Cette technique de multiplexage optique a été rendue possible grâce au développement d'amplificateurs optique qui eux aussi possèdent une très grande bande passante, et qui permet une régénérescence purement optique des signaux.

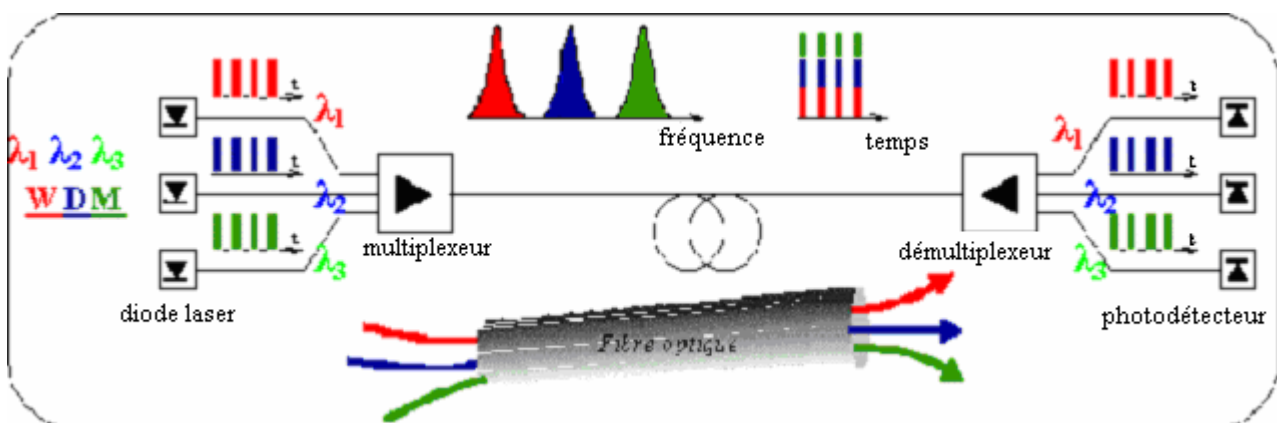


Fig. 12 Schéma de principe du multiplexage WDM



## 5.2. Multiplexage temporel (TDM, Time Division Multiplexing)

La méthode fréquentielle n'est pas la seule méthode possible de multiplexage. Une autre technique est le multiplexage temporel (optique OTDM ou électrique ETDM). L'émetteur est constitué par N sources en parallèles modulées au débit de  $D_b/N$  bit/s dans des modulateurs dont les signaux de sortie sont multiplexés. Cette technique nécessite que les impulsions soient de type RZ (retour à zéro), de durée inférieure à  $T/N$  (T, période d'une impulsion) afin que le multiplexage puisse se faire sans recouvrement.

C'est alors le temps, et non plus le spectre, qui est partagé entre les différents utilisateurs. Chacun d'entre eux dispose d'une tranche temporelle pour émettre et les différents signaux sont mis ensemble pour être transmis sur une porteuse optique unique. La figure 13, illustre le principe de multiplexage temporel optique.

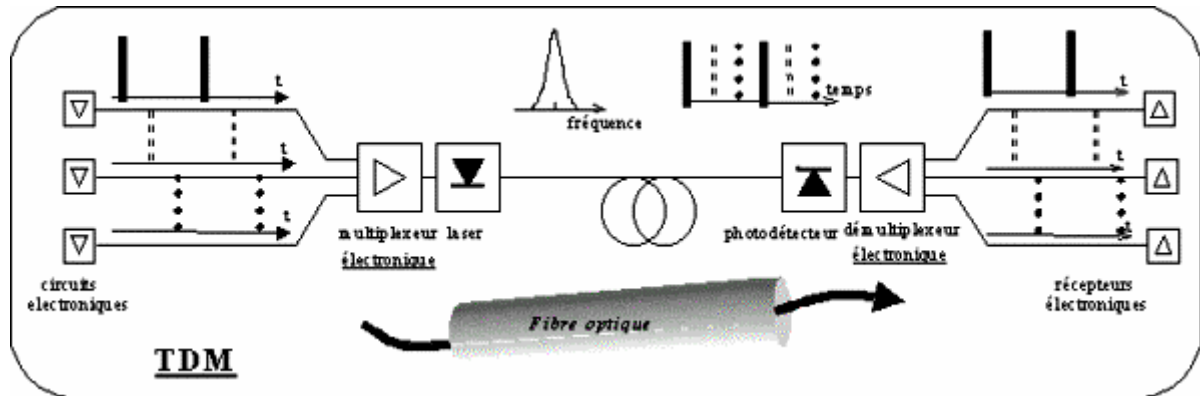


Fig. 13 Schéma de principe du multiplexage ETDM

## 5.3. Principe du multiplexage optique

La fonction d'un multiplexeur à fibre optique consiste à réunir sur la même fibre optique de sortie, les signaux optiques portés par N longueurs d'ondes optiques différentes qui se propagent dans chacune des N fibres optiques d'entrées. La fonction réalisée par un démultiplexeur est réciproque et consiste à répartir sur N fibres optiques distinctes, chacune des N longueurs d'ondes optiques se propageant dans la fibre optique d'entrée.

Ces fonctions font appel aux filtrages optiques, et ces techniques permettent de traiter un grand nombre de signaux proches, les uns des autres en terme de fréquence (DWDM Dense Wavelength Division Multiplexing). Plusieurs technologies sont utilisées :

- Les réseaux de diffraction
- Les phasars
- Le filtrage interférentiel
- Les réseaux de Bragg

### 5.3.1. Réseaux de diffraction

Un réseau de diffraction est constitué d'une surface optique sur laquelle est gravée un grand nombre de traits. Ce réseau réfléchit les différentes longueurs d'ondes optiques du faisceau incident et séparées angulairement, l'angle de diffraction étant fonction de l'espacement des traits et de l'angle d'incidence du faisceau. Ce type de réseau peut (dé)multiplexer simultanément un grand nombre de longueurs d'ondes. La figure 14 illustre ce type de réseau.

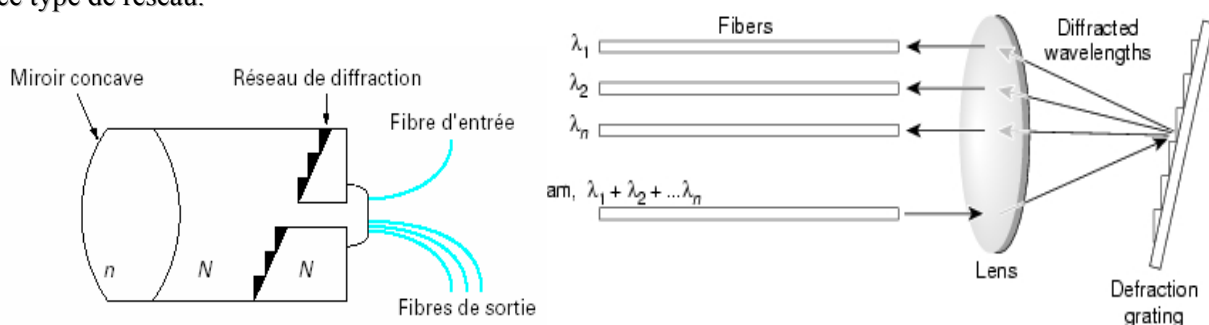


Fig. 14 Multiplexage à réseau de diffraction

### 5.3.2. Les phasars

Le principe du phasar (Phased Array ou AWG Arrayed Wave Guide Grating) est schématisé sur la figure 15. Le dispositif comporte en entrée un coupleur étoile qui répartit sur les différents guides les signaux optiques présents en entrée. Le réseau de guide est conçu pour que le déphasage entre deux guides voisins soit de  $\lambda_c$ , longueur d'onde centrale de la bande passante optique traitée. Ainsi après le deuxième coupleur étoile, toute la puissance optique à  $\lambda_c$  est couplée aux guides voisins successifs.

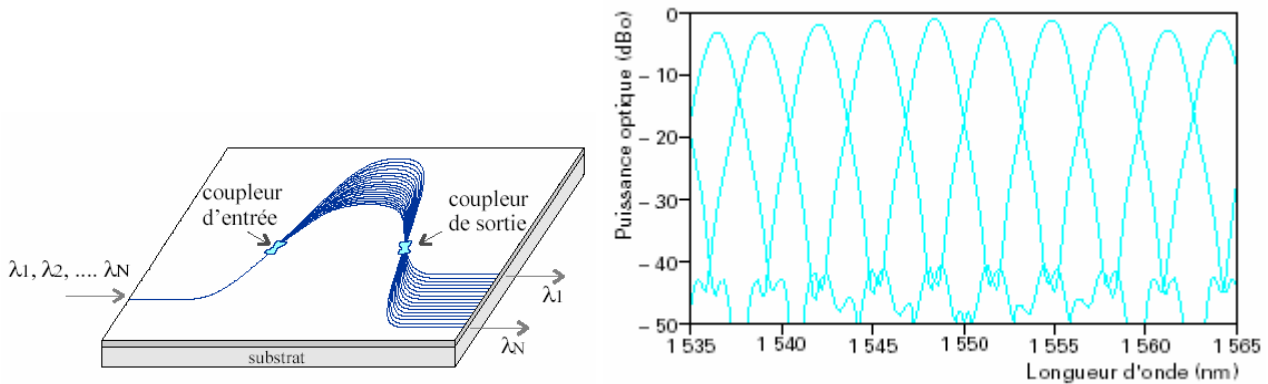


Fig. 15 Schéma d'un phasar à droite et sa réponse spectrale à gauche

### 5.3.3. Les filtres

Un autre principe de démultiplexeur employé, est illustré par la figure 16, ils utilisent des filtres optiques ne laissant passer qu'une seule longueur d'onde, les autres étant réfléchies.

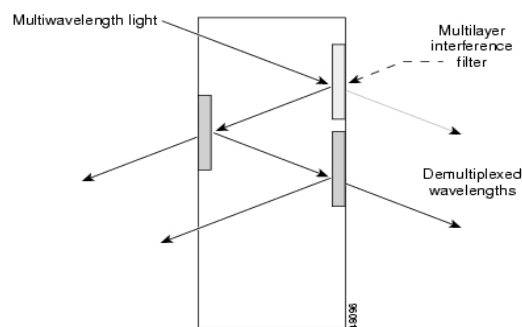


Fig. 16 Multiplexage par lame de filtrage

Il existe d'autres solutions techniques pour ces fonctions de (dé)multiplexage. On peut citer l'utilisation de réseaux de Bragg photo-inscrits dans les fibres optiques ou celle de filtres optiques multi-diélectriques. Ces dispositifs ne sont pas proposés aujourd'hui pour un grand nombre de canaux, cette situation devrait évoluer.

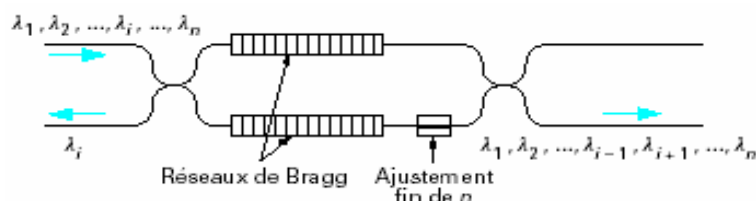


Fig. 17 Principe du multiplexeur avec une fibre à réseau de Bragg (FBG, Fibre Bragg Grating)

## 6- Module d'émission : Sources

La figure 18 présente le schéma d'un module d'émission en modulation directe ou externe. On reconnaît les blocs fonctionnels principaux suivants :

- La tête optique (diode laser) avec son système de couplage à la ligne optique et le dissipateur,
- Un circuit de contrôle et régulation des effets de température interne ou externe,
- Un mélangeur ou modulateur (électronique pour la méthode direct ou optique pour la méthode externe),
- Un circuit de conversion optoélectronique pour la méthode externe,

- Une détection et signalisation de mauvais fonctionnement, génération d'alarme,
- L'information est préalablement codée...

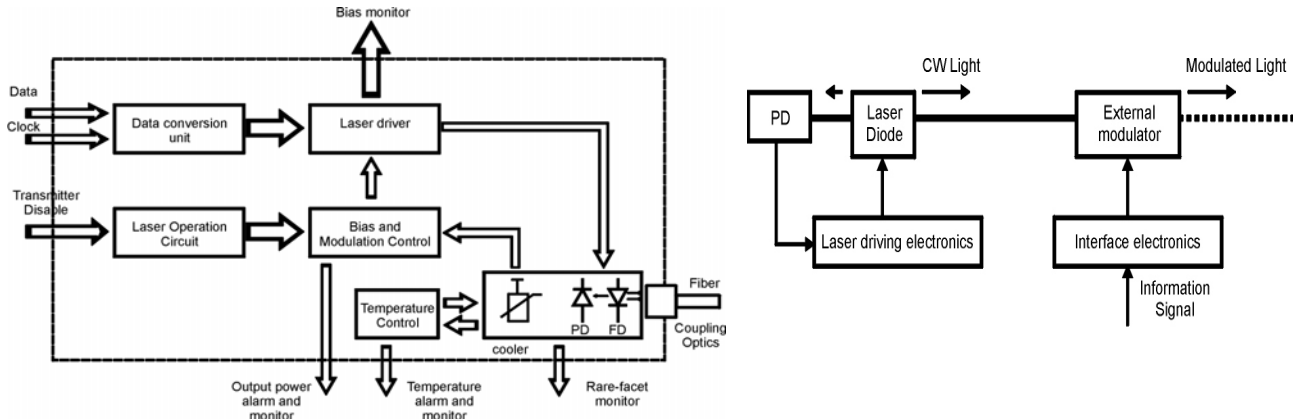


Fig. 18 Schéma synoptique d'un module d'émission: Modulation directe à droite et externe à gauche

### 6.1. Les diodes lasers

Une diode laser est un composant capable de produire un rayonnement par émission stimulée comme l'indique l'acronyme dont le mot est issu : *Light Amplifier by Stimulated Emission of Radiation*.

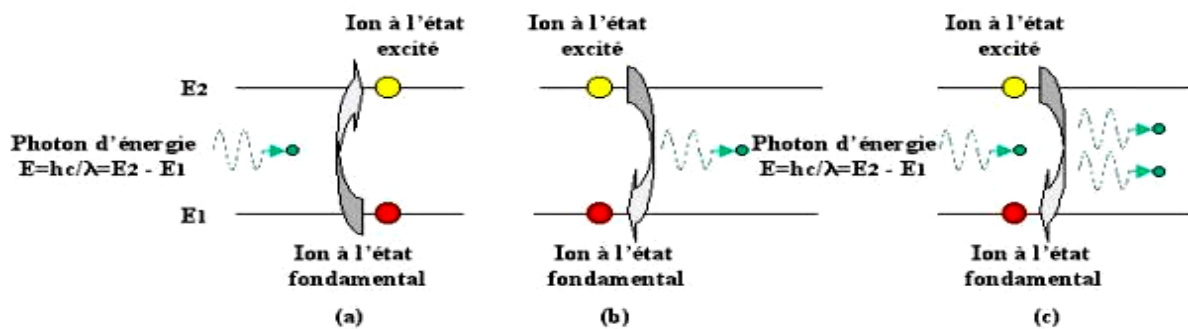


Fig. 19 Schéma des processus d'absorption (a), d'émission spontanée (b) et d'émission stimulée (c).

En pratique, il s'agit de faire passer un signal lumineux plusieurs fois dans un amplificateur grâce à une boucle de contre-réaction. Le système permettant la circulation est généralement appelé résonateur ou cavité (résonante). Deux résonateurs typiques sont illustrés en figure 20. On parle de cavité linéaire lorsque l'ensemble des composants constituant le laser sont sur une même ligne (cas (a) de la figure 20) et de configuration en anneau sinon (voir cas (b) figure 20).

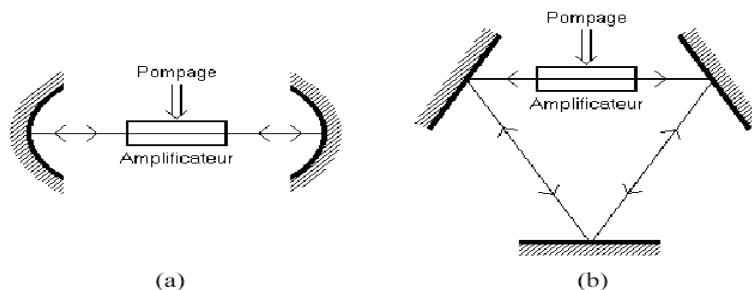
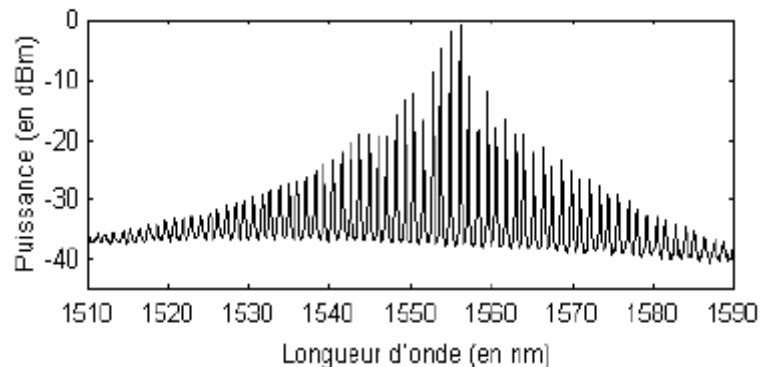


Fig. 20 Deux types de cavités laser : (a) résonateur Fabry-Pérot (b) laser en anneau

Pour obtenir l'effet laser, il est nécessaire d'apporter un minimum d'énergie (pompage), sous forme électrique ou optique afin qu'à chaque tour, le gain introduit par l'amplificateur dépasse les pertes subies au niveau des miroirs et lors de la propagation dans la cavité. Le niveau d'énergie où il y a exacte compensation des pertes par le gain est appelé seuil du laser. Puisqu'en général les sources optiques n'exploitent pas l'émission produite avant l'effet laser, on cherche à réduire au maximum ce seuil afin de limiter la consommation d'énergie. Une fois l'effet laser obtenu, on constate que certaines ondes bien déterminées, qui se propagent

dans la cavité, sont favorisées tandis que d'autres sont atténuées. Les ondes favorisées portent le nom de modes longitudinaux. On dispose d'un mode longitudinal à chaque fois que la phase accumulée lors d'un tour dans la cavité, est un multiple de  $2\pi$ , c'est-à-dire lorsque la distance optique d'un tour de la cavité correspond à un multiple entier de la longueur d'onde du signal lumineux.

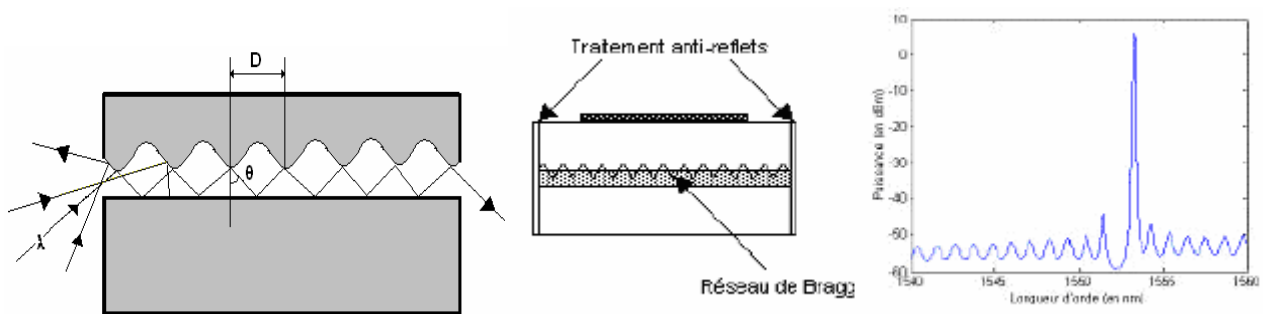


**Fig. 21** Spectre d'un laser semiconducteur Fabry-Pérot (Plusieurs modes apparaissent)

Pour les systèmes WDM, on souhaite disposer soit d'une source multi-longueurs d'onde dont les canaux sont bien définis, soit de sources monomodes, c'est-à-dire présentant un seul mode longitudinal émis. La méthode la plus utilisée est une source monomode que permette ainsi d'augmenter les distances entre répéteurs.

Deux approches sont cependant envisageables : soit le laser émet dans le plan de la jonction p-n et on parle d'émission par la tranche soit il émet perpendiculairement à celle-ci et on parle d'émission verticale. Les lasers monomodes considérés sont alors respectivement : les lasers à contre-réaction distribuée (ou DFB pour *Distributed FeedBack*) et les lasers à cavité verticale émettant par la surface (VCSEL pour *Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser*).

Pour ne conserver qu'un seul mode, l'idée est d'utiliser le principe des réseaux de Bragg, permettant de filtrer et de ne laisser passer qu'une seule longueur d'onde, comme l'illustre la figure ci-dessous.



**Fig. 22** Réseaux de Bragg - Structure et spectre d'un laser DFB

Une évolution de ces techniques dans les systèmes actuels est de les rendre accordable, comme les lasers à multiples électrodes et à multiples sections par exemple. Il est ainsi possible de s'accorder de manière continue ou discontinue en émission, et d'oscillateur local en réception permettant de sélectionner la longueur d'onde souhaitée ou le canal souhaité.

Un laser à semi-conducteur constitue un générateur de fréquences optiques particulièrement imparfait et affecté par des bruits d'amplitude et des bruits de fréquence. Ces fluctuations imposent une limite ultime aux performances de n'importe quel système optique de communication. Ce bruit est provoqué par l'émission spontanée dans la diode laser. Le bruit d'amplitude ou d'intensité à une certaine fréquence est caractérisé par le RIN (Relative Intensity Noise) défini par le rapport entre la densité spectrale des fluctuations de la puissance optique  $\langle \Delta P^2 \rangle$  et la puissance  $P(f)^2$ , comme suit :

$$\text{Equ. 13} \quad \boxed{RIN = 10 \log \frac{\langle \Delta P^2 \rangle}{P(f)^2}}$$

## 6.2. Les modulateurs

La modulation qui permet d'imprimer une information sur un signal physique, est une fonction essentielle de tout système de transmission. Une technique appelée modulation directe, consiste à moduler directement le courant injecté dans le laser. Un inconvénient de cette méthode est que lorsque l'on module en amplitude le courant d'injection d'un laser, cela s'accompagne comme nous l'avons vu plus haut, d'une modulation de fréquence parasite ou chirp. Ces effets, conjugués à la dispersion chromatique de la fibre, provoquent un élargissement de l'impulsion d'autant plus importante que la longueur de la fibre est grande.

La deuxième méthode qui permet de contourner cette difficulté, est la technique de modulation externe. L'émetteur est alors constitué d'une source optique émettant une onde pure suivie d'un modulateur externe (réalisé en niobate de lithium  $\text{LiNbO}_3$ ). Le courant d'injection du laser n'est plus modulé, le modulateur externe introduit beaucoup moins de conversion amplitude-fréquence et le signal modulé envoyé dans la fibre est nettement moins affecté par ce phénomène.

### 6.2.1. Effets électro-optique

L'indice de réfraction de certains matériaux peut être modifié par l'application d'un champ électrique. C'est le principe physique qui est utilisé dans les modulateurs externe donc purement optique.

Ce phénomène est appelé effet électro-optique ou effet Pockels quand la variation d'indice est proportionnelle au champ appliqué, et effet Kerr quand elle est proportionnelle au carré du champ comme nous l'avons vu plus haut. L'effet Pockels permet donc de réaliser des modulations de phases ou d'amplitudes.

### 6.2.2. Modulateur Mach-Zehnder (MZ)

Dans les systèmes actuels de communication optique haut débit, la modulation d'amplitude est la plus utilisée. La technique utilisée pour moduler l'amplitude d'un faisceau consiste à lui faire traverser un interféromètre de Mach-Zehnder figure 23, dans lequel il est possible de commander la différence de phase entre les deux bras. La lumière est couplée dans deux guides par un embranchement Y, l'écartement entre les deux bras étant suffisant pour que le couplage par onde évanescente soit négligeable. Les deux faisceaux se recombinaient ensuite dans un deuxième embranchement Y. L'indice de réfraction du matériau électro-optique est modifié par l'application d'une tension, entraînant ainsi un déphasage entre les deux faisceaux.

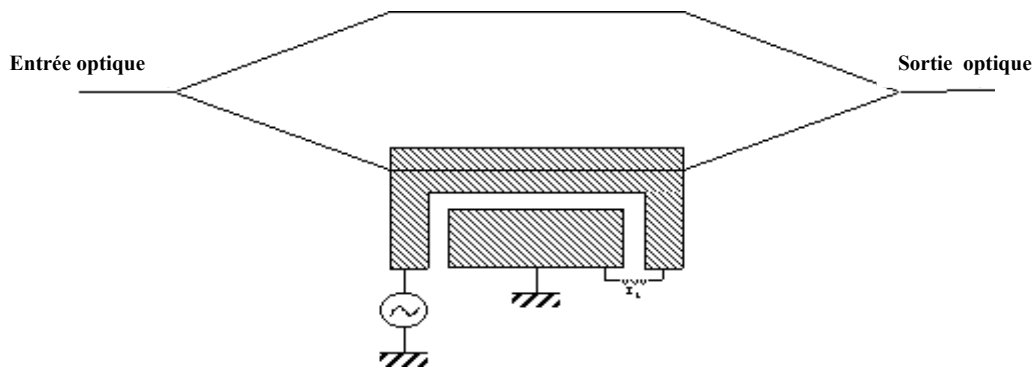


Fig. 23 Schéma d'un interféromètre de Mach-Zehnder

Suivant leur différence de phase relative, les deux faisceaux interfèrent de manière constructive (toute la puissance est disponible en sortie) ou destructive (aucune lumière n'est injectée en sortie). Entre ces deux extrêmes, tous les états sont possibles et la modulation de la lumière reproduit celle de la tension.

On peut comprendre aisément l'intérêt d'utiliser ce type de méthode pour réaliser des modulations : facilité de mise en œuvre, faible perte ( $<0,2$  dB/cm) et faible encombrement. La figure ci-dessous illustre un exemple de modulateur de type Mach-Zehnder utilisé dans un système 10 Gb/s dans la bande  $1,55 \mu\text{m}$ .

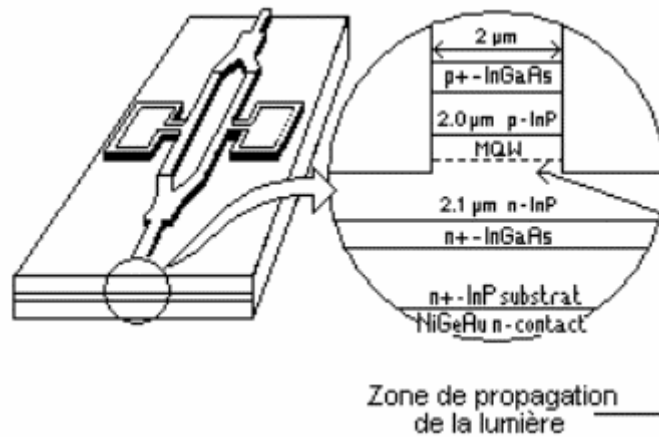


Fig. 24 Schéma d'un modulateur Mach-Zehnder

A titre informatif, voici quelques caractéristiques de ce type de modulateur. La tension appliquée est de l'ordre -2 V à 0 sur une branche et de -2 V à -4 V sur l'autre. La jonction en Y est constituée d'un guide de 40 μm de long et les branches de 100 μm de longs, sont écartées de 20 μm, avec une bande passante de 15,5 GHz.

## 7- Module de réception : Détection

La figure 25 représente le schéma d'un module de réception. On y reconnaît les blocs fonctionnels suivants :

- La tête optique avec son système de couplage à la ligne optique,
- Un photodétecteur afin de réaliser la conversion du signal optique en signal électrique,
- Un circuit de pré-amplification (courant) pour une remise en forme du signal,
- Un filtre passe-bas pour récupérer l'information préalablement modulée,
- Un amplificateur (tension) et limiteur (saturation),
- Un circuit de décision permettant la récupération du rythme (re-synchronisation), et le décodage permettant de corriger les erreurs intervenues lors de la transmission ( $TEB < 10^{-12}$ ).

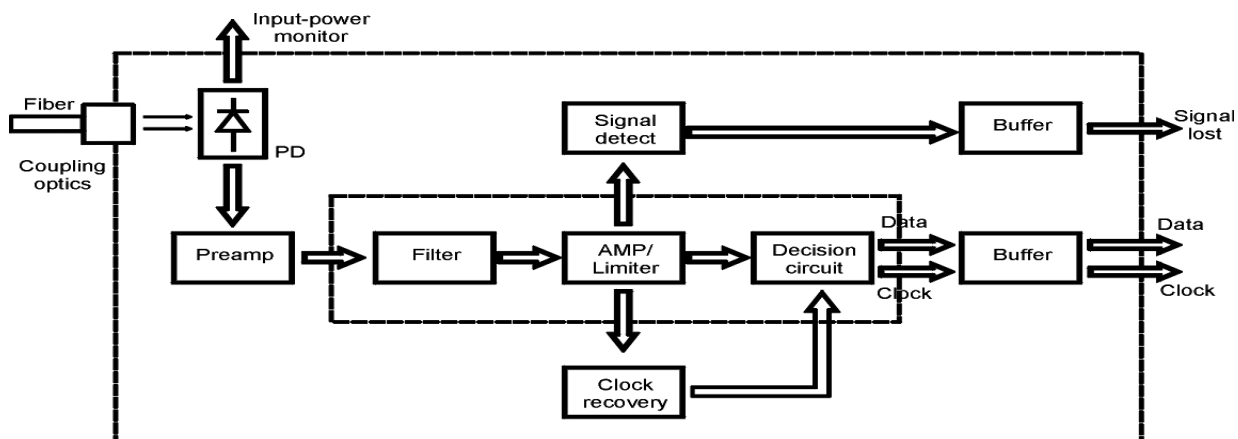


Fig. 25 Schéma synoptique d'un module de réception (en détection directe)

L'interface optique de réception, dans une liaison à fibre optique, est chargée de convertir le signal lumineux en signal électrique en lui apportant le minimum de dégradation. Ce rôle est tenu par le photodétecteur qui, pour simplifier, se comporte comme un « compteur de photons » et un générateur de courant. La première propriété requise est une sensibilité importante pour la longueur d'onde utilisée. La deuxième est la rapidité, car il doit être utilisé dans des systèmes fonctionnant à 40 Gb/s. La troisième propriété demandée est un apport minimum de bruit.

Afin de satisfaire la plupart de ces conditions, le choix se porte sur les photodétecteurs à semi-conducteurs, qui présentent les avantages d'être très rapides et faciles à utiliser, tel est le cas des photodiodes PIN ou à avalanches.

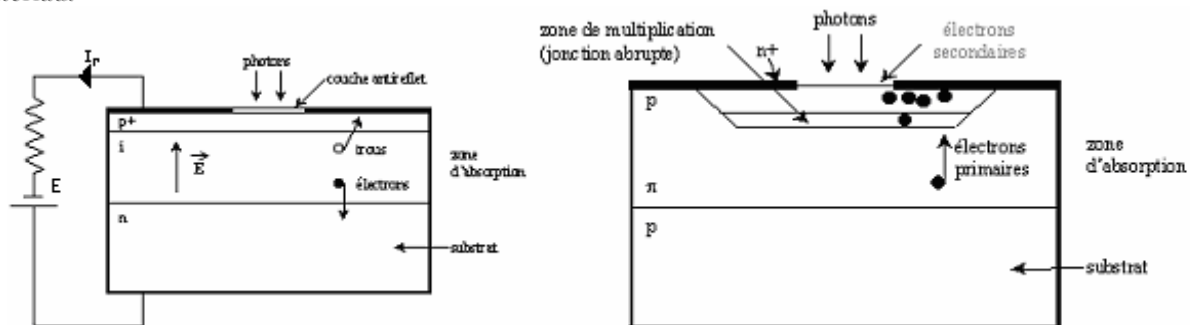


## 7.1. Photodiodes

Les fluctuations de puissance optique qui portent l'information, sont converties en fluctuations de courant électrique dans le photodétecteur, qui peut être une diode PIN ou diode à avalanches. Les paramètres importants, dépendant du matériau et de la structure, qui caractérisent une photodiode, sont la sensibilité, le courant d'obscurité, la détectivité, le temps de réponse...

Pour effectuer la photo détection en évitant les recombinaisons des paires électron-trou (source de bruit), il est nécessaire que les photons soient absorbés dans une zone dépourvue de porteurs mobiles, assimilable à une zone de charge d'espace d'une jonction PN. Pour favoriser le rendement quantique, il est préférable que cette zone soit large, d'où l'intérêt de la photodiode PIN (figure 26).

La majorité des photons est absorbée dans la zone intrinsèque (I), où règne le champ électrique pratiquement uniforme qui sépare les porteurs. Une des zones traversées par la lumière (P ou N) doit être de faible épaisseur et recouverte d'une couche antireflet qui améliore le rendement quantique externe et qui protège le matériau.



**Fig. 26** Structure d'une photodiode PIN à gauche et à avalanche à droite (PDA)

On peut rappeler l'équation du courant qui est générée par la photodiode en fonction de la tension de polarisation  $V_d$  et du courant d'obscurité  $I_0$  avec le flux lumineux  $\Phi = h\nu \Rightarrow I_0 = S\Phi$   $S$  étant la sensibilité de la photodiode à la longueur d'onde utilisée.  $P = A\eta$ ,  $P$  étant la puissance optique reçue,  $A$  la surface active et  $\eta$  le rendement de la photodiode.

$$\text{Equ. 14} \quad I_r = -I_s \left( \exp \frac{V_d}{E_t} - 1 \right) + I_0 \quad E_t = kT/q = 26 \text{ mV à } T = 300 \text{ K}$$

Afin que le rapport signal sur bruit soit suffisamment important, l'idée d'utiliser le phénomène de multiplication interne pour qu'un photon incident n'engendre plus un seul photo électron, mais plusieurs a été développé, ceci pour augmenter la puissance du signal électrique correspondant à une puissance optique incidente donnée. En faisant croître le champ électrique dans la jonction PIN, l'énergie des porteurs s'élève jusqu'au point d'ioniser un atome en cas d'impact avec celui-ci. Des ionisations en chaîne se produisent alors et les porteurs se multiplient. Ce photodétecteur à gain interne est appelé photodiode à avalanches (PDA, figure 26). Le gain de multiplication par ionisation par impact, appelé aussi facteur de multiplication  $M$ , est le rapport entre le nombre moyen de porteurs secondaires créés par ionisation et le nombre de porteurs primaires provenant de la photo détection, il est défini par la relation suivante :

$$\text{Equ. 15} \quad M = \frac{K}{1 - \frac{V_r}{V_b}}$$

$K$  coefficient,  $V_r$  tension inverse et  $V_b$  la tension de claquage

Le temps de réponse de la photodiode doit être très bref. Il est limité par deux facteurs. D'une part, la capacité de jonction est d'autant plus réduite que l'on élargit la zone d'absorption. D'autre part, le temps de transit diminue si on rétrécit cette zone. Un compromis est donc à trouver. Pour cela on améliore le temps de réponse en augmentant la tension de polarisation inverse, ce qui réduit la capacité et le temps de transit. La longueur de la zone intrinsèque est optimisée afin de maximiser le rendement et le temps de réponse.

Par ailleurs le signal électrique émis par la photodiode n'est pas parfait, il est bruité. Apparaît entre autres le bruit quantique (encore appelé bruit photonique ou de grenaille ou bruit Schottky). Il provient du caractère

aléatoire de la création des paires électron-trou. Ce bruit proportionnel à la puissance optique reçue par la photodiode est inévitable.

Une comparaison des performances entre ces deux photodiodes, permet de faire un choix. Le rapport Signal sur Bruit (S/B) est défini par le rapport du  $(\text{photocourant})^2$  sur le  $(\text{courant de bruit du photodétecteur} + \text{le courant de bruit de l'amplificateur})^2$ . Pour de faibles niveaux, le rapport signal sur bruit est meilleur avec une photodiode à avalanches alors que pour des niveaux plus forts, il vaut mieux utiliser une photodiode PIN, comme le montre le graphe ci-dessous.

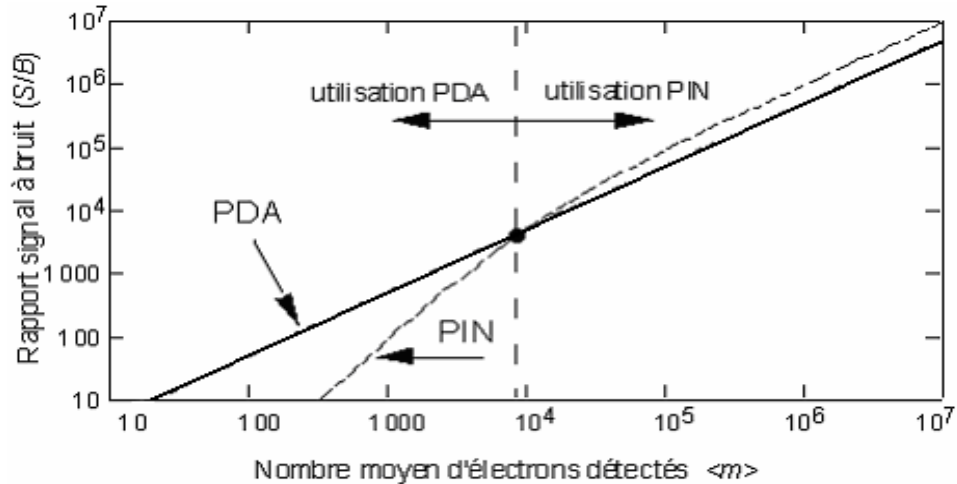


Fig. 27 Rapport signal à bruit en fonction de l'intensité du signal émis pour les photodiodes PDA et PIN.

## 8- Amplificateurs optiques

Comme nous l'avons vu, les informations sont transmises sur de très longues distances. Elles sont soumises à de multiples effets décrits plus haut qui dégradent le signal (atténuation, élargissement, déphasage...). C'est pourquoi tout au long de la ligne des répéteurs sont positionnés afin de régénérer le signal (R), de le remettre en forme (2R) voir de le re-synchronisé ou récupérer le rythme (3R). La plupart des lignes déjà installées possèdent des répéteurs purement électroniques. Le signal est donc converti (optique-électrique O/E) remis en forme, re-synchronisé, etc. Et reconvertir électrique-optique (E/O). Ce type de répéteurs emploie des circuits électroniques ultra rapides, donc très coûteux et complexes à mettre en œuvre, pour pouvoir gérer le nombre de canaux qui croît régulièrement pour augmenter les débits de transmission, surtout à de telles vitesses de fonctionnement. Les systèmes actuels utilisent dorénavant, des répéteurs purement optiques, facile à mettre œuvre et permettant d'effectuer cette tâche à la « vitesse optique ». La remise en forme et la régénérescence du signal, sera faite par un amplificateur optique à l'aide d'une fibre dopée à l'erbium, la re-synchronisation par l'emploi de fibre de compensation comme nous l'avons vu précédemment.

### 8.1. Amplificateur optique à semi-conducteurs (AOSC)

Les premiers travaux sur les AOSC ont démarré au début des années 80, à partir du moment où les lasers à semi-conducteur fonctionnaient en continu avec une fiabilité acceptable. Leur structure de base est peu différente de celle d'une diode laser. Contrairement aux lasers à semi-conducteur, il n'y a pas de miroirs aux extrémités mais un revêtement anti-reflets est déposé sur les faces afin de diminuer les réflexions de la lumière vers l'intérieur du circuit.

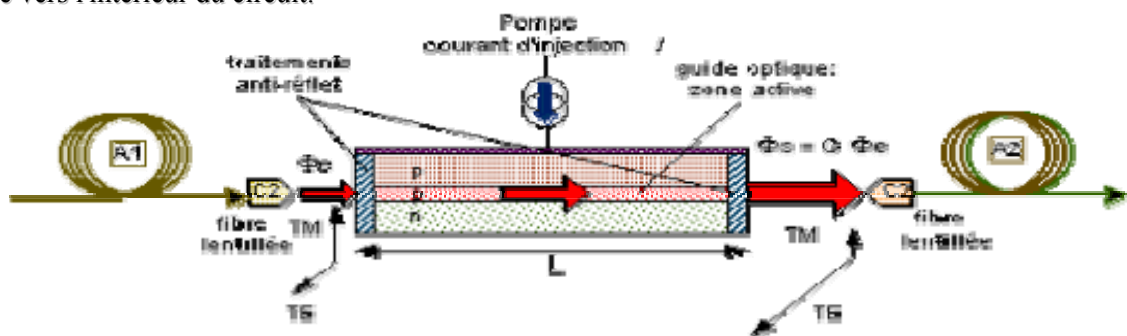


Fig. 28 Schéma d'un amplificateur à semi-conducteur



La lumière incidente entre dans le circuit, elle est amplifiée et sort par l'autre extrémité pour être couplée dans la fibre. Voici quelques caractéristiques : un gain élevé jusqu'à 30 dB, une puissance de saturation en sortie de 5 à 10 mW, une bande passante de 5 THz à  $\lambda = 1550$  nm...

### 8.2. Amplificateur optique à fibre dopée (EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier)

Comme n'importe quel amplificateur, un amplificateur optique absorbe l'énergie fournie par le système extérieur désigné par le terme de pompage. Il la restitue au signal pour le renforcer et l'amplifier.

Les amplificateurs à fibre qui sont disponibles commercialement fonctionnent dans la fenêtre de transmission à la longueur d'onde de 1550 nm. Un de leurs avantages est la simplicité du dispositif. Ils se composent pour l'essentiel : d'une fibre active de quelques mètres de longueur, dopée avec des ions appropriés (erbium), et connectée à la fibre de ligne, d'une pompe et d'un dispositif de couplage de la lumière de la pompe vers la fibre dopée. Dans la plupart des cas la pompe est un laser à semi-conducteur. Le couplage de la lumière de la pompe dans la fibre est obtenu à l'aide de multiplexeur.

Il est habituel d'ajouter deux isolateurs (diode optique), une à l'entrée, l'autre à la sortie, qui ne laissent passer la lumière que dans un sens afin d'éviter toutes les réflexions qui pourraient : créer une cavité, faire osciller le dispositif et le transformer en laser. 980 et 1480 nm sont les deux longueurs d'onde de pompe les mieux adaptées à l'EDFA, et des diodes lasers à semi-conducteur sont disponibles à ces longueurs d'onde. Le multiplexeur optique, sélectif en longueur d'onde, doit présenter une perte d'insertion faible à ces deux longueurs d'onde afin d'optimiser le rendement optique du système. La figure 29 montre le schéma d'un amplificateur optique à fibre dopé à l'erbium.

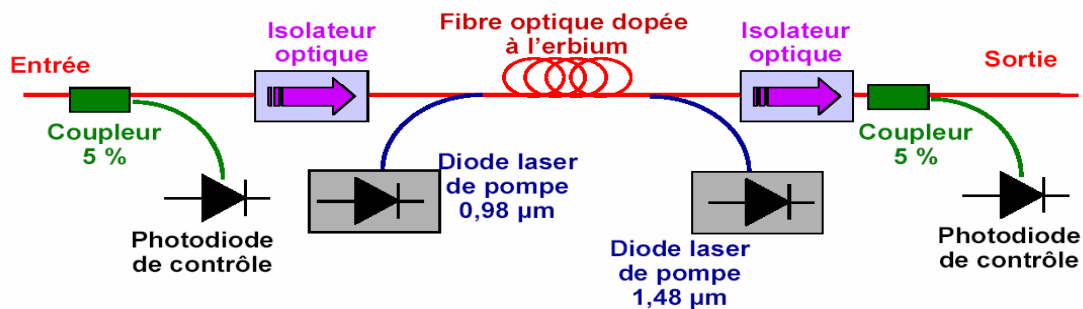


Fig. 29 Exemple d'amplificateur optique à fibre dopé à l'erbium

En général, les EDFA possèdent un gain de 25 à 45 dB et des puissances de saturation allant de 1 à 10 mW (0 à 10 dBm). Enfin, les EDFA ont une large bande passante (1530-1560 nm) pour laquelle le gain est quasiment identique, ce qui rend intéressant ces amplificateurs quand on veut d'amplifier simultanément plusieurs signaux multiplexés en longueur d'onde.

### 8.3. Amplificateur Raman

Avec l'accroissement des canaux dans la fibre, la bande spectrale offerte par les amplificateurs optiques à fibre dopée à l'erbium, limitée au maximum à 40 nm, peut s'avérer être un facteur pénalisant. Ce constat a relancé les études sur de nouvelles méthodes permettant l'augmentation de la bande spectrale.

De nouveaux amplificateurs optiques tels que les amplificateurs Raman prennent une part non négligeable dans les systèmes de télécommunications. Ils sont basés sur le principe de la diffusion Raman, qui est un effet non linéaire à deux photons dans lequel un photon de pompe est absorbé et un photon de plus faible énergie est émis en même temps qu'un phonon. Ce phénomène peut être spontané s'il n'y a pas de photon signal, ou stimulé par la présence d'un photon signal. Ainsi, dans le cas de l'amplificateur Raman, l'onde incidente, dite onde de pompe, stimulée par l'onde signal, va créer une autre onde signal et un phonon. L'amplification est alors réalisée.

Comme pour les autres amplificateurs optiques, l'amplificateur Raman a besoin d'une source externe, une source optique. Des lasers YAG sont le plus souvent utilisés dans ce cas, ils émettent une longueur d'onde inférieure à celle du signal. L'avantage principal de ces lasers est d'être accordables sur une très grande plage

de longueurs d'onde. Le gain obtenu peut atteindre quelques dizaines de décibels, mais une saturation qui s'accompagne d'une forte dégradation du rapport signal sur bruit (l'émission spontanée continuant à être amplifiée) peut apparaître. La limite en puissance est due à la génération d'une onde autre que l'onde signal lors de la diffusion Raman.

## 9- Probabilité d'erreur et codage du canal de transmission

Comme nous l'avons vu précédemment l'amélioration du gain lors de la transmission est réalisée par les différents répéteurs disposés tout au long de la ligne. Une technique complémentaire, permet non seulement de protéger les informations, mais encore d'améliorer le gain en réception.

L'information va être codée dans le module d'émission, comme cela a été présenté dans le premier chapitre, et être décodée après détection dans le module de réception. Suivant la technique de codage utilisée, l'information pourra être corrigée, il sera alors possible d'obtenir des taux d'erreur binaire très faibles et un gain de codage non négligeable qui permet ainsi d'augmenter les distances de transmissions de quelques milliers de kilomètres.

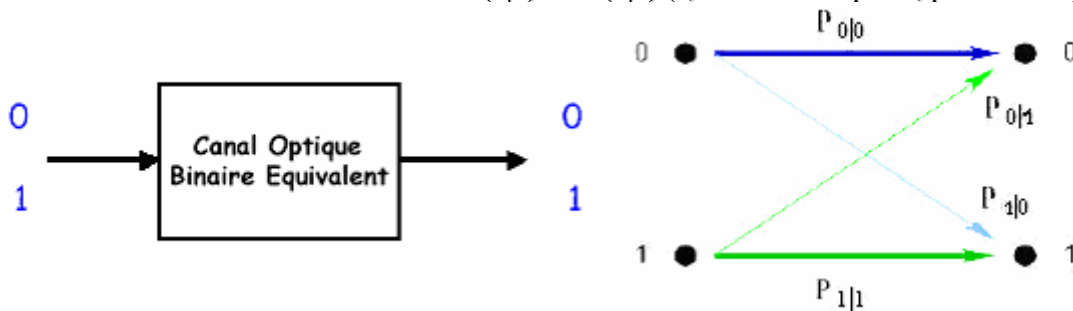
### 9.1. Probabilité d'erreur (BER, Bit Error Rate)

Le canal de transmission optique, bien qu'il reste complexe à modéliser, peut être décrit comme un canal binaire asymétrique, figure 30. Asymétrique en effet, car la probabilité d'obtenir un « 1 » si un « 0 » est émis et un « 0 » si un « 1 » est émis, n'est pas équiprobable dans ce types de systèmes.

$P(0|1)$  est la probabilité de détecter un « 0 » si un « 1 » est transmis

$P(1|0)$  est la probabilité de détecter un « 1 » si un « 0 » est transmis

Le taux d'erreur binaire est le rapport de nombre de bit reçus en erreur, sur le nombre de bits transmis, mais il peut aussi être défini comme suit : **TEB** = **aP(0|1) + bP(1|0)** (a,b facteurs de poids, pondération).



**Fig. 30 Canal Binaire Asymétrique**

Dans tout système de transmission, un paramètre important permet de connaître la qualité du système, c'est le taux d'erreur binaire, permettant de quantifier de manière probabiliste les erreurs de l'information reçue qui a été dégradée lors de la transmission, comme cela a été expliqué plus haut, et bruitée lors de la détection.

Les outils probabilistes permettent de calculer ce taux d'erreur binaire, le calcul exige la connaissance de la loi de probabilité du bruit.

Les densités de probabilité associées aux fluctuations de tension autour des niveaux logiques « 0 » et « 1 », sont supposées gaussiennes dans de tel système et elles peuvent être traduites par la relation suivante.

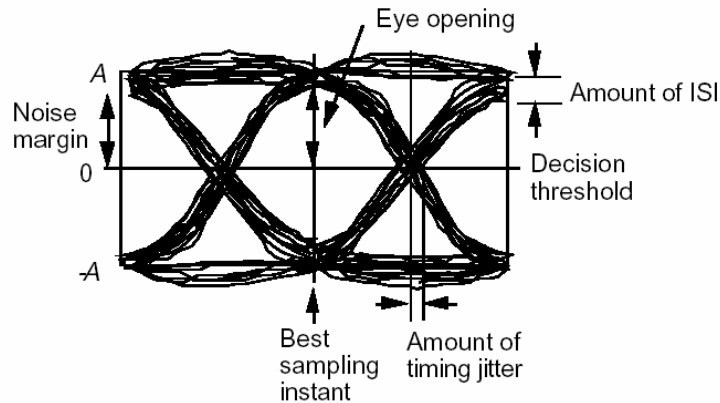
$$\text{Equ. 16} \quad \boxed{TEB = \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left[ \frac{I_1 - s}{\sigma_1 \sqrt{2}} \right] + \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left[ \frac{s - I_0}{\sigma_0 \sqrt{2}} \right]}$$

où  $\operatorname{erfc}$  désigne la fonction d'erreur complémentaire, définie par :

$$\text{Equ. 17} \quad \boxed{\operatorname{erfc}(X) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_X^{+\infty} e^{-t^2} dt = 1 - \operatorname{erf}(X)}$$

La position optimale du seuil de décision  $S_0$ , qui peut être visualisée et mesurée sur le graphe ci-dessous appelé diagramme de l'œil, il exprime l'égalité des deux probabilités conditionnelles. Celle-ci définie par la relation suivante :

**Equ. 18** 
$$S_0 = \frac{\sigma_1 I_0 - \sigma_0 I_1}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad P(0|1) = P(1|0) = 1/2 \Rightarrow \text{Rendre le canal symétrique}$$



**Fig. 31** *Diagramme de l'œil*

Dans les ouvrages consacrés aux télécommunications sur fibres optiques, on exprime plus souvent le taux d'erreur binaire en fonction du rapport :

**Equ. 19** 
$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad \text{Appelé communément « facteur Q »}.$$

Le taux d'erreur binaire s'exprime alors par la relation :

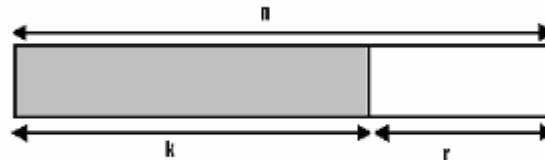
**Equ. 20** 
$$TEB = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{I_1 - I_0}{(\sigma_1 + \sigma_0) \sqrt{2}} \right] \quad \boxed{TEB = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{Q}{\sqrt{2}} \right]}$$

La figure 33 montre l'allure de cette fonction (désignée par « uncoded »). C'est à partir de cette courbe référence que l'on va pouvoir comparer les gains apportés par le codage, ceci bien sûr suivant l'algorithme qui sera utilisé.

## 9.2. Code correcteurs d'erreurs

Pour les systèmes actuels de transmissions optiques à très haut débit, le code de correction FEC, Forward Error Correction, le plus utilisé est le code RS(255,239) ou Reed-Solomon.

Le code Reed-Solomon fait partie des codes cycliques, construit à partir des corps de Gallois  $GF(2^k)$  (Galois Field), ils sont capables de corriger  $t$  erreurs.



**Fig. 32** *Structure des codes corrections d'erreurs*

$$\boxed{n = k + r} \Rightarrow \boxed{C(n, k, d_{\min})} \Leftrightarrow d_{\min} \Rightarrow \text{distance minimale du code}$$

$$D = d_{\min} - 1 \Rightarrow \text{Capacité de détection du code}$$

$$t = \frac{(d_{\min} - 1)}{2} \Rightarrow \boxed{d_{\min} \leq n - k + 1} \quad \text{Borne de Singleton}$$

Les codes RS sont des codes cycliques linéaires pour lesquels  $n = q-1$ , avec  $q$  différent de 2. Ce ne sont pas des codes binaires, souvent  $q$  est une puissance de 2,  $q = 2^k$ , ce qui permet d'associer un symbole  $q$  aire à un paquet de  $k$  bits.

Polynôme générateur du code cyclique Reed-Solomon :

**Equ. 21**

$$g(x) = (x - \alpha)(x - \alpha^2) \dots (x - \alpha^{d-1}) = \prod_{i=1}^{d-1} (x - \alpha^i)$$

Les codes RS sont bien adaptés pour corriger des paquets d'erreurs. Pour décoder on calcule d'abord le syndrome pour déterminer s'il y a erreur. Puis, si il n'est pas nul, on détermine la position des erreurs et enfin leurs valeurs. Connaissant la valeur et la position des erreurs, on peut corriger le mot reçu, (Voir en annexe pour les définitions du polynôme syndrome, du polynôme localisateur d'erreur et du polynôme évaluateur d'erreur), ceci dans le seul but de montrer la puissance et donc les performances de ce code correcteur d'erreur permettant d'atteindre un  $TEB < 10^{-12}$ .

Le choix d'utiliser ce type de code est essentiellement motivé par les propriétés suivantes :

- une capacité de correction importante par rapport au taux de redondance appliqué au mot d'information, en effet le code RS(255,239) peut corriger jusqu'à 8 symboles erronés dans un seul mot de code,
- une faible complexité du codeur et du décodeur,
- une capacité importante de correction d'erreurs en rafales, cette propriété intrinsèque est renforcée par l'entrelacement de codes RS(255,239) élémentaires. Cette technique, implémentée dans les systèmes de communication optique haut débit, porte la capacité de correction d'erreur à des rafales d'une longueur maximale de 1024 bits, pour 16 codes entrelacés,
- En fin le code RS figurent parmi les codes les plus efficaces pouvant être implémentés à l'aide du matériel et des logiciels actuellement disponibles.

Le graphe suivant, permet d'illustrer l'efficacité du code RS par rapport au code BCH (Bose Chaudhuri Hockenghem), il montre le gain obtenu avec le codage par rapport à la courbe référence sans codage (uncoded).

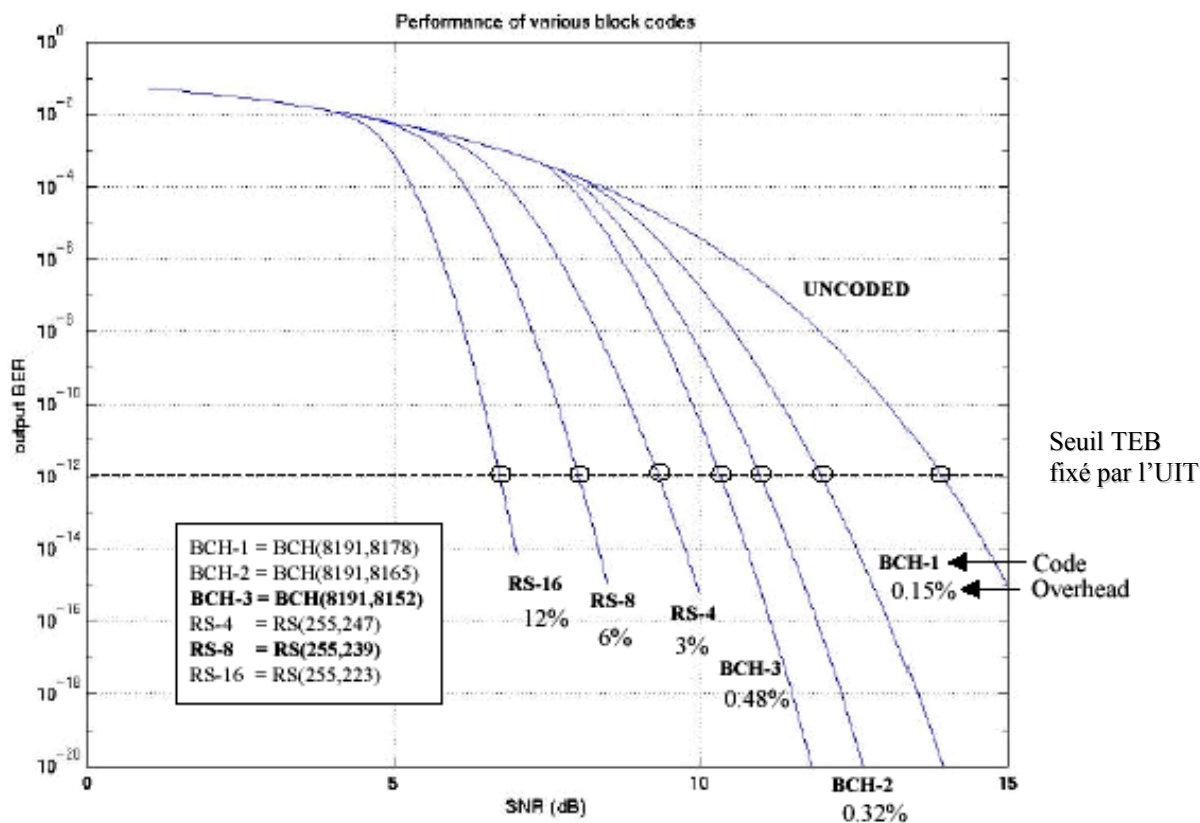


Fig. 33 Graphe  $TEB = f(SNR)$ , performance du codage pour un système à 40 Gb/s

Les systèmes actuels utilisent parfois un double codage RS, permettant ainsi d'augmenter la capacité du canal, mais aussi les distances de transmission, comme le montre le graphe ci-dessous.

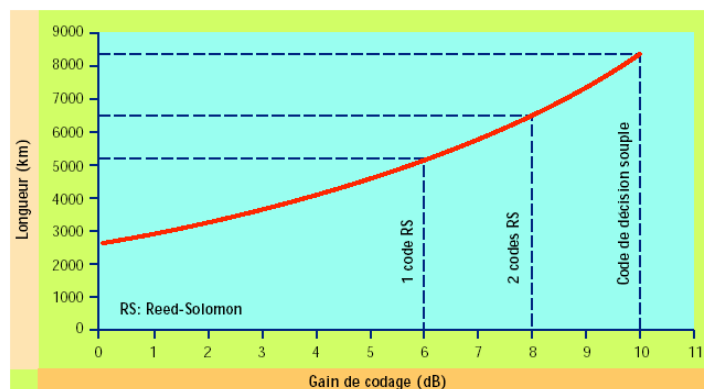


Fig. 34 Longueurs de transmission =  $f(\text{gain de codage})$  pour un système 40 Gb/s.

Enfin la figure 35, illustre le schéma de principe d'un décodeur avec deux parties distinctes.

- la partie détection d'erreur,
- la partie correction d'erreur.

On retrouve les blocs fonctionnels de calculs des syndromes pour déterminer si il y a erreur, de calcul du polynôme localisateur d'erreur et du calcul du polynôme évaluateur d'erreur, après quoi l'erreur ainsi localisée et quantifiée est corrigée, comme précisé plus haut.

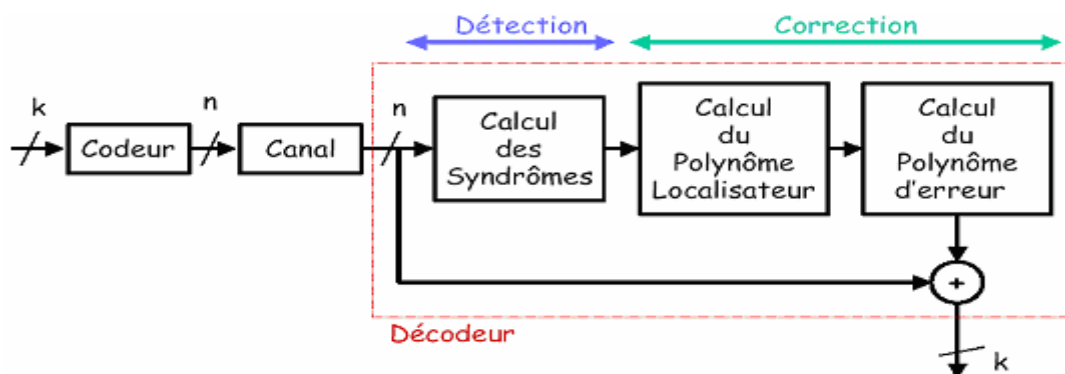


Fig. 35 Schéma de principe d'un décodeur.

## 10- Quelques applications

L'aboutissement de nombreuses années de recherche de base pour obtenir d'une part des fibres présentant une atténuation compatible avec les exigences d'un réseau de télécommunication, d'autre part des composants et dispositifs suffisamment performants et fiables, a permis l'apparition des premiers systèmes de transmission optique dès les années 90. Ils sillonnent désormais le monde entier, aussi bien sur terre que dans le domaine sous-marin, pour former une véritable toile tissée à l'échelle planétaire.

### 10.1. Liaisons terrestres

Le réseau déployé en France est segmenté en fonction des différents besoins en débit, en bande passante, en distance de transmission, ... On distingue trois grandes catégories :

- Les réseaux longues distances (WAN, Wide Area Network). Ce sont les réseaux déployés à l'échelle d'un pays ou d'un continent et dont les noeuds sont de très grands centres urbains.
- Les réseaux métropolitains (MAN, Metropolitan Area Network) qui correspondent aux réseaux mis en oeuvre dans une grande ville ou une agglomération et ils permettent de relier entre eux différents arrondissements par exemple.
- Les réseaux locaux (LAN, Local Area Network), encore appelés réseaux de distribution ou réseaux d'accès. Ils représentent le dernier maillon et finissent d'acheminer les informations à l'abonné. Ils sont donc plus courts et moins gourmands en capacité.



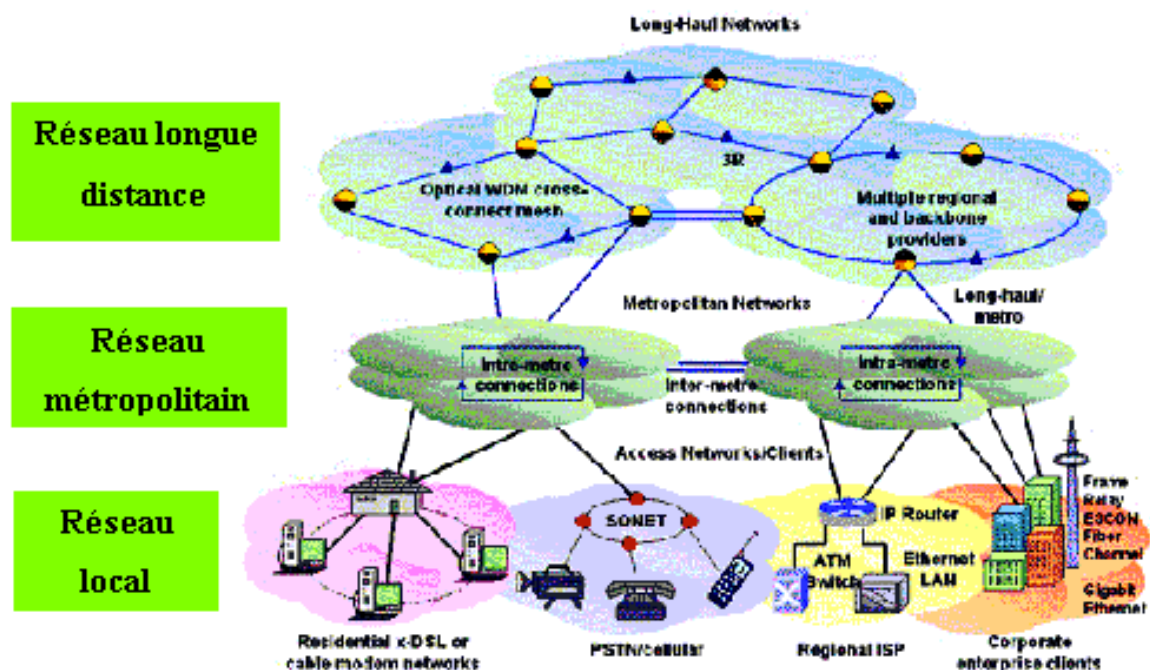


Fig. 36 Architecture typique du réseau de télécommunications français

## 10.2. Liaisons sous-marines

Comme l'illustre très bien la figure 38, on peut se rendre compte de l'importance du réseau optique sous-marin qui est déployé aujourd'hui il permet ainsi, une fois couplées au réseau terrestre, de véhiculer l'information sur de courte distance, mais aussi sur de très long distance, comme les liaisons transatlantiques, et transpacifiques,... D'un bout de la terre à un autre et réciproquement ils forment ainsi une véritable toile « d'autoroute de l'information ».

Zone	Longueur en service en 1990 (km)	Longueur en projet avant 1993 (km)	Principales liaisons	Débit par paire de fibres (Mbit/s)
Europe du Nord	1 500	500	Royaume-Uni vers Belgique, Pays-Bas, Danemark, Irlande, France, Guernesey Royaume-Uni – République fédérale d'Allemagne	280 1 800
Transatlantique Nord	14 000	8 000	TAT 8 : États-Unis vers Royaume-Uni et France PTAT : États-Unis et Bermudes vers Royaume-Uni et Irlande TAT 9 : États-Unis et Canada vers Royaume-Uni, France et Espagne	280 420 560
Europe Occidentale et Afrique	1 500	5 500	PENCAN 4 : Espagne – Canaries PENCAN 5 : Espagne – Canaries Royaume-Uni – Espagne EURAFRICA : France – Portugal – Madère – Maroc	280 560 560
Amérique du Nord Caraïbes	4 500		Floride – Porto-Rico – Saint-Domingue – Jamaïque – Venezuela	280
Méditerranée	6 000	2 000	Marseille – Corse et Gênes et Rome vers Sardaigne – Sicile – Grèce Turquie-Israël (EMOS) PENBAL 3 et 4 : Espagne – Baléares MAT II : Palerme – Baléares – Sud Espagne Marseille – Barcelone	280 280 280 280
Pacifique et Sud-Est Asiatique	42 500	25 000	HAW 4-TPC 3 : États-Unis – Hawaï – Guam et Japon NPC : États-Unis et Alaska vers Japon GPT : Guam – Philippines – Taïwan HJK : Japon – Corée – Taïwan – Hong-Kong ASEAN : Indonésie – Australie TASMAN : Australie – Nouvelle-Zélande TPC 4 : États-Unis – Japon HAW 5 : États-Unis – Hawaï PACRIM Est : Australie – Guam PACRIM Ouest : Nouvelle-Zélande – Hawaï	280 420 280 280 280 280 560 560 560 560

Fig. 37 Câbles sous-marins optiques

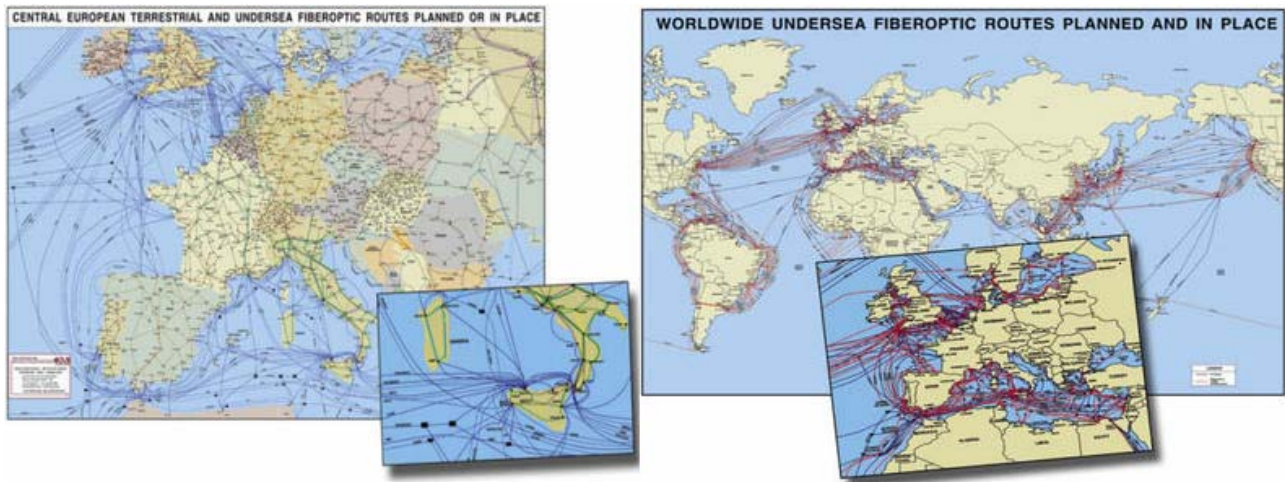


Fig. 38 Cartographie des liaisons par fibre optique sous-marine et terrestre

Enfin un dernier graphe (fig. 39) illustre l'essor exponentiel que connaissent les communications optiques à très haut débit. Montrant ainsi la constante évolution, les efforts de développements et de recherche,... Des techniques de transmissions optiques qui sont consacré, afin de permettre de s'adapter très rapidement à la constante augmentation des débits de transmissions, pour répondre à un marché et une clientèle de plus en plus nombreuse et exigeante.

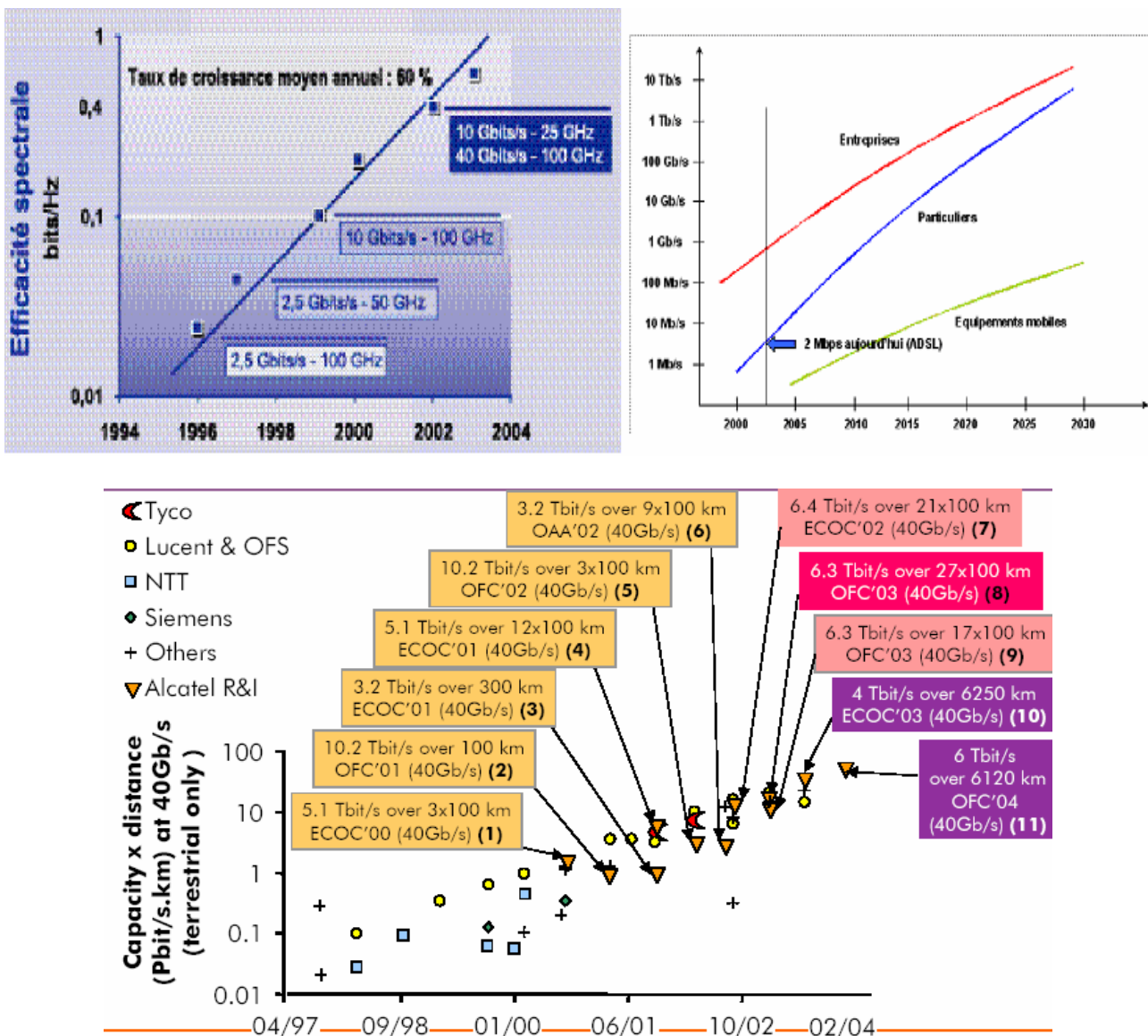


Fig. 39 Evolution des transmissions optiques

## **11- Conclusion**

« L'optique sera au XXI<sup>e</sup> siècle ce que l'électronique a été au XX<sup>e</sup> siècle ». Telle était la prophétie et le rêve de ceux qui travaillent dans ce domaine ces dernières années. Ce rêve devient réalité. La transmission optique a pris le pas sur toutes les autres solutions comme technologie de transport de l'information, grâce aux progrès en WDM.

Dans les années à venir, les technologies optiques continueront de faire face à la demande croissante de capacité, conséquence inévitable de la généralisation d'Internet et des services plus orientés vers la vidéo par exemple. Cependant pour faire face à un marché très tendu et une croissance exponentielle, chaque nouvelle étape réclame des progrès majeurs dans le domaine des technologies optiques.

Les semi-conducteurs demeureront indispensables à des fonctions de plus en plus élaborées dans les émetteurs et les récepteurs, mais aussi pour la régénération optique et la conversion de longueur d'onde.

Les absorbants saturables, permettant la réalisation de fonction de manière passive, seront sans aucun doute des composants clés des futurs systèmes.

Les cristaux photoniques, et les fibres à trous en particulier, pourraient constituer une gigantesque boîte à outils pour la conception et l'ingénierie de nouvelles fonctions optiques.

Les MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems), au delà de leur application dans les matrices de commutation photoniques, ouvrent des perspectives intéressantes en termes de compensation, de dispersion dynamique, d'égalisation spectrale, d'accordabilité en longueur d'onde.

Les transmissions par solitons. La non-linéarité de la fibre produit une dérive en fréquence (Effet Kerr) qui compense exactement celle produite par la dispersion. L'impulsion soliton se propage alors sans déformation, tout au long de la ligne !!! Les solitons sortiront probablement bientôt des laboratoires pour former l'ossature des réseaux de télécommunication mondiaux de demain.

D'autres travaux sont à mener pour permettre d'augmenter la capacité des systèmes WDM, citons la réduction de l'écart spectral entre chaque canaux, l'amélioration des techniques de codages et des codes corrections d'erreurs (FEC), la transmission en double bande C (1537 nm - 1562 nm) + L (1585 nm - 1610 nm), etc.

Néanmoins, l'avenir des systèmes optiques, ne se limite pas seulement à des autoroutes de grandes capacités, l'avenir se trouve également dans l'élaboration de réseau « Tout Optique ». De gros efforts portent sur les commutateurs optiques (OXC, Optical Cross Connect), les multiplexeurs d'extraction et d'insertion de longueur d'onde (OADM, Optical Add/Drop Multiplexing), des brasseurs entièrement optique (CrossLight), etc.

Actuellement sont testés en laboratoire des systèmes de communications optique de 160 Gb/s à 10 Tb/s (80 000 millions de voies téléphoniques), mais fonctionnant sur deux courtes distances avec des taux d'erreurs tout de même acceptables, des tests ont aussi été effectués avec des transmissions par solitons qui s'avèrent très prometteurs.

Les communications optiques à très haut débit sont en pleine effervescence et ont de beaux jours devant elles.



## 12- Bibliographie

### ● Ouvrages :

- [1] Collectif d'auteurs sous la direction de Geniève Baudoin, **Radiocommunication numérique 1**, Paris : Dunod, 2002.
- [2] Irène et Michel Joindot et douze co-auteurs, **Les télécommunications par fibres optiques**, Paris : Dunod et CNET ENST, 1996.
- [3] Pierre Lecoy, **Télécommunications optiques**, Paris : Hermès, 1992.
- [4] Georges Asch, **Les capteurs en instrumentation industrielle**, Paris 5ème Edition : Dunod, 1999.

### ● Articles :

- [5] B. Cabon, J. Chazelas, D. Dolfi, **Optoélectronique hyperfréquence**, *Techniques de l'ingénieur, traité électronique*, E 3 330.
- [6] E. Giacobino, **Propagation guidée de la lumière**, *Techniques de l'ingénieur, traité électronique*, A 2 090.
- [7] M. Joindot, I. Joindot, **Système de transmission sur fibre optique**, *Techniques de l'ingénieur, traité électronique*, TE 7 115
- [8] R. Salvador, **Câbles sous-marins de télécommunication**, *Techniques de l'ingénieur, traité électronique*, E7 550.
- [9] Yole développement, **Etude générique sur les technologies optoélectroniques**, *Thalès Airbone Systems*, juin 2002.
- [10] Abram, M. Bensoussan, **La recherche fondamentale en amont des télécommunications optiques**, *R&D France Télécom*.
- [11] B. Liao, B. Decocq, **Réseaux optiques du futur : optimisation des réseaux**, *R&D France Télécom*.
- [12] P. Vandamme, J-B. Thomine, P. Gallion, **Transmission par solitons**, *R&D France Télécom*.
- [13] P. Vandamme, M. Joindot, S. Gosselin, **L'optique et les réseaux : transmission et capacité**, *R&D France Télécom*.
- [14] S. Bigo, **Les systèmes WDM dans les laboratoires : Où en sommes-nous ?** *Alcatel Research & Innovation*, 16 mars 2004.
- [15] O. Gautheron, **Les réseaux optiques sous-marins au seuil du Tbit/s par fibre**, *Revue de télécommunication d'Alcatel*, 3<sup>e</sup> trimestre 2002.
- [16] M. Erman, **Préparer le futur**, *Revue de télécommunication d'Alcatel*, 3<sup>e</sup> trimestre 2000.
- [17] M. Vovan, **Les technologies optiques de Cisco**, *Cisco System*, 1 novembre 2002.
- [18] The international engineering consortium, **Optical Networks Tutorial**, *Alcatel*, 2 juin 1998.
- [19] Alcatel communication revue, **Alcatel 1640 WDM : 80 channels DWDM system**, *Alcatel*, 2002.
- [20] Alcatel communication revue, **Alcatel 1686 WDM : 32 channels DWDM system**, *Alcatel*, 2002.
- [21] F-X Olivier, C. Zugno, S. Thompson, **Evolution des réseaux d'infrastructure DWDM à haut débit**, *Revue de télécommunication d'Alcatel*, 3<sup>e</sup> trimestre 2000.
- [22] M. Pez, **Comparaison des liaisons optiques et électriques**, *Techniques de l'ingénieur, traité électronique*, E 3 680.
- [23] K. Azadet, **Forward error correction (FEC) : Technics for optical communications**, *Lucent Technologies, IEEE 802.3*.
- [24] B-E Lemoff, L-A. Buckman, **WDM Transceiver update and 1310nm eye-safety**, *Hewlett-Packard Laboratories, IEEE 802.3 HSSG Meeting*
- [25] E. Lach, H. Bülow, K. Satzke, A. Clausen, **Towards ultra high channel bitrates**, *IST project, IST 2000-28659 Toprate*.
- [26] JM. Lourtioz, **Les cristaux photoniques et le monde réel des télécommunications optiques**, *Directeur de l'institut d'électronique fondamentales IEF, Présentation 2004*.

### ● Cours :

- [27] G. Hincelin, **Fibres optique**, *cours du CNAM Electronique B8*.
- [28] JP. Tual, **Transmission des télécommunications**, *cours du CNAM Electronique B11*.
- [29] P. Georges, **La lumière laser : une lumière pas comme les autres**, *Institut d'optique, Colloque unions des professeurs*, 16 mai 2002.
- [30] G. Rodriguez Guisantes, **Codes correcteurs d'erreurs pour les systèmes optiques**, *ENS Télécom Paris, Mars 2002*.

## ● Thèses :

- [31] Jean-Louis Verneuil, **Simulation de systèmes de communications par fibre optique à 40 Gb/s**, *Université de Limoges spécialité*, 21 novembre 2003.
- [32] Yvan Calas, **Performances des codes correcteurs d'erreur au niveau applicatif dans les réseaux**, *Université de Montpellier II*, 19 décembre 2003.
- [33] S. Calvez, **Laser à fibre optique pour les télécommunications multiplexées en longueur d'ondes : Etude de l'accordabilité en longueur d'ondes et de la génération de trains multi-longueurs d'onde d'impulsions par voie électro-optique**, *UFR des sciences et techniques de l'université de Franche Comté*, 20 juin 2002.
- [34] M. Abhimanyu Ingale, **Error correcting codes in optical communication systems**, *Chalmers University of technology Gothenburg, Sweden*, january 2003.
- [35] B. Beauquier, **Communication dans les réseaux optiques par multiplexage en longueur d'onde**, *Université de Nice, Sophia-Antipolis*, 17 janvier 2000.

## ● Contacts :

- [36] O. Picon, Responsable de la mention : Mastère de télécommunication haute fréquence, et Mastère de technologies et techniques de télécommunications, *Université de Marne la Vallée*.
- [37] N. Dubreuil, Maître de conférence au Laboratoire Charles Fabry de L'institut d'optique, *Université Paris sud XI*.
- [38] Service de test et d'installation d'Alcatel Submarine Networks, Orléans.

NB : Tous les documents (articles, thèses, cours...), cités dans la liste bibliographique, peuvent tous être retrouvés sur la toile. Tout autres documents (introuvable sur le net, confidentiels, cours récupérés sur le sujet...) n'ont pas été cités ici !

## 13- Annexes

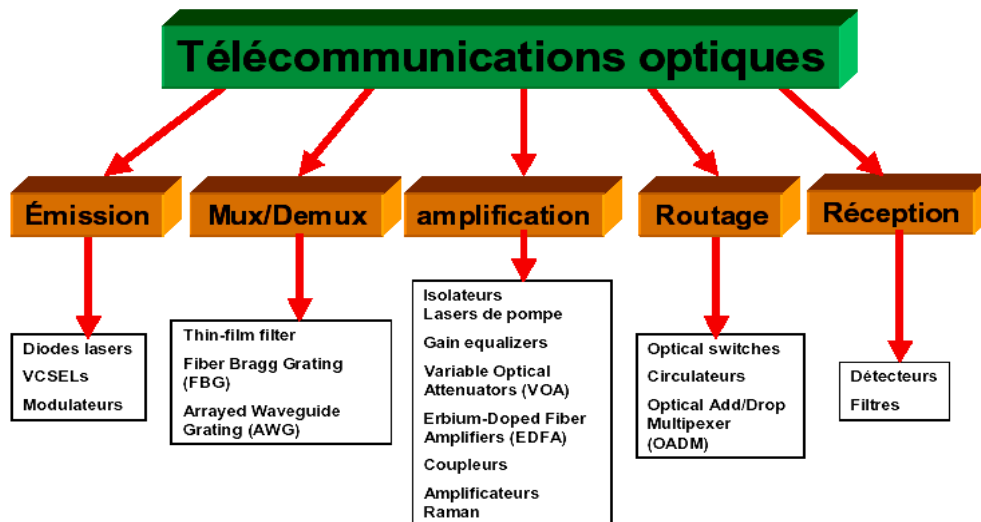


Fig. 1 Synthèse des principaux éléments constitutifs des télécommunications optiques

### 13.1. Les fibres optiques

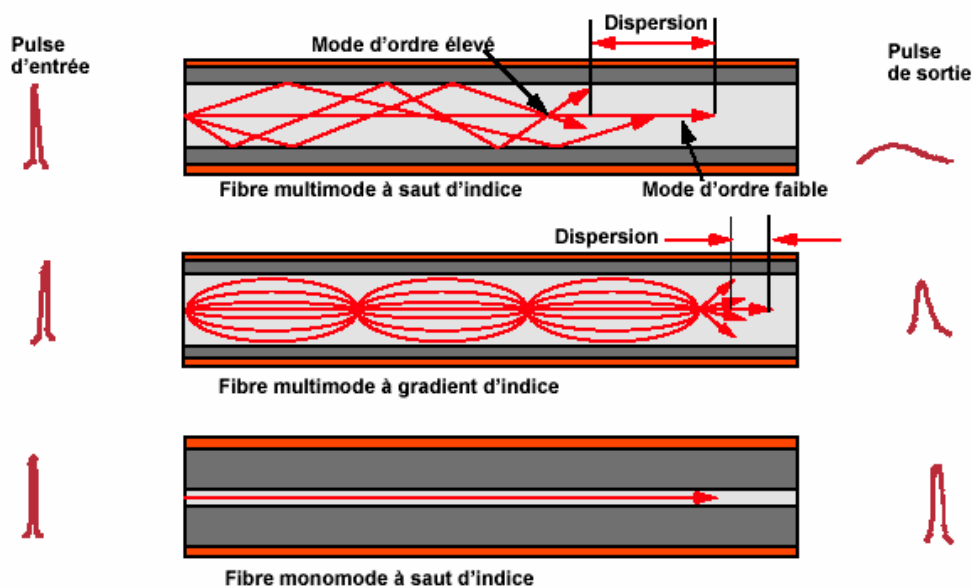


Fig. 2 Fibres optiques

### 13.2. Les fibres à trous et les MEMS

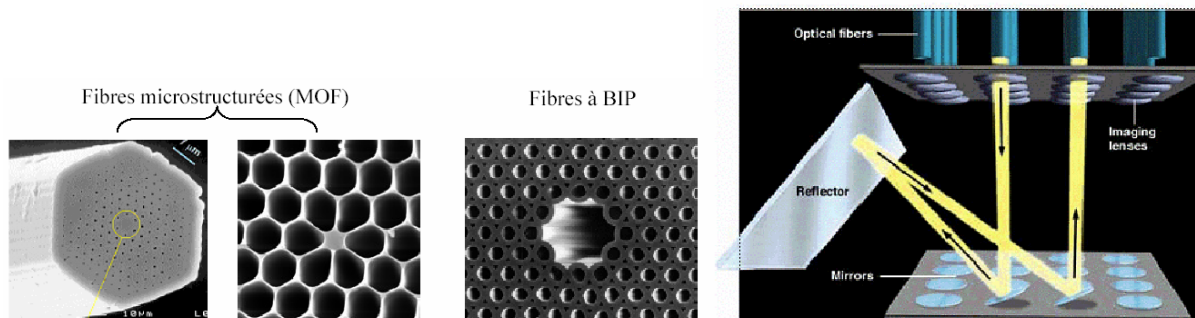
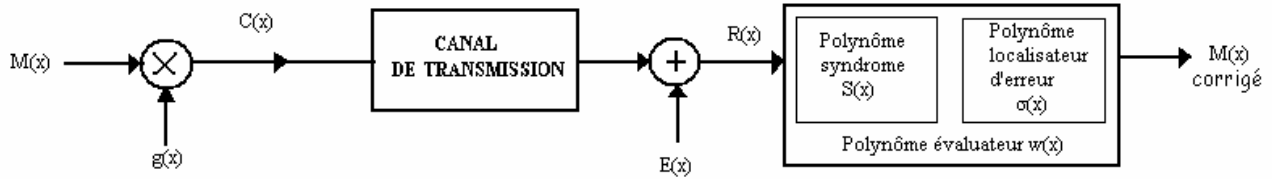


Fig. 3 Fibre à trous et principe d'une matrice de commutation 3D (OCX) en technologie MEMS

### 13.3. Code correcteur d'erreur : Reed-Solomon



**Fig. 1** Synoptique du code correction d'erreur

On rappelle le polynôme générateur du code RS :

**Equ. 1** 
$$g(x) = (x - \alpha)(x - \alpha^2) \dots (x - \alpha^{d-1}) = \prod_{i=1}^{d-1} (x - \alpha^i)$$

Le polynôme générateur est de degré  $n-k$ , il est égal à  $d-1 = 2t$ , donc  $d = n-k+1$ .

Pour vérifier qu'un mot reçu est bien un mot code, il faut vérifier que  $r(\alpha^i) = 0$  de  $i = 1$  à  $i = d-1$ . La matrice de contrôle  $H$  s'écrit donc :

**Equ. 2** 
$$H = \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 & \dots & \alpha^{n-1} \\ 1 & \alpha^2 & \alpha^4 & \dots & \alpha^{2(n-1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \alpha^{d-1} & \alpha^{2(d-1)} & \dots & \alpha^{(d-1)(n-1)} \end{bmatrix}$$

On appelle syndrome la suite de valeur  $S_i = R(\alpha^i)$  pour  $i$  variant entre 1 et  $2t$ . On appelle polynôme syndrome d'erreur le polynôme  $S(x)$  défini par :

**Equ. 3** 
$$S(x) = \sum_{i=1}^{2t} S_i x^{i-1}$$

Si le mot reçu a des erreurs, il est égal à la somme d'un mot de code  $C(x)$  et d'un mot d'erreur  $E(x)$  avec  $R(x) = E(x) + C(x)$

**Equ. 4** 
$$E(x) = \sum_{i=1}^e e_i x^{r_i}$$

Le polynôme localisateur des erreurs caractérise la position des erreurs, il est défini par :

**Equ. 5** 
$$\sigma(x) = \prod_{i=1}^e (1 - x_i x) = \prod_{i=1}^e (1 - \alpha^{r_i} x)$$

Enfin, on trouve le polynôme évaluateur permettant de déterminer la valeur des erreurs  $e_k$

**Equ. 6** 
$$S(x)E(x) \equiv w(x) \quad w(x) = \sigma(x) \sum_{k=1}^e \frac{e_k x_k}{(1 - \alpha x_k)}$$

### 13.4. Transmissions par solitons

Dès lors que la largeur typique des impulsions est supérieure à la picoseconde, la propagation dans une fibre optique monomode est modélisée par l'équation non linéaire de Schrödinger (ENLS).

$$\text{Equ. 7} \quad \boxed{\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{j}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A = j\gamma |A|^2 A}$$

où  $z$  est la distance de propagation,  $t$  le temps « retardé » (pour tenir compte de la vitesse de propagation),  $A(z,t)$  est l'enveloppe complexe du champ optique,  $\alpha$  l'atténuation linéique,  $\beta_2$  est lié à la dispersion chromatique  $D$  de la fibre et  $\gamma$  est le coefficient d'effet non linéaire de Kerr.

Omettant le terme lié à  $\alpha$ , qui correspond à une atténuation pure, il apparaît que les sources de distorsion proviennent de deux effets bien distinctes : la dispersion chromatique (par  $\beta_2$ ) qui joue à la fois sur la phase, et l'amplitude de  $A$ , et l'effet Kerr qui déphase  $A$  en fonction de la puissance. Suivant la valeur de  $\beta_2$  et de la puissance en ligne, l'un ou l'autre de ces deux effets peut prédominer.

#### $D < 0$ « régime normal »

Pour des valeurs de dispersion négatives même faibles, il y a coopération entre l'effet Kerr et la dispersion, les impulsions s'élargissent très vite, avec la conséquence système d'apparition d'interférence entre symboles rapidement insurmontables.

#### $D > 0$ « régime anormal »

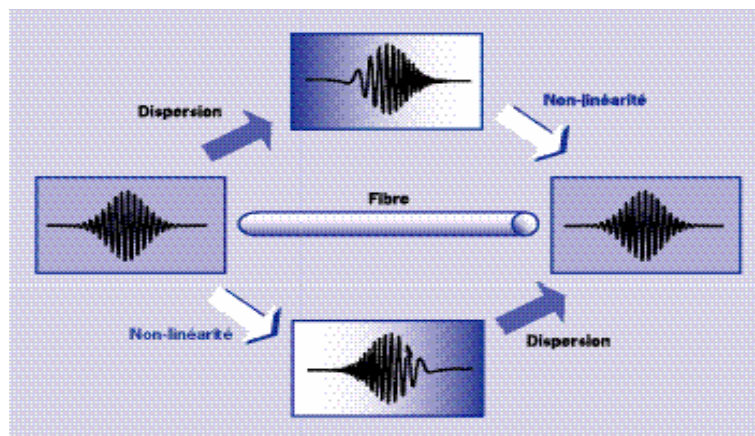
Quand la dispersion est positive, les deux effets ont plutôt tendance à s'opposer et il y a généralement apparition d'instabilité de modulation (explosion des impulsions en impulsions beaucoup plus fines et instables, et élargissement démesuré du spectre optique).

Le soliton est la solution à la recherche d'un équilibre stable dans ce régime de propagation. Il s'agit en fait d'une impulsion de forme et de largeur donnée, d'une puissance donnée, se propageant dans une fibre de dispersion chromatique positive donnée. Lorsque toutes ces conditions sont réunies, il y a propagation à l'infini (en omettant évidemment le terme de perte linéique de la fibre pourtant bien présent). Plus précisément, le soliton est une impulsion optique de forme générique.

$$\text{Equ. 8} \quad \boxed{A(z,t) = \sqrt{P_c} \operatorname{sech}\left(\frac{t}{\tau}\right)} \quad \operatorname{sech}(x) = 1/\cosh(x)$$

Où  $P_c$  est la puissance crête, et  $\tau$  la largeur caractéristique de l'impulsion, elles sont liées par :

$$\text{Equ. 9} \quad \boxed{\tau^2 P_c = f(\beta_2, \gamma)}$$



**Fig. 4 Schéma de principe de la propagation des solitons dans les fibres.**

La non-linéarité de la fibre produit une dérive de fréquences qui compense exactement celle produite par la dispersion. L'impulsion soliton se propage alors sans déformation.

**13.5. Tableau récapitulatif des principaux effets : « causes et remèdes », pour un système fonctionnant à Nx10 Gb/s.**

EFFECT	Cause	Remedy
<b>Chromatic Dispersion (CD)</b>	Dispersion in the fibre (material and waveguide dispersion) – acting on non-zero spectral width signals	Use external modulation, SMF + DCF fibre, DSF transm. fibre, compensation by apodized gratings
<b>Polarization Mode Dispersion (PMD)</b>	Birefringence in the fibre	None
<b>Amplifier Spontaneous Emission (ASE) Noise</b>	Spontaneous emission in optical amplifiers	Perform optical filtering, Optimize power-budget design (keep the power per channel at the OFA input high enough)
<b>Self Phase Modulation (SPM)</b>	Intensity modulation of signal modulates Refractive Index in fibre (Kerr effect) which in turn modulates signal phase	Keep the average power per channel low (< few dBm) at the fibre input
<b>Stimulated Brillouin Scattering (SBS)</b>	Backscattering do to phonon-photon interaction	Keep launched power low enough (< 10 dBm), source dithering Possible serious impairment in case of bi-directional transmission in fibre
<b>Gain tilting (TILT)</b>	Non perfect flatness of optical amplifier spectral response	Use gain clamped amplifiers, flattened amplifiers, equalizing optical filters
<b>Bandwidth Narrowing (BN)</b>	Cascading of spectral responses of optical devices	Minimize number of cascaded elements, use elements with flat response on the channel bandwidth
<b>Homo-wavelength Crosstalk (HoC)</b>	Non-perfectly filtered channels - contributions coming from channels at the same $\lambda$ (possibility of beating)	Optimize performances of optical filters, optimize node architectures
<b>Hetero-wavelength Crosstalk (HeC)</b>	Non-perfectly filtered channels – Contributions coming from channels at different $\lambda$ (additive crosstalk)	Optimize performances of optical filters, optimize node architectures
<b>Cross Phase Modulation (XPM)</b>	Refractive index modulation by one channel causes phase modulation in other co-directional channels	Keep the average power per channel low (< 0 dBm) at the fibre input
<b>Four Wave Mixing (FWM)</b>	Non-linear behaviour of refractive index in fibre – harmonics generated by channel intermodulation	Use non-uniform channel spacing, Increase channel spacing
<b>Stimulated Raman Scattering (SRS)</b>	Scattering due to interactions with molecular vibrations in fibre – short $\lambda$ channels 'pump' long ones in fibre	Decrease channel spacing Keep the average power per channel low (< few dBm) at the fibre input

System	Main limiting effect	Possible remedies	Practical limitations
<b>G.652 fiber</b>			
N x 2.5 Gb/s	chromatic dispersion	external modulation	Reg. span 600 – 800 km Amplif. span 80 - 120 km $N \leq 40$
10 Gb/s	chromatic dispersion	external modulation, dispersion compensation	Reg. span 60 km (w/o comp.) 300 – 400 km (w comp.) Amplif. span 80 –120 km
N x 10 Gb/s	chromatic dispersion, non-linearities	external modulation, dispersion compensation, optimize $\Delta\lambda$ / power-budget	Reg. span 300 – 400 km Amplif. span 40 - 80 km $N \leq 16$
<b>G.653 fiber (DS)</b>			
N x 2.5 Gb/s	non-linearities (FWM, XPM)	large/non-uniform $\Delta\lambda$ optimize power-budget	Reg. span 800 – 1000 km Amplif. span 60 –100 km $N \leq 8$
10 Gb/s	non-linearities (SPM), PMD	low power, none	Reg. span 400 – 500 km Amplif. span 80 –120 km
N x 10 Gb/s	non-linearities (FWM,XPM) PMD	large/non-uniform $\Delta\lambda$ optimize power-budget, none	Reg. span 300 – 400 km Amplif. span 60 –100 km $N \leq 8$
<b>G.655 fiber (NZD)</b>			
N x 2.5 Gb/s	PMD	none	Reg. span 800 – 1000 km Amplif. span 60 -100 km $N \leq 40$
10 Gb/s	non-linearities (SPM), PMD, chromatic dispersion	low power, none, dispersion compensation	Reg. span 300 – 400 km Amplif. span 80 -120 km
N x 10 Gb/s	non-linearities (FWM,XPM) PMD chromatic dispersion	optimize $\Delta\lambda$ /power-budget, none, dispersion compensation	Reg. span 300 – 400 km Amplif. span 60 –100 km $N \leq 32$