

10 Les éléments techniques remarquables et leurs évolutions.

10.1 Les câbles longue distance.

10.1.1 Le milieu d'accueil.

La mer, malgré parfois sa profondeur et la salinité de ses eaux a été et reste le terrain propice pour recevoir des câbles de télécommunications.

La présence de l'eau maintient les températures dans des limites techniques faciles (absence de gel ou de vapeur), la pression est un handicap mais elle reste aussi constante, évitant ainsi aux matériaux utilisés des variations de contraintes mécaniques.

Les mers sont, par définition des domaines internationaux et peu affectés par des bouleversements nationaux, cette caractéristique est mise à profit et les câbles contournent les continents avec des répartitions le long de leurs côtes.

Les quelques écueils proviennent des activités de la pêche où les filets et autres dispositifs similaires détériorent les câbles non enterrés ou déposés sur des faibles fonds.

Auprès des côtes et parfois sur une assez longue distance, qui dépend de la profondeur du fond marin, les câbles de transmission sont enterrés.

Les câbles terrestres sont d'une pose ou d'une dépose (pour réparation ou modification) plus facile, mais les longues distances exigent des accords entre pays frontaliers qui ne sont pas toujours évidents; parfois aussi les pays ou organismes propriétaires ne souhaitent pas voir transiter tel ou tel type d'information pour tel ou tel pays ce qui, pour l'opérateur du câble, présente parfois de nombreuses sources de difficultés.

10.1.2 Les câbles sous-marins.

Les câbles de transmissions sous-marins existent depuis 150 ans; les premiers ont été installés dans l'Atlantique, pour relier l'Europe aux États-Unis, au milieu du siècle dernier.

Les premiers, au débit de 10 bits par seconde transportaient du code Morse, l'isolement à la gutta-percha était particulièrement efficace pour l'époque.

Depuis lors, c'est une course sans fin pour l'augmentation de la bande passante et la réduction des pertes; elle aboutit maintenant à d'étonnants résultats avec les nouvelles techniques à fibres optiques.

L'usage des technologies coaxiales en multiplexage en fréquence permet de placer pour la première fois un câble avec des répéteurs immergés qui transmettait des canaux téléphoniques (36), il fut appelé TAT-1.

En 1988 l'ère des transmissions numériques permit d'installer le TAT-8 conduisant avec 2 paires de fibres optiques et des régénérateurs immergés, 7680 canaux téléphoniques.

Enfin en 1990 les amplificateurs optiques ont remplacé les régénérateurs et sont maintenant utilisés dans tous les types de terrains.

Un nombre important d'amplificateurs optiques sont maintenant installés dans les câbles transocéaniques entre autres, avec des protections du type anneau évolués.

On trouve dans l'océan atlantique les deux parcours TAT-12 et 13 montés en anneau de protection (*Transatlantic Ring Network*), le TPC-5 pour le Pacifique est équipé ainsi (*Transpacific Ring Network*) et le réseau maillé de l'Asie APCN (*south-east Asia mesh network*).

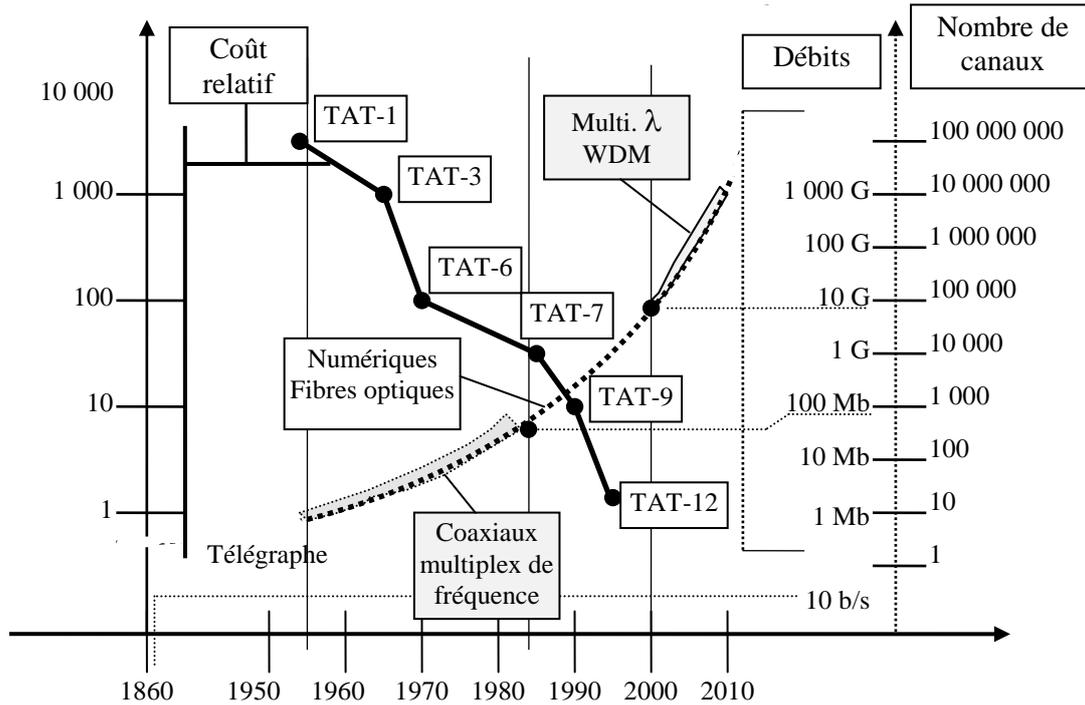
Des nouvelles liaisons, comme celle qui va relier l'Europe à l'Asie via la Méditerranée (SEA-ME-WE3) et à l'Amérique du Sud (Atlantis-2) utiliseront la technologie WDM technologie de multiplexage en longueur d'onde de la lumière qui permet le passage sur une même fibre de plusieurs canaux lumineux.

Les topologies sont pratiquement toutes en anneau de protection avec diversité des parcours, le maillage s'effectue entre grands circuits et est mis en oeuvre dans les cas de graves défaillances.

La Figure 10.1 donne un aperçu des évolutions passées et envisagées en termes de débits, coûts et nombre de canaux vocaux.

La projection en 2010 suppose le succès des recherches en cours.

Figure 10.1 Évolution des caractéristiques et des coûts des lignes.



10.2 L'optique de référence et les circuits associés.

10.2.1 Rappels.

Les fibres optiques sont des guides pour des ondes électromagnétiques de fréquences très élevées dont certaines sont dans le spectre visible (la lumière).

Elles ont comme principales propriétés leur énorme bande passante et une indifférence aux rayonnements ou parasites électromagnétiques de tous genres.

La masse d'une fibre optique est d'environ 1/10^{ème} de la masse d'un câble coaxial d'égale performance pour les fibres optiques actuelles les moins performantes.

La définition d'une fibre optique s'appuie sur la longueur d'onde du signal électromagnétique λ qu'elle peut transporter; elle se détermine par l'équation : $300.000 \text{ km/s (vitesse de la lumière) / f (fréquence)}$.

Les valeurs typiques (en micromètre ou micron) actuelles sont de: 0,85 μm , 1,3 μm , 1,55 μm .

Les fréquences correspondantes sont très élevées (lumière), respectivement : $3,53 \cdot 10^{14}$, $2,30 \cdot 10^{14}$ et $1,93 \cdot 10^{14}$ hertz, soit en Terahertz (THz = 10^{12} Hz) : 353, 230 et 193.

10.2.1.1 Principaux types de fibres.

Il existe, actuellement 3 types principaux de fibres optiques:

-les fibres multimodes à saut d'indice CCITT A2 (norme de référence)

Largeur de bande: 50 MHz / km; atténuation: 3 dB/km (décibels, unité d'atténuation téléphonique, par kilomètre) à la longueur d'onde de 0,85 μm ; portée pratique: 10 km.

-les fibres multimodes à gradient d'indice CCITT A1

Largeur de bande: 1 GHz / km; atténuation: 0,7 dB/km à la longueur d'onde de 1,3 μm ; portée pratique: 30 km.

-les fibres monomode CCITT B (fibres monomodales).

Largeur de bande: 50 GHz / km; atténuation: 0,4 dB/km à la longueur d'onde de 1,55 μm ; portée pratique: 50 km.

Les fibres optiques sont constituées de verres spéciaux, généralement dopés (plomb, erbium, etc.) de 2.000 à 40.000 fois plus transparents que le verre ordinaire.

Ce dopage peut se modifier dans le temps ou peut être modifié (pollué), par rayonnements radioactifs par exemple; La fibre considérée voit alors brutalement sa conduction disparaître; des produits spécifiques résistent maintenant aux rayonnements radioactifs.

10.2.1.2 Modulations.

(Voir Figure 10.3).

L'étendue des longueurs d'ondes transmises par une fibre à 1,55 μm s'étend de 1500 à 1600 nm (nanomètre = 10^{-9} mètres) ce qui implique une bande passante de 12,5 THz (térahertz = 10^{12} Hertz); les amplificateurs dopés à l'erbium la réduisent à 1530 jusqu'à 1565 nm soit 4,5 THz, ce n'est pas si mal.

Les modulations actuelles sont en tout ou rien, en amplitude (Lumière = 1; absence de lumière = 0), la non linéarité en transmission ne permet pas une modulation d'amplitude utilisable.

Le transport simultané de plusieurs fréquences optiques est possible, il fait l'objet d'un paragraphe suivant.

10.2.1.3 Régénérateur.

Le régénérateur est appelé parfois 3R, en anglais: *Re-Time, Re-Shape, Re-Amplify* ce mot représente bien les 3 opérations que doit effectuer ce dispositif qui sont : une remise en forme temporelle, une remise en forme des amplitudes des signaux et enfin une ré-émission.

Le régénérateur reçoit d'un segment de fibre optique des informations lumineuses sur un composant photoélectrique pour les transformer en signaux électriques.

Ensuite il doit mettre en conformité temporelle ces signaux (voir chapitre 2) et leur donner une amplitude suffisante pour actionner un troisième dispositif d'émission de lumière pour un segment suivant de fibre optique.

Le problème le plus délicat consiste à trouver les composants électriques suffisamment rapides pour suivre les débits possibles des fibres.

Un régénérateur est donc un dispositif complexe, dont la conception s'est affinée avec la SDH où des octets de qualité de service et d'adresse permettent la surveillance de chaque régénérateur en ligne.

10.2.1.4 L'amplification optique.

D'énormes progrès ont été accomplis après la découverte des amplificateurs optiques basés sur l'emploi de fibres (440 parties par million en masse) dopées à l'erbium (*EDFA : Erbium Doped Fiber Amplifier*); ils fournissent une transition amplificatrice à la longueur d'onde de 1,55 μm .

Une partie de l'énergie rayonnée (Figure 10.2) par un laser à semi-conducteur, à une longueur d'onde de 1480 nm, est transférée dans la fibre (pompage) de l'amplificateur et amplifie le signal lumineux reçu de la fibre de transport.

La deuxième extrémité de l'amplificateur rayonne alors dans le segment de fibre suivant ce signal amplifié.

Ces amplificateurs ont par rapport aux régénérateurs les avantages de la compacité et d'un meilleur rendement électrique, ce dernier point est important dans les câbles longues distances qui doivent, outre les fibres, transporter sur des fils de cuivre les alimentations électriques des appareils en ligne.

La tension d'alimentation nominale est de -60 volts (amplificateur Alcatel : 1610 OA).

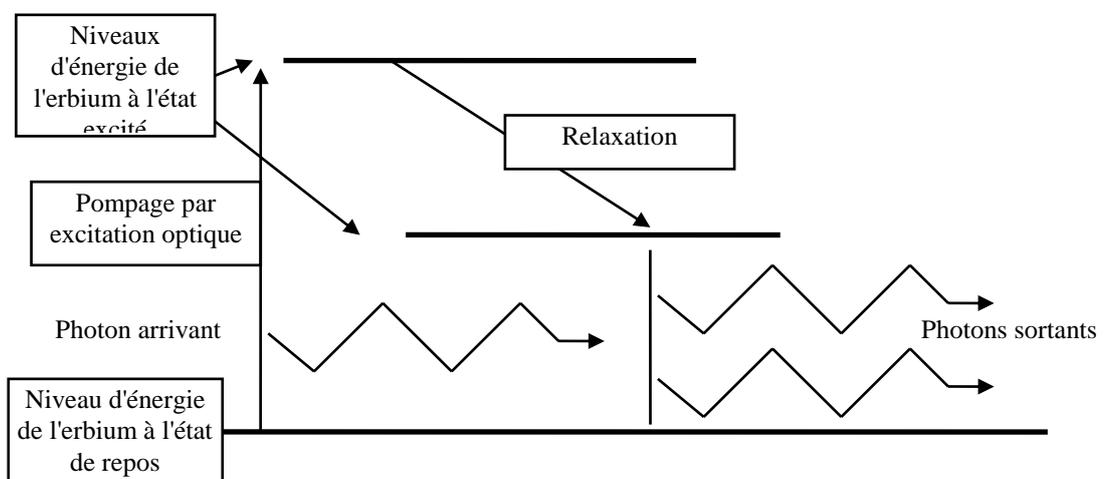
En signaux faibles ils présentent autour de 1550 nm une bande passante de 5000 GHz (largeur de longueur d'onde de 40 nm)

Le facteur de bruit est de 1,5 dB; la non-linéarité ne permet pas de traiter des signaux analogiques.

Les gains s'élèvent jusqu'à 40 dB (100) pour un signal à amplifier dans une large étendue (gain constant); la longueur de segment entre deux amplificateurs peut atteindre 400 km et est en rapport avec les débits demandés.

Leur utilisation est généralisée.

Figure 10.2 Schéma simplifié de l'amplification optique.



10.2.1.5 La sécurité.

Tous les systèmes d'émission laser sont maintenant munis de dispositifs de sécurité coupant l'émission sur rupture de fibre, cette précaution protège les personnels contre les dangers d'un signal lumineux cohérent et puissant.

10.3 Les nouvelles techniques.

10.3.1 Le multiplexage en longueur d'onde.

10.3.1.1 Principe.

En longueur d'onde unique on essaye d'augmenter la bande passante d'une fibre en accroissant la vitesse des impulsions; des limitations physiques sont atteintes par la dispersion de polarisation qui exige une régénération fréquente pour maintenir la qualité en ligne; dans les applications actuelles ce défaut limite le débit à 10 Gb/s

Depuis peu l'on sait maîtriser les émissions multifréquences sur fibres optiques, cette technique est appelée : WDM *Wavelength Division Multiplexing* (multiplexage en longueur d'onde), on dit aussi pour qualifier des interfaces optiques en SDH :: *Colored SDH Optical Interface* .interface optique (colorée) en SDH.

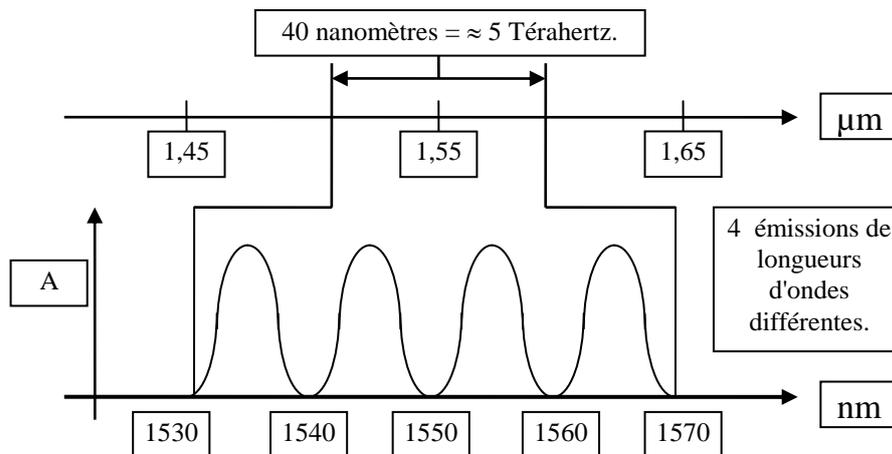
L'emploi du terme WDM est préféré à celui de FDM *Frequency Division Multiplexing* (multiplexage en fréquence) car la distance entre les canaux est relativement grande, nominativement 1 nm soit 124 Gb/s; FDM est utilisé lorsque cette distance est de quelques Gb/s.

Quatre émetteurs de lumière sont disposés au départ de la fibre émettant chacun dans la plage d'accord, quatre récepteurs seront évidemment à l'autre extrémité; les amplificateurs optiques traitent convenablement les 4 fréquences.

Dans l'usage d'un régénérateur il faudrait, en fait, 4 régénérateurs indépendants adaptés chacun à une fréquence lumineuse et effectuant les travaux 3R dont nous avons parlé plus tôt.

Les technologies actuelles permettent de disposer de 10 Gb/s en 4 canaux optiques de chacun à 2,5 Gb/s de bande passante. La Figure 10.3 illustre un tel multiplexage.

Figure 10.3 Multiplexage en longueur d'onde.



Cette technique permet d'équiper graduellement les fibres optiques en service, les amplificateurs optiques étant compatibles.

Certains constructeurs annoncent dès maintenant la réalisation de 4, 8 et même 32 canaux WDM à 2,5 Gb/s sur une fibre initialement utilisée à 2,5 Gb/s.

Les fréquences correspondantes sont séparées par un espace de 100 GHz (0,8 nm) et la stabilité de chaque onde est meilleure que 0,02 nm par an.

La portée à 2,5 Gb/s par canal est de 250 km entre amplificateurs optiques.

Cette évolution est particulièrement bénéfique aux câbles transatlantiques et transpacifiques où la pose et la maintenance sont très onéreuses.

10.3.1.2 Nouvelle couche réseau.

Comme le montre la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** la WDM met bien une nouvelle couche de réseau à la disposition du transport; cette couche peut comporter, en optique, des multiplexeurs d'insertion-extraction (OADM) et des brasseurs numériques (ODCX) permettant dans cette base l'établissement et la modification de multiples chemins.

10.3.1.3 Mécanismes optiques.

Les principaux mécanismes utilisés sont illustrés en Figure 10.4 dans laquelle on trouve :

- Un couplage optique entre 2 noeuds par la commutation d'une longueur d'onde.

- Un brassage optique sur les longueurs d'onde λ_1 des fibres A et B; un brasseur optique (ODCX) comporte plusieurs dispositifs de ce type pour échanger les canaux entre fibres.
 - Une extraction-insertion sur λ_4 de la fibre B.
 - Et sous-entendu, les démultiplexages et multiplexages des faisceaux lumineux des fibres en entrées et en sorties.
- en SDH les flux sont en duplex intégral, c'est le flux inverse d'un flux considéré qui transmet ses informations de service; la figure considérée ne représente donc que la moitié des circuits nécessaires.

La Figure 10.6 donne le schéma d'un multiplexeur extracteur inséreur optique (OADM), il faut noter les fonctions des commutateurs optiques SW (2 x 2) qui peuvent soit relier deux extrémités à deux autres extrémités, soit croiser ces liaisons.

10.3.1.4 Chemins virtuels.

Comme dans tous les réseaux il est également envisagé de définir des chemins optiques virtuels générés par plusieurs brassages optiques, ainsi que le schématise Figure 10.5.

Figure 10.4 Utilisation de la WDM en tant que couche de transport.

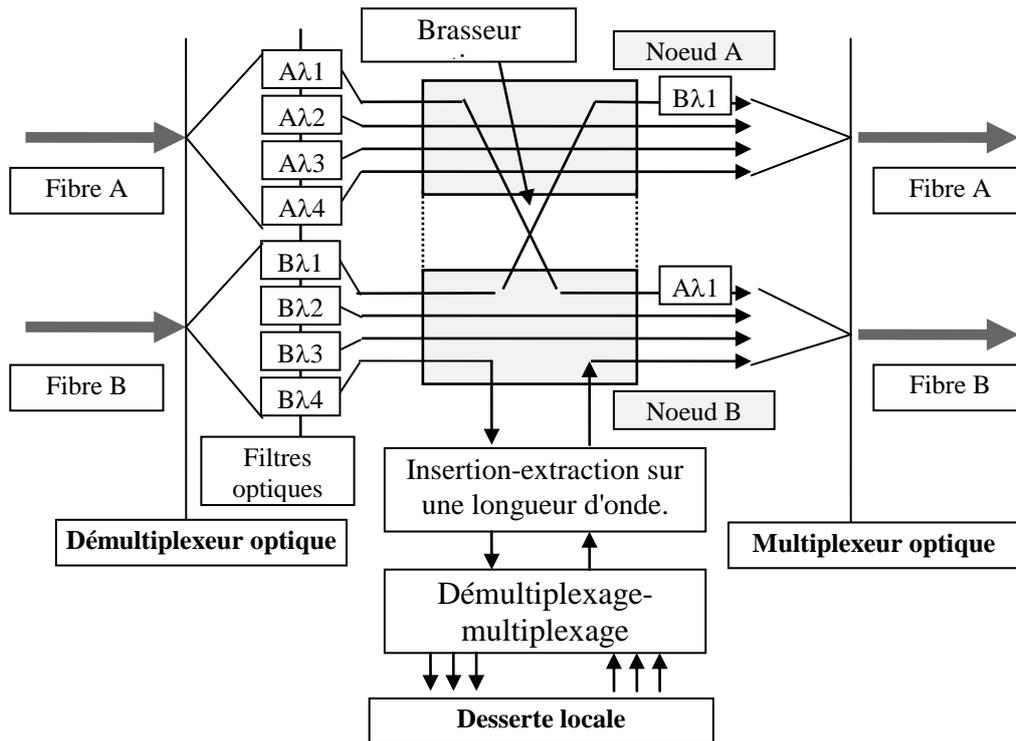


Figure 10.5 définition de chemins optiques.

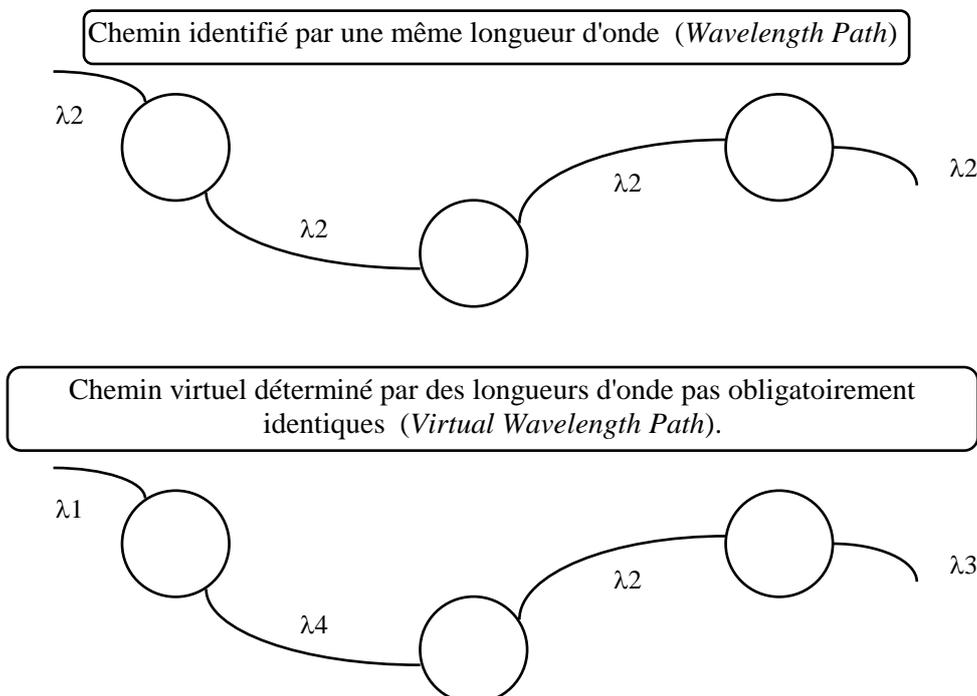


Figure 10.6 Architecture d'un multiplexeur d'insertion extraction optique (OADM).

