

République Algérienne Démocratique et Populaire

Université Mouloud MAMMERRI
de Tizi-Ouzou

Ministère de l'enseignement supérieur
et de la recherche scientifique

*Faculté de Génie Electrique et d'Informatique
Département d'ELECTRONIQUE.*



Mémoire



*Pour l'obtention du diplôme
d'Ingénieur d'Etat en Electronique.
Option : communication.*

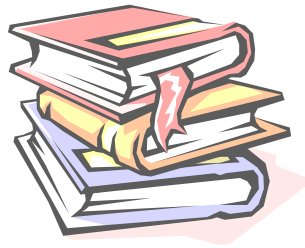
THEME

Réseaux et routage optique WDM.

Présenté par :
Mr. HAMITOUCHE Yacine.

Encadré par :
Mr. AIT BACHIR.

Année universitaire : 2010/2011



Remerciements

Remerciements

*A travers ce modeste travail, je tiens à remercier très chaleureusement mon promoteur **Mr. Ait BACHIR**, pour son soutien et ses conseils avisés. J'en profite également pour saluer sa compétence et son sérieux.*

Mes remerciements les plus vifs s'adressent aussi aux messieurs le président et les membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer mon travail.

Yacine



✧ *Dédicace* ✧

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Je dédie ce modeste travail

A la mémoire mon père.....

A ma très chère mère ;

*A mes frères : **Samy, Said**, et mes sœurs : **Hassiba et Kahina**.*

*A toute la famille **Hamitouche** et la famille **Nassah** pour le soutien qu'ils m'ont apporté et leurs encouragement.*

A tous ceux qui m'ont aidé durant ma vie universitaire.

Sommaire

Introduction Générale :.....	1
Chapitre I : <u>Généralités sur les réseaux de télécommunication</u>	
Introduction :.....	3
I. Les supports de transmission :.....	3
I.1.Caractéristiques communes.....	3
I.1.1. Bande passante.....	3
I.1.2. Impédance caractéristique.....	4
I.1.3. Coefficient de vélocité.....	5
I.1.4. Vitesse de modulation.....	5
I.1.5. Le débit binaire.....	5
I.2. Les supports guidés.....	5
I.2.1. La ligne bifilaire parallèle.....	5
I.2.2. Paire torsadée.....	5
I.2.3. Le câble coaxial.....	6
I.2.4. Les guides d'ondes.....	7
I.3. Les supports libres.....	7
I.3.1. Faisceaux hertziens.....	7
I.3.2. La transmission par satellite.....	8
I.4. Les supports optiques.....	9
I.4.1. La liaison optique à l'air libre.....	9
I.4.2. La fibre optique.....	9
I.4.3. Principe de la fibre optique.....	10
I.4.3.1. Réfraction.....	10

I.4.3.2. L'ouverture numérique	11
I.4.4. Les profils de la fibre optique	11
I.4.4 .1. Equation de propagation	11
I.4.4.2. Type de fibre optique	12
I.4.4.2.1. Fibre Optique Multimode à Saut d'Indice :	12
I.4.4.2.2. Fibre Optique Multimode à Gradient d'Indice :	13
I.4.4.2.1. Fibre Optique Monomode :	14
I.4.4.3. Limitations des transmissions par fibre optique	14
I.4.4.3.1. L'atténuation	14
I.4.4.3.2. La dispersion	15
I.4.4.3.2.1. La dispersion chromatique	15
I.4.4.3.2.2. La dispersion modale	16
I.4.4.3.2.3. La dispersion de polarisation	16
I.4.4.3.3. La bande passante	16
I.4.4.3.4. Les effets non-linéaires dans la fibre optique	17
I.4.4.3.4.1. Modulation autophase	18
I.4.4.3.4.2. Modulation transphase	18
I.4.4.3.4.3. Mélange à quatre ondes.....	18
II. Le multiplexage	18
II.1. Définition de multiplexage	18
II.2. Multiplexage fréquentiel FDM	19
II.3. Multiplexage temporel TDM.....	20
II.4. La technique MIC	20
II.4.1. Les étapes de la numérisation	21
II.4.1.1. L'échantillonnage	21
II.4.1.2. La quantification.....	21
II.4.1.3. Le codage.....	21

II.4.2. Le multiplexage à 2048 et 1544 Kbits/s	21
II.4.2.1. Comparaison entre la norme Américaine et Européenne :	23
II.5. Hiérarchie digital plésiochrone.....	23
II.6. Multiplexage synchrone SONET et SDH.....	24
II.6.1. La hiérarchie SONET	24
II.6.2. La hiérarchie SDH	24
II.7. Technique de multiplexage WDM.....	25
III. Les différents réseaux de télécommunication	25
III.1. Le réseau local d'entreprise(LAN).....	25
III.2. Le réseau d'accès.....	25
III.3. Les réseaux MAN.....	25
III.4. Les réseaux WAN	26
Conclusion.....	26

Chapitre II : la technologie WDM

INTRODUCTION.....	26
I. Principe de WDM	26
II. Structure du système WDM	27
II.1. Composants d'émission/réception.....	27
II.1.1. Composants d'émission.....	27
II.1.1.1. Source optique	27
II.1.1.1.1. Les diodes électroluminescentes (LED, Light Emission Diode	28
II.1.1.1.2. Le LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)	28
II.1.1.1.3. La différence DEL / DL.....	28
II.1.1.1.4. Principe de fonctionnement d'un LASER	29
II.1.1.1.5. Bruit d'intensité optique (Relative Intensity Noise ou RIN).....	30
II.1.1.1.6. L'exploitation du LASER dans les réseaux WDM.....	30

II.1.1.2 .Modulateurs/démodulateurs	32
II.1.1.2.1.Modulation directe.....	32
II.1.1.2.2. Modulation externe.....	32
II.1.1.2.3. Modulateurs de Mach-Zehnder (électroréfractifs).....	32
II.1.1.2.4. Modulateurs électro-absorbants.....	33
II.1.2. Composants de réception.....	33
II.1.2.1. Le récepteur optique	33
II.1.2. 1.1. Photodecteurs.....	34
II.1.2. 1.1.1. Les photodiodes (PIN).....	35
ii.1.2. 1.1.2. Photodiode à avalanche (APD)	36
II.1.2. 1.1.3. Comparaison PIN, APD	37
II.1.2. 1.1.4. Amplification électrique	37
II.1.2. 1.1.5. Le filtrage.....	38
II.1.2. 1.1.5. La décision.....	38
II.2. Composants du canal de transmission	38
II.2.1.Fibre optique.....	38
ii.2.2.Amplificateur optique	39
II.2.2.1. Principe de l'amplification optique	39
II.2.2.2. Les amplificateurs à fibre dopée Erbium (EDFA).....	39
II.2.2.3 Les amplificateurs à semi-conducteur	41
II.2.2.4. Les amplificateurs Raman	41
II.2.2.5. Comparaison des amplificateurs.....	42
II.2.2.6. Le rapport signal à bruit optique (OSNR)	43
II.2.3. module de compensation de dispersion	43
II.2.4. Les isolateurs	43
II.2.5. Les coupleurs.....	44
II.2.6. Les filtres optiques.....	44

II.2.7. Les commutateurs optiques	45
II.2.7.1. Les répartiteurs	45
II.2.7.2. Les multiplexeurs à insertion /extraction optiques	45
II.2.7.2.1. OADM fixe	45
II.2.7.2.2. OADM dynamique	45
II.2.7.3. Les brasseurs optiques (OC, Optical Cross Connect).....	45
II.2.7.3.1. Les brasseurs passifs.....	45
II.2.7.3.2. Les brasseurs actifs (brasseurs avec échange de λ) :.....	46
II.2.8. Convertisseurs optiques	46
II.2.8.1. La conversion par commutation (Optical switch types).....	46
II.2.8.2. La conversion par mélange (Optical mixing types).....	47
III. Multiplexage en longueurs d'onde WDM.....	47
III.1. Multiplexage à filtre optique	47
III .1.1. Les types des filtres optiques.....	47
III.1.1.1. Les filtres dichroïques	47
III.1.1.2. Les filtres Fabry-Perot.....	48
III.1.1.3. Les filtres à réseaux de Bragg	48
III.2. Multiplexage à coupleurs sélectifs	48
III.3. Multiplexage à réseau de diffraction.....	48
IV. Les avantages de la technologie WDM.....	49
Conclusion.....	50

Chapitre III : simulation d'une liaison WDM a l'aide de logiciel COMSIS

Introduction	51
I. Le logiciel de simulation COMSIS	51
I.1. Présentation générale	51

I.1.1. L'éditeur du schéma-bloc.....	51
I.1.2. la bibliothèque.....	52
I.2. Les différentes étapes de simulation d'un système.....	53
II. Simulation d'une liaison optique WDM.....	57
II.1. Simulation 1 : 4*10 Gbits/s	58
II.1.1. Schéma de la liaison	58
II.1.2. Description des blocs fonctionnels de la liaison a 4*10 Gbits/s.....	59
II.1.2.1. Bloc fonctionnel c c : Courant-continu.....	59
II.1.2. 2. Bloc fonctionnel sb : Séquence Binaire Aléatoire.....	59
II.1.2. 3. Bloc fonctionnel ds : Détection-Seuil.....	59
II.1.2. 4. Bloc fonctionnel ls : Laser-Système	59
II.1.2. 5. Bloc fonctionnel mod : Modulateur Mach-Zehnder.....	59
II.1.2. 6. Bloc fonctionnel mux/dmux : Mux/Démuux non polarisés	60
II.1.2. 7. Bloc fonctionnel fibr : Fibre Optique Monomode.....	60
II.1.2. 8. Bloc fonctionnel ampl : Amplificateur Optique	60
II.1.2. 9. Bloc fonctionnel pin : Photodiode-Pin	60
II.1.2. 10. Bloc fonctionnel fil : Filtre-Cosinus-BF.....	60
II.1.3. Résultat de la simulation.....	61
II.1.3.1. Représentation temporelle	61
II.1.3.2. La densité spectrale de puissance	63
II.1.3.3. Le diagramme de l'œil.....	64
II.1.4. Les mesures	65
II.2. Simulation 2. 4*2.5 Gbits/s	65
II.2.1. Schémas de la liaison.....	65
II.2.2. Description des blocs fonctionnels de la liaison a 4*2.5 Gbits/s.....	65
II.2.2.1. Bloc fonctionnel ent : Courant Laser.....	65
II.2.2.2. Autres bloc fonctionnel.....	65

II.2.3. Résultat de la simulation.....	66
ii.2.3.1. Les signaux de la liaison	66
II.2.3.2. La densité spectrale de puissance	68
II.2.3.3. Diagramme de l'œil	69
II.2.4. Les mesures	69
II.3. Comparaison entre les modèles simulés	69
III. Interprétation de résultats de la simulation.....	70
Conclusion.....	70

CHAPITRE IV : routage et affectation de longueur d'onde dans un réseau WDM

Introduction	71
I. Principes de routage dans les réseaux optiques WDM	71
I.1. La conversion totale	71
I.2. La conversion partielle.....	72
II. Les types des réseaux WDM	72
II.1. Réseaux Broadcast and Select	72
II.2. Réseau Wavelength Routed.....	72
II.3. Evolution des réseaux optiques	73
II.3.1. Les réseaux opaques	73
II.3.2. Les réseaux transparents	73
II.3.3. Les réseaux hybrides.....	73
II.4. Les algorithmes de routage et d'affectation de longueurs d'ondes (RWA)	73
II.4.1. Le routage	75
II.4.2. Type de trafic	76
II.4.2.1. Le trafic statique	76
II.4.2.2. Le trafic incrémental.....	76

II.4.2.3. Le trafic dynamique	76
II.4.3. Heuristique de routage	77
II.4.3.1. Routage fixe	77
II.4.3.2. Routage fixe alterné	77
II.4.3.3. Routage adaptatif	78
II.4.4. Algorithme de routage	78
II.4.4.1. Modélisation	78
II.4.4.2. Modélisation d'un réseau optique WDM	79
II.4.4.3. Modélisation d'une instance de communication	79
II.4.4.4. Modélisation du problème de routage	79
II.4.5. Algorithmes de base pour la recherche de chemin	80
II.4.5.1. Algorithme de Dijkstra	80
II.4.5.2. Algorithme de la marche aléatoire	81
II.4.5.3. Algorithme de plus long chemin	82
II.4.6. Affectation de longueurs d'onde	83
II.4.6.1. Affectation statique de longueurs d'onde	84
II.4.6.2. Affectation dynamique de longueurs d'onde	84
II.4.6.2.1. Algorithme Random Fit	84
II.4.6.2.2. Algorithme First-Fit	84
II.4.6.2.3. Algorithme Least-Used	85
II.4.6.2.4. Algorithme Most-Used	85
II.4.6.2.5. Algorithme Min-Product	85
II.4.6.2.6. Algorithme Max-Sum	85
II.4.6.2.7. Algorithme Relative Capacity Loss	86
II.5. Optimisation des réseaux optiques WDM k-fibres	86
II.5.1. Réseaux WDM k-fibres et hypergraphes	87
II.5.1.1. Hypergraphe des conflits de R(I) dans	87

II.5.1.2. Coloration k-tolérante.....	88
II.5.2. Dimensionnement d'un réseau multi-fibres.....	89
II.6. Problème de flot et multiflot.....	90
II.6.1. Programme linéaire sommet-arc : taille polynomiale.....	91
II.6.2. Programme linéaire arc-chemin : dual combinatoire.....	93
III. la protection de l'instance de communication dans les réseaux WDM.....	94
III.1. la protection (1+1 ou 1 :1).....	95
III.2. la protection M : N	95
Conclusion.....	95

Chapitre V : Application sur l'algorithme DIJKSTRA

Introduction	96
I. Application.....	96
II. Principe de l'algorithme de Dijkstra.....	96
II.1. Distance entre le nœud (1) et le nœud (10).....	96
II.2. Présentation sous forme de tableau.....	103
Conclusion et perspective.....	104

Annexe

Liste des figures

Bibliographie

Liste des figure

- Figure I.1. Illustration de la bande passante par la fonction affaiblissement-fréquence.
- Figure I.2. Modélisation d'une ligne de transmission.
- Figure I.3. Illustration de phénomène concernant les paires torsadées.
- Figure I.4. Le câble coaxial
- Figure I.5. La liaison hertzienne.
- Figure. I.6. Liaison satellitaire.
- Figure. I.7. constitution générale d'une fibre optique.
- Figure. I.8. Ouverture numérique d'une fibre optique.
- Figure. I.9. Propagation des ondes dans une fibre optique multimode à saut d'indice.
- Figure. I.9. Propagation des ondes dans une fibre optique multimode à gradient d'indice
- Figure. I.11. Propagation de mode fondamentale dans une fibre monomode à saut d'indice.
- Figure. I.12. Atténuation des fibres optiques.
- Figure. I.13. Dispersion chromatique
- Figure. I.14. Dispersion modale
- Figure. I.15. Dispersion de polarisation.
- Figure. I.16. Multiplexage fréquentiel FDM
- Figure. I.17. Multiplexage temporel TDM
- Figure. I.18. Structure de la trame de débit 2048Kbits /s.
- Figure. I.19. structure de la trame de débit de 1544Kbit/s
- Figure. I.20. Les différents débits de la hiérarchie PDH.
- Figure. I.21. Principe d'une liaison WDM
-
- Figure. II.1. Principe de WDM
- Figure. II.2. Composants d'un réseau optique WDM.
- Figure. II.3. Spectre d'émission d'une DEL.
- Figure. II.4. Spectre d'émission d'une DL.
- Figure. II.5. Caractéristique de transfert pour différentes températures
- Figure. II.6. L'injection du Laser dans la fibre optique.
- Figure. II.7. Le Laser Fabry-perot.

Figure. II.8. Le Laser DFB

Figure. II.9. La Laser DBR

Figure. II.10. Synoptique de la modulation directe.

Figure. II.11. Synoptique de la modulation externe

Figure. II.12. Schéma d'un modulateur Mach-Zehnder à multiples puits quantiques.

Figure.II.13.Structure d'un guide d'onde en arête contenant un matériau électro-absorbant

Figure. II.14. Schéma d'un récepteur de données à détection directe

Figure. II. 15. Photodiode PIN

Figure. II.16. Structure d'une photodiode à avalanche

Figure. II.17. Rapport signal à bruit en fonction de l'intensité du signal émis pour les photodiodes PDA et PIN.

Figure. II.18. Schéma simplifié des niveaux en énergie intervenant dans le processus d'émission stimulée

Figure. II.19. Schéma de principe de l'amplificateur à fibre dopée Erbium (EDFA).

Figure. II.20. Configuration de base d'un amplificateur optique à semi-conducteur

Figure. II.21. Les blocs fonctionnels d'un brasseur actif

Figure. II.22. La variation du coefficient de transmission d'un filtre dichroïque

Figure. II.23. La variation du coefficient de transmission d'un filtre Fabry-perot

Figure. II.24. Schéma principe d'un réseau de diffraction en réflexion

Figure. III.1.L'éditeur de schéma-bloc de COMSIS	52
Figure. III.2. La bibliothèque de modèles de COMSIS	52
Figure. III.3. Menu des modèles de COMSIS	53
Figure. III.4. Menu principal du logiciel	54
Figure. III.5. Menu visualisation de COMSIS.....	54
Figure. III.6. Menu Analyse de COMSIS.....	55
Figure. III.7. Menu résultat graphique de COMSIS	55
Figure. III.8. Menu Evaluation des performances.	56
Figure . III.9. Menu Variables et Pré-traitement à visualiser.	57
Figure. III.10. schéma bloc de la liaison optique 4*10 Gbits/s	58
Figure. III.11. le diagramme de l'œil à la sortie de la liaison 4*10 Gbits/s	64
Figure. III.12. Schémas bloc de la liaison 4*2.5 Gbits/s.	65

Figure. III.13. Le diagramme de l'œil à la sortie de la liaison 4*2.5 Gbits/s	69
Figure. IV.1. Connexion permanente de bout en bout selon ITU-T G.807	74
Figure. IV.2. Connexion commuté selon ITU-T G.807	75
Figure. IV.3. Exemple de flot.	91

Introduction Générale :

La montée en débit des systèmes de transmission est un phénomène impressionnant qui ne cesse de prendre de l'ampleur de puis quelques décennies. Ce phénomène est expliqué par la conjonction de plusieurs facteurs.

Le contexte économique actuel et l'ouverture des marchés a favorisé l'expansion de réseaux mondiaux et notamment le développement du Web et les applications Internet telles que les applications temps réel qui exigent une bande passante de plus en plus importante. Cette demande croissante de capacité a rencontré un contexte technologique favorable avec l'avènement des technologies optiques et notamment le WDM (Wavelength Division Multiplexing) au début des années 1990. La technologie WDM a révolutionné les réseaux de communication, et a permis d'atteindre des débits de l'ordre du Giga bit grâce aux avantages de la transmission sur fibre optique qui présente une faible atténuation.

En effet, le problème de la dégradation de la qualité du signal optique transmis dans les réseaux WDM ne se posait pas vu que le signal transmis passe au domaine électronique au niveau de tous les nœuds qu'il traverse ce qui permet de le remettre en forme et de compenser l'atténuation. Ceci entend, que dans les réseaux WDM, des équipements électroniques sont nécessaires, sauf que depuis quelques années on commence à s'intéresser à la faisabilité de réseau tout-optique ou transparent où il n'y a pas lieu de faire des conversions opto-électroniques mais qui restent limiter a quelques petit réseaux seulement. Les réseaux hybrides représente une alternative a mi-chemin entre les réseaux WDM existants et les réseaux transparents.

Comme les réseaux WDM fonctionnent en mode connecté, alors, lorsqu'un émetteur veut se mettre en communication avec un récepteur, un chemin à travers le réseau doit être assigné à cette communication. Le chemin optique décrit une suite de fibres allant de l'émetteur au récepteur. La communication est alors parfaitement déterminée si la longueur d'onde utilisée sur chaque fibre pour la communication est connue. Cet ensemble constitue le routage de la communication. Quand à l'affectation de longueurs d'ondes, elle doit se faire tout en répondant à une contrainte forte : deux chemins utilisant la même fibre ne doivent pas utiliser la même longueur d'onde. Sinon, les signaux provenant des deux chemins se brouilleraient mutuellement et les informations qu'ils transportent seraient perdues. Certains routeurs permettent d'effectuer la conversion de longueur d'onde et donc permettent à un chemin qui rentre dans le nœud avec une certaine longueur d'onde d'en ressortir avec une autre. On peut distinguer deux types de schémas de conversion : la conversion totale et la conversion partielle. Ces deux types de routeurs existent, mais restent assez cher. Lorsque la conversion de longueur d'onde n'est pas autorisée au niveau des routeurs, c'est-à-dire qu'à un chemin est affecté une seule longueur d'onde qui est utilisée sur toutes les fibres qu'il

empreinte alors une contrainte de continuité optique de longueur d'onde est imposée et elle doit être vérifiée lors du routage d'une requête.

Le problème de routage et d'affectation de longueurs d'onde ou RWA consiste à établir une route et affecter une longueur d'onde pour chaque chemin optique requis par une demande de connexion. Pour résoudre ce problème, des algorithmes heuristiques sont proposés. Les demandes de trafic à satisfaire peuvent être de trois types : permanentes, incrémentales ou dynamiques. Dans ce travail, on étudie la faisabilité des différents types de réseaux WDM et on cherche à optimiser son fonctionnement en choisissant le débit convenable et l'heuristique de routage la plus adaptée de manière à assurer que les signaux optiques ne soient pas dégradés au-dessus d'un certain seuil tout en transmettant le plus d'information possible et que les données soient transmises d'une manière fiable de la source jusqu'à la destination. Pour cela, ce travail se répartit comme suit :

Dans le premier chapitre, nous évoquons les réseaux et support de transmission, et on étudiera particulièrement la fibre optique qui est devenue le support de transmission le plus utilisé à travers le monde.

Dans le deuxième chapitre, on étudie la technologie de multiplexage la plus utilisée dans les réseaux optiques, à savoir, la technologie de multiplexage WDM, montrer ses avantages, ses pénalités et les composants optiques permettant de la mettre en œuvre.

Dans le troisième chapitre, nous réalisons une simulation de deux liaisons optiques WDM à l'aide de logiciel de simulation COMSIS tout en présentant ses fonctionnalités et en analysant les résultats de simulations.

Dans le quatrième chapitre, nous décrivons le problème de routage et d'affectation de longueurs d'onde et nous présentons les algorithmes pour résoudre le problème.

Dans le cinquième chapitre, le principe de fonctionnement de l'algorithme Dijkstra est présenté. Enfin nous terminons par une conclusion générale.

Introduction :

Les premiers réseaux de télécommunications ont été développés pour satisfaire les demandes de communication téléphoniques (transport de voix) et utilisaient des câbles électriques. Mais depuis l'émergence de l'internet, les réseaux de télécommunication ont du s'adapter à un changement dans la nature de trafic. La voix qui était prédominante et dont la nature était assez prévisible, a été dépassée en termes de bande passante requise par les communications de données. Ceci pose plusieurs défis aux prestataires de services : pouvoir déployer des réseaux de très grande capacités pour répondre à l'énorme demande de bande passante dont l'augmentation est exponentielle, tout en garantissant une bonne qualité de service et bien sur en minimisant les coûts d'opérations.

I. Les supports de transmission :

Le transport de l'information d'un point à un autre nécessite un média de transmission. Alors nous allons découvrir les différents moyens de transmission qui puissent exister notamment :

- ✓ Les supports guidés (supports en cuivre et supports en optiques) ;
- ✓ Les supports libres (faisceaux hertziens et liaisons satellitaires).

I.1. Caractéristiques communes :

I.1.1. Bande passante :

L'affaiblissement du signal sur une ligne est en général considéré négligeable pour les fréquences comprises entre deux fréquences limite définissant la bande passante $H = F2 - F1$, mesure en Hz, de la ligne et augmente en dehors de ses limites :

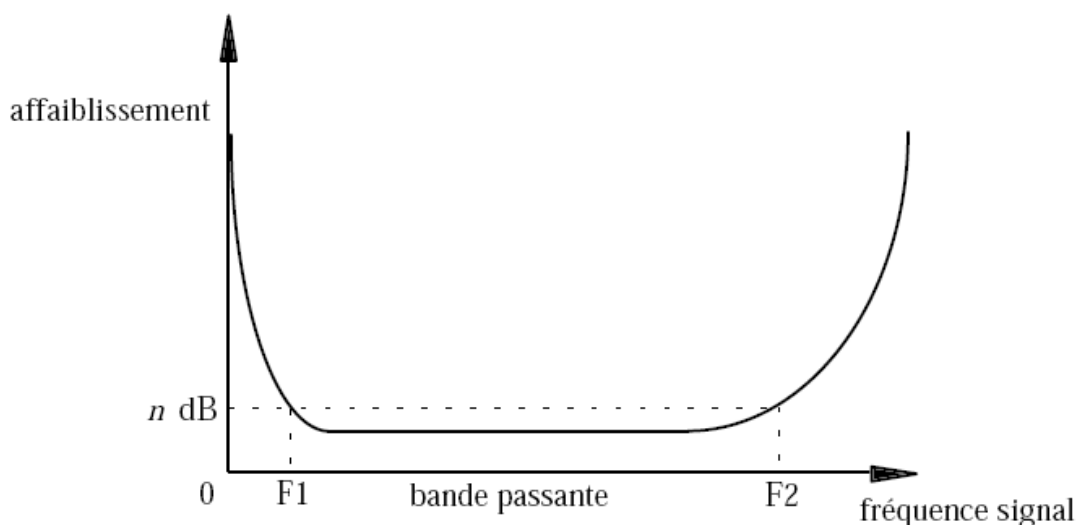


Figure I.1. Illustration de la bande passante par la fonction affaiblissement-fréquence.

La bande passante se définit alors par rapport à un affaiblissement admissible souvent $A = -3\text{dB}$ (ceci correspond donc à une baisse admissible de 2 fois de l'énergie du signal, donc à une baisse de 1,4 fois de son amplitude).

L'affaiblissement linéique (défini donc pour une certaine fréquence) est mesuré en décibels/unité de longueur (dB/km) :

$$A_l = 10 \log_{10} \frac{\text{énergie du signal initial}}{\text{énergie du signal après une unité de longueur (km)}}$$

I.1.2. Impédance caractéristique :

Pour un canal qui transmet des signaux électriques, une caractéristique importante est l'impédance caractéristique de la ligne. En effet, une ligne peut être modélisée comme une suite de cellules élémentaires (une cellule par unité de longueur), à chaque cellule correspondant un circuit équivalent :

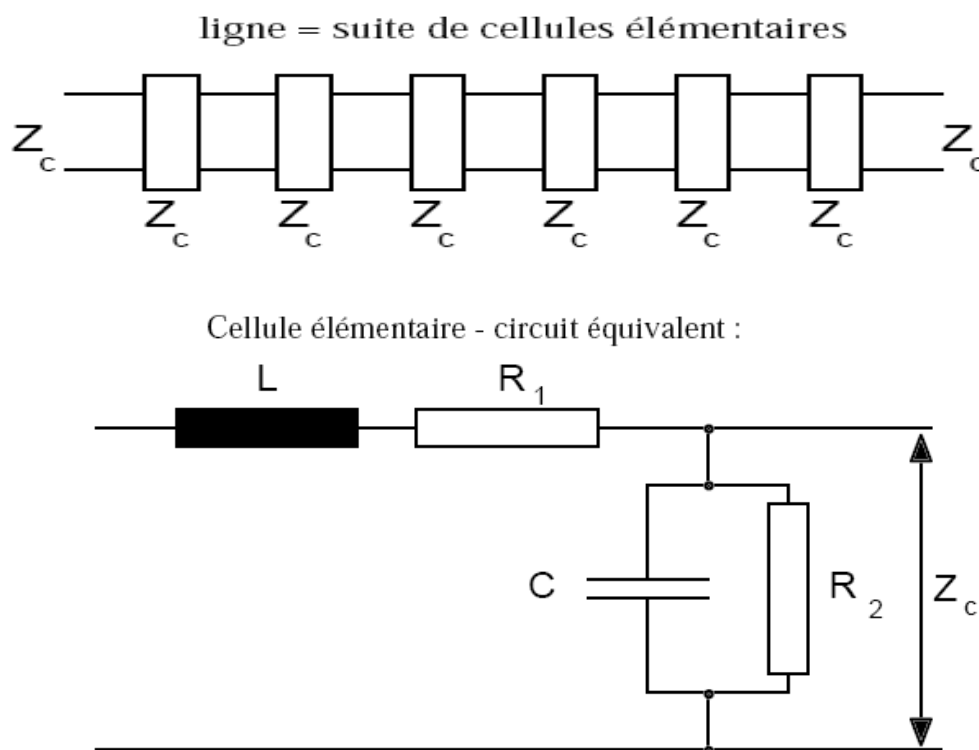


Figure I.2. Modélisation d'une ligne de transmission.

La résistance R_1 de la ligne est proportionnelle à la longueur et la résistivité du matériel conducteur utilisé, et inversement proportionnelle à sa section. L'inductance L est proportionnelle à la longueur et dépend du diamètre des conducteurs, de leur espacement et de leur configuration. La capacité C de la ligne est proportionnelle à sa longueur et à la permittivité du milieu isolant et inversement proportionnelle à l'espacement entre les conducteurs.

Une ligne doit être refermée sur son impédance caractéristique et ne pas subir de variation locale d'impédance. Dans le cas contraire, des ondes réfléchies apparaissent, produisant une instabilité des signaux et une pollution électromagnétique de l'environnement.

I.1.3. Coefficient de vélocité :

Le coefficient de vélocité est une grandeur qui mesure la vitesse de propagation du signal dans un support. C'est le rapport entre la vitesse de propagation réelle et la vitesse de la lumière ($c=3.10^8$ m/s).³

I.1.4. Vitesse de modulation :

C'est le nombre de valeurs physiques émises par seconde. La vitesse de modulation (ou rapidité de modulation) se note R_m et s'exprime en bauds

$$R_m = \frac{1}{T_m}$$

La vitesse de modulation correspond au nombre d'état physique que l'interface peut émettre par seconde.

I.1.5. Le débit binaire :

Egalement appelé vitesse de transmission, c'est le nombre de valeurs logiques transmises par seconde. Il est noté D et s'exprime en bits /s.

$$D = \frac{R_m}{k} \log_2(V)$$

k correspond au nombre de valeurs physiques utilisées pour coder l'information.

I.2. Les supports guidés :

I.2.1. La ligne bifilaire parallèle :

Une ligne bifilaire est composée de deux fils parallèles (conducteurs) qui sont maintenus à une distance constante par un isolant ou une bande en polyéthylène. Du fait que la masse de diélectrique entre les deux conducteurs est faible, la ligne bifilaire a des pertes nettement moins élevées que le câble coaxial, en outre le fil utilisé est généralement de diamètre plus élevé que celui d'un câble coaxial. La ligne bifilaire peut donc supporter des surtensions locales très élevées (intensité importante) ; c'est pour cela qu'elle est utilisée pour l'alimentation d'antennes à impédance élevée.

I.2.2. Paire torsadée :

La paire torsadée est le support de transmission le plus ancien et encore le plus largement utilisé, principalement pour les services téléphoniques. La paire torsadée est composée de deux conducteurs en cuivre, isolés l'un de l'autre, et enroulés de façon

hélicoïdale autour de l'axe longitudinale. L'affaiblissement croît rapidement avec la longueur du support.

Le débit binaire accessible dépend de la qualité du câble et de sa longueur ; il peut varier entre quelques dizaines de Kbit/s sur quelques dizaines de km, quelques Mbit/s sur quelques km et plusieurs centaines de Mbit/s pour quelques centaines de mètres.

La sensibilité aux parasites d'origine électromagnétique est relativement faible et peut être réduite si le câble est blindé.

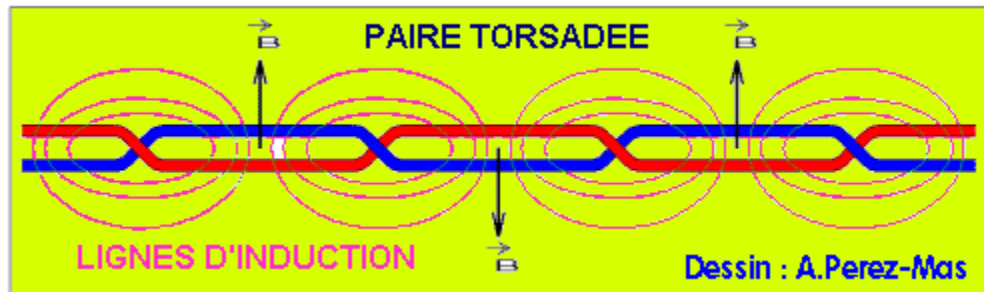


Figure I.3 .illustration de phénomène concernant les paires torsadées.

Les vecteurs inductions créés par des torsades successives sont opposés donc s'annulent, provoquant ainsi moins de perturbations électromagnétiques autour d'eux, donc moins de diaphonie.

I.2.3. Le câble coaxial :

Un câble coaxial est constitué de deux conducteurs cylindriques sur un même axe, séparés par un isolant de qualité (Téflon, polythène, polypropylène, air..).

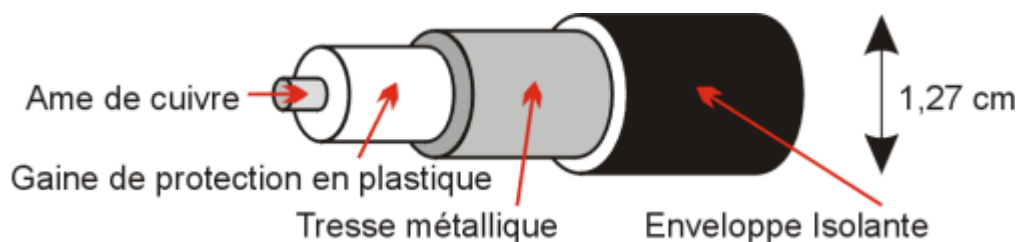


Figure. I.4.Le câble coaxial

Plus cher que la paire torsadée, le câble coaxial est encore largement utilisé pour des artères à moyen débit des réseaux de transport, ainsi que pour les réseaux de télédiffusion. Deux types de câbles sont les plus utilisés, le câble à impédance caractéristique de 50 ohms (notamment pour les réseaux locaux) et le câble à impédance de 75 ohms (télédiffusion, artères internes aux réseaux téléphoniques interurbains et internationaux).

La bande passante peut atteindre 400 MHz sur plusieurs dizaines de km. Le débit binaire typiquement employé est de 10 Mbit/s (réseaux Ethernet) sur des distances inférieures à 1km et peut monter jusqu'à plusieurs centaines de Mbit/s sur des distances très courtes.

I.2.4. Les guides d'ondes :

Représenter pratiquement sous forme des tuyaux métalliques creux, diélectriques ; les guides d'ondes servent comme lignes de transmission en hyperfréquences. On en distingue sous plusieurs formes à savoir :

- ✓ Guide rigide à section rectangulaire.
- ✓ Guide à section circulaire.
- ✓ Guide semi souple à section elliptique etc.

Les guides d'ondes ont pour inconvénient majeur, la non utilisation sur des longues distances mais possèdent néanmoins quelques propriétés :

- **Fréquence de coupure** : c'est la fréquence à partir de la quelle, les ondes peuvent être transmises dans un guide.
- **Energie électromagnétique** : c'est l'énergie transportée à l'intérieur d'un guide d'ondes.

I.3. Les supports libres :

I.3.1. Faisceaux hertziens :

Une liaison par faisceaux hertziens est généralement constituée par deux stations terminales et plusieurs stations relais intermédiaire, on dit qu'il s'agit d'une liaison point à point.

Le domaine des faisceaux hertziens s'étend de 250 MHz à environ 22GHz, avec une distance de 10 à 80 Km entre deux relais successifs.

Au cours de la propagation, l'onde hertzienne subit principalement trois types d'atténuations :

- ✓ Celle correspondant à son rayonnement en l'espace libre, qui est fixe, et toujours présente (de l'ordre de 140dB en générale), et parfois plus accentuée par la présence d'obstacles.
- ✓ Celle provenant ensuite des variations aléatoires des conditions climatologiques : guidage, et précipitation (perte possible d'une trentaine de dB).
- ✓ Celles des phénomènes d'interférence, conséquence de la réflexion principales, ou de multi-trajets (pertes possibles d'une trentaine de dB).

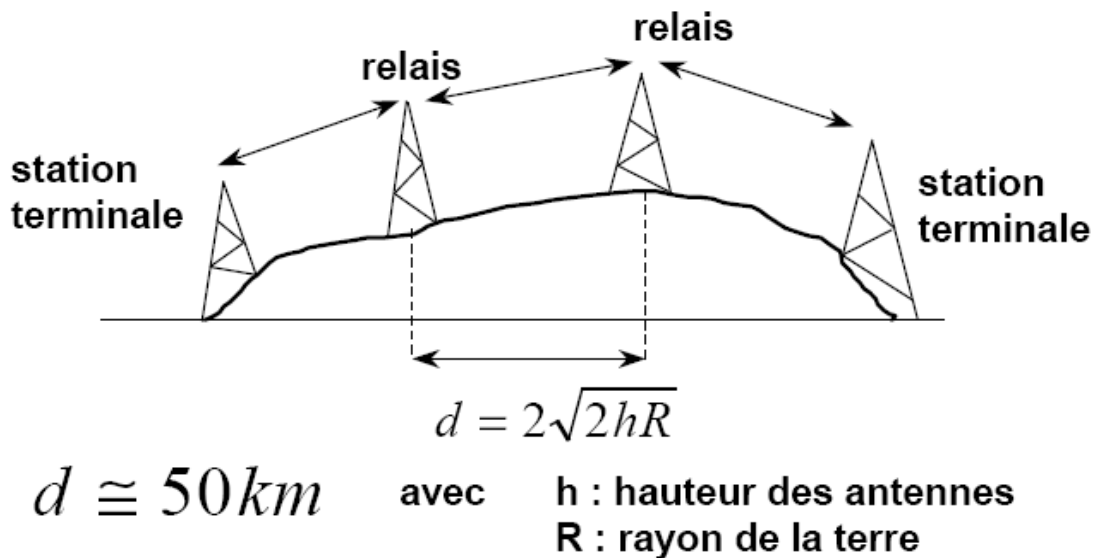


Figure. I.5. La liaison hertzienne.

Les faisceaux hertziens sont utilisés principalement dans des zones d'habitats dispersées ou lorsque les conditions géographiques l'exigent, (reliefs montagneux, lacs...etc.) pour transmettre, des signaux numériques ou analogiques, entre deux points fixes. Il utilise des ondes radioélectriques très fortement concentrées à l'aide d'antennes directives. La directivité du faisceau est d'autant plus grande que la longueur d'onde utilisée est petite et que la surface de l'antenne émettrice est grande. Le faisceau est un support de type pseudo-4 fils. Les deux sens de transmission sont portés par des fréquences différentes.

I.3.2. La transmission par satellite :

Un réseau de télécommunication par satellite s'articule autour d'un secteur terrien (les stations terriennes), assurant la connexion aux réseaux terrestres, et d'un secteur spatial (le satellite), réalisant la jonction entre les stations.

Un satellite de télécommunication comporte deux parties :

- La charge utile qui sert de relais de communication entre stations terriennes. Elle comprend deux sous-systèmes : le sous-système antenne et le sous-système répéteur. Un répéteur est constitué d'équipements de télécommunication situés entre l'antenne d'émission et celle de réception.
- La plate-forme qui intègre les moyens logistiques indispensables à la mise en œuvre correcte de la charge utile. Il s'agit des sous-systèmes de propulsion, de contrôle d'altitude et d'orbite, d'alimentation électrique, de contrôle thermique, de télécommande et de télémétrie.

Le temps que met une onde pour atteindre le satellite est de 270 ms ; durée qui n'est pas négligeable et qui peut perturber une communication téléphonique.

Suivant l'orbite dans laquelle se situe le satellite, il est possible de définir trois grandes catégories de satellite :

- ✓ **Les satellites LEO (Low Earth Orbit) :** Ils appartiennent à une orbite située entre 500 et 2000 Km.
- ✓ **Les satellites MEO (Medium Earth Orbit) :** Ils appartiennent à une orbite située entre 5000 et 20000 Km.
- ✓ **Les satellites GEO (Geosynchronous Earth Orbit) :** Ils appartiennent à une orbite située à 36000 Km.

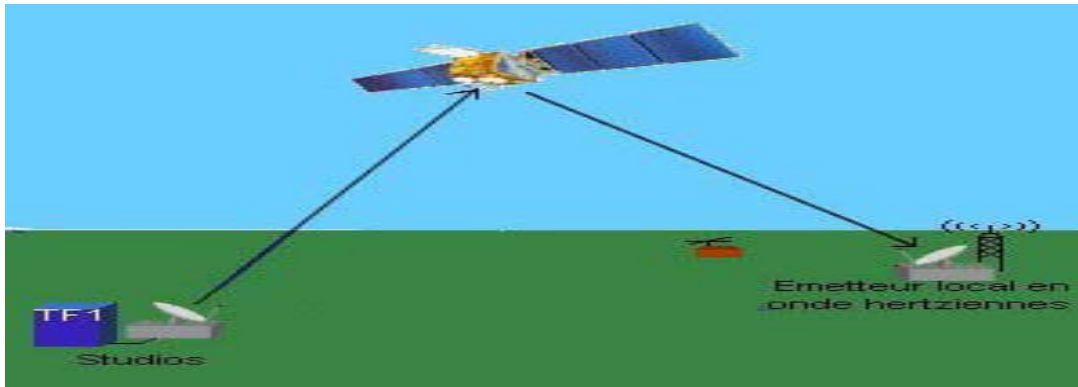


Figure. I.6. Liaison satellitaire.

I.4. Les supports optiques :

I.4.1. La liaison optique à l'air libre :

Une liaison optique à l'air libre se compose d'un émetteur qui émet un faisceau lumineux, en général un laser qui se propage jusqu'au récepteur qui est un photo détecteur.

Ce genre de liaison est utilisé le plus souvent pour des courtes distances, par exemple, une liaison entre deux ordinateurs.

Il existe aussi une autre technologie qui consiste à transmettre le signal dans l'air à grande distance. Cette technologie est appelée Wi-Op (Wireless Optical Broadband). Les signaux sont émis par un laser et reçus par un photorécepteur pouvant être à une distance d'un kilomètre. Chaque antenne étant constituée d'un couple émetteurs /récepteur, les communications sont bidirectionnelles (full duplex).

I.4.2. La fibre optique :

La fibre optique est un guide d'onde cylindrique diélectrique transparent, une fibre est composée de deux couches :

- ✓ Le cœur d'indice de réfraction n_1 .
- ✓ La gaine d'indice de réfraction n_2 inférieur à n_1 pour permettre la réflexion totale de rayon lumineux à ses extrémités.

Les deux couches sont protégées par un revêtement appliqué sur la gaine qui doit être détachable afin de permettre d'effectuer des injections ou des découpages de la lumière.

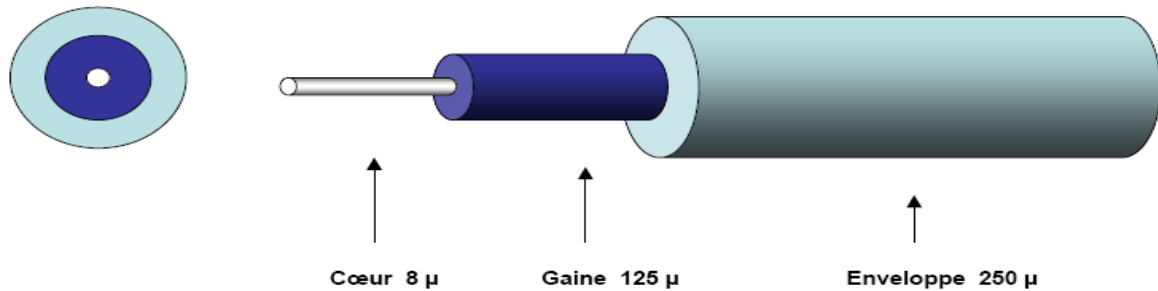


Figure. I.7 .constitution générale d'une fibre optique.

I.4.3. Principe de la fibre optique :

Lorsqu'un faisceau lumineux heurte obliquement la surface qui sépare deux milieux plus ou moins transparents, il se divise en deux : une partie est réfléchi tandis que l'autre est réfractée.

La propagation des ondes dans les fibres optiques peut s'étudier à l'aide de deux théories différentes :

- ✓ La théorie de Maxwell.
- ✓ La théorie de l'optique géométrique.

I.4.3.1. Réfraction :

On définit les milieux constituant la fibre optique (cœur, gaine) par l'indice de réfraction n .

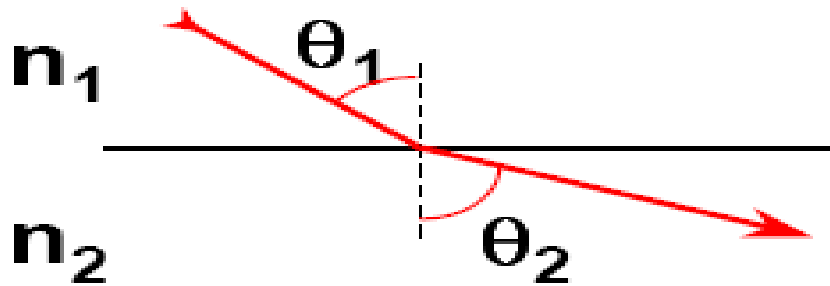
$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

- ϵ_r : La permittivité
- μ_r : La perméabilité

Un rayon lumineux qui passe obliquement avec un angle d'incidence θ_1 , d'un milieu d'indice n_1 à un milieu d'indice n_2 subit une réfraction vers l'axe d'incidence et forme un angle θ_2 .

Dans la loi des angles (Loi de Snell-Descartes), les angles d'incidences et de réfractons sont inversement proportionnels à leurs indices.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$



- Si $n_1 > n_2$ le rayon s'écarte de la normale.
- Si $\theta_1 > \arcsin(n_2/n_1)$, il y a réflexion totale.

I.4.3.2. L'ouverture numérique :

Pour réaliser une propagation par réflexions totales sur l'interface cœur – gaine de la fibre, il faut envoyer le signal lumineux avec un angle, par rapport à l'axe de la fibre, inférieur à l'ouverture numérique.

L'ouverture numérique (O.N) représente l'ouverture angulaire maximale α (angle d'acceptance) d'une source de lumière que l'on couple à la fibre.

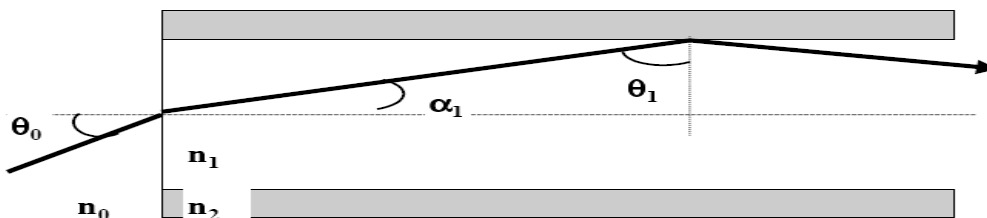


Figure. I.8. Ouverture numérique d'une fibre optique.

- On montre que :

$$\text{O.N} = \sin \theta_0 = \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0}$$

- Dans le cas où le milieu extérieur est constitué d'air ($n_0=1$) on aura :

$$\text{O.N} = \sin \theta_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

I.4.4. Les profils de la fibre optique :

I.4.4.1. Equation de propagation :

L'onde optique est une onde électromagnétique caractérisée par les deux champs électrique et magnétique et une direction de propagation. Une fonction sinusoïdale décrit la forme la plus simple de l'équation de propagation dans le temps et dans l'espace. Pour une onde plane qui se propage dans la direction des(z), la déviation(a) vaut :

$$a = A \sin(\omega t - kz) = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{z}{\lambda} \right)$$

Le milieu constituant la fibre (silice) est un milieu linéaire, isotrope dans lequel aucune densité de courant ou de charge n'existe. La solution générale des équations de Maxwell pour une onde électrique E (même solution pour le champ magnétique H) qui se propage dans un tel milieu est donnée par :

$$\nabla^2 E = \mu \epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

La solution exacte des équations de Maxwell pour une fibre à saut d'indice permet la détermination d'une fréquence normalisée :

$$f = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

I.4.4.2. Type de fibre optique :

Suivant les dimensions du cœur et les valeurs des indices n_1 et n_2 , on peut classer les fibres en deux catégories.

Soit la fréquence normalisée

$$f = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

- Pour $f \gg 2.405$, la fibre est appelée multimode et se divise en deux sous catégories :
 - Fibre multimode à saut d'indice.
 - Fibre multimode à gradient d'indice.
- Pour $f < 2.405$, la fibre ne comporte qu'un mode de propagation, elle est appelée fibre monomode.

I.4.4.2.1. Fibre Optique Multimode à Saut d'Indice :

Dans ce type de fibres, le cœur est homogène, son diamètre est grand devant la longueur d'onde, et son indice de réfraction est donné par :

$$n(r) = \begin{cases} n_1 & \text{Si } r < a \text{ (cœur)} \\ n_2 & \text{Si } r \geq a \text{ (gaine)} \end{cases}$$

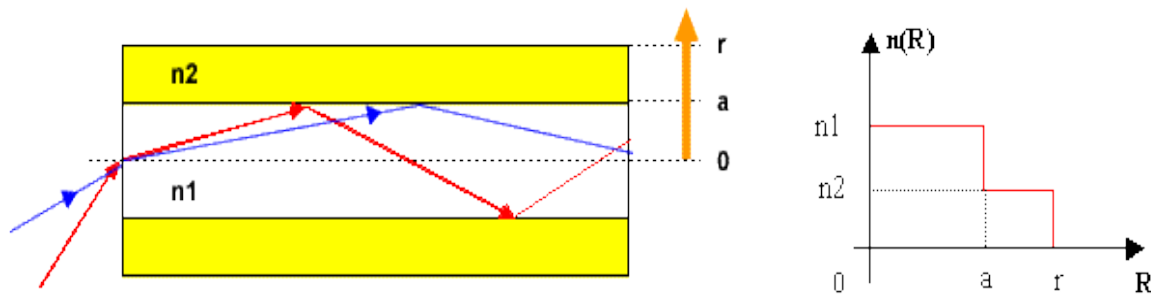


Figure. I.9. Propagation des ondes dans une fibre optique multimode à saut d'indice.

Le guidage de la lumière se fait suivant des lignes brisées. Cette fibre génère une grande dispersion des signaux et donc une déformation du signal reçu.

I.4.4.2.2. Fibre Optique Multimode à Gradient d'Indice :

La fibre possède un indice de réfraction progressif, celui de l'âme est plus grand que celui de la périphérie, le faisceau lumineux suit une trajectoire d'allure curviligne.

Le faisceau lumineux change de direction moins brusquement lors du rebond ce qui diminue les pertes.

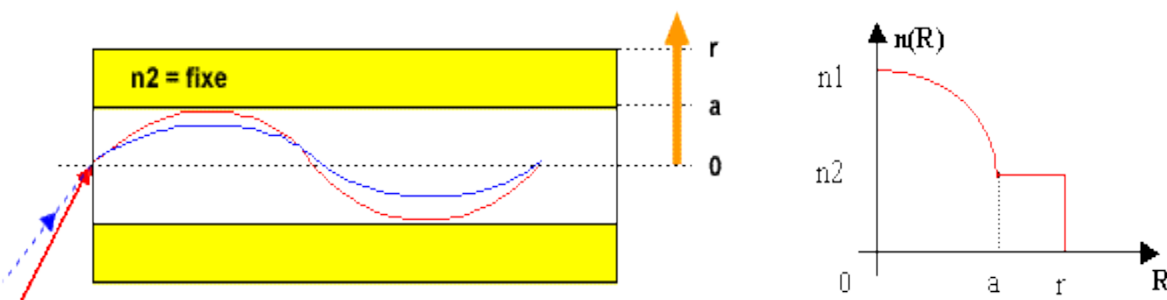


Figure. I.10. Propagation des ondes dans une fibre optique multimode à gradient d'indice.

$$n(r) = \begin{cases} n_1 \sqrt{1 - 2\Delta (r/a)^\alpha} & \text{Si } r < a \text{ (cœur)} \\ n_1 \sqrt{1 - 2\Delta} = n_2 & \text{Si } r \geq a \text{ (gaine)} \end{cases}$$

- a = rayon du cœur de la fibre optique.
- α = paramètre de profil d'indice

I.4.4.2.1. Fibre Optique Monomode :

Le diamètre du cœur est inférieur à $10\mu\text{m}$ de telle sorte que le parcours de la lumière devient presque longitudinal. Le diamètre de la gaine est compris entre $50\mu\text{m}$ et $125\mu\text{m}$. Ce type de fibre nécessite une source de lumière quasiment monochromatique (Diode Laser).

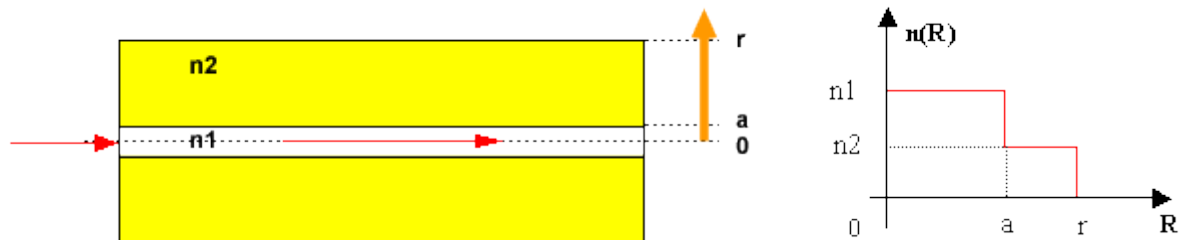


Figure .I.11.Propagation de mode fondamentale dans une fibre monomode à saut d'indice.

I.4.4.3. Limitations des transmissions par fibre optique :

I.4.4.3.1. L'atténuation :

L'atténuation dans les fibres optiques résulte de plusieurs mécanismes :

- **Pertes intrinsèques** : dépendent de la nature physicochimique de la fibre optique.
- ✓ Pertes par absorption moléculaire : elles sont causées par l'absorption des rayons optiques par la silice et les impuretés contenues dans celle-ci.
- ✓ La disposition inhomogène des molécules de SiO_2 résulte dans une fluctuation de l'indice de réfraction. L'atténuation produite par ce phénomène (diffusion Rayleigh) est donnée par :

$$\alpha_{\text{Ray}}(\text{dB})=10 \log [e^{\gamma_R}]$$

Avec : γ_R : coefficient de diffusion de Rayleigh, dépend des matériaux (m^{-1}). Dans le cas de la silice SiO_2 : $\gamma_R(\text{m}^{-1})=1.895 \cdot 10^{-28}/\lambda^4$.

- **Pertes extrinsèques** : dépendent du couplage fibre-fibre ou fibre-composants.

- ✓ Les pertes dues aux conditions d'utilisation des fibres .Toutes courbure trop serrée crée des pertes par rayonnement.
- ✓ Les micros courbures sont des courbures très faibles, mais répétées et pratiquement incontrôlables, dues au conditionnement des fibres dans les câbles.
- ✓ Les fibres sont toujours utilisées par tronçons de longueur finis, raccordés entre eux. Chaque jonction peut provoquer une perte de raccordement.

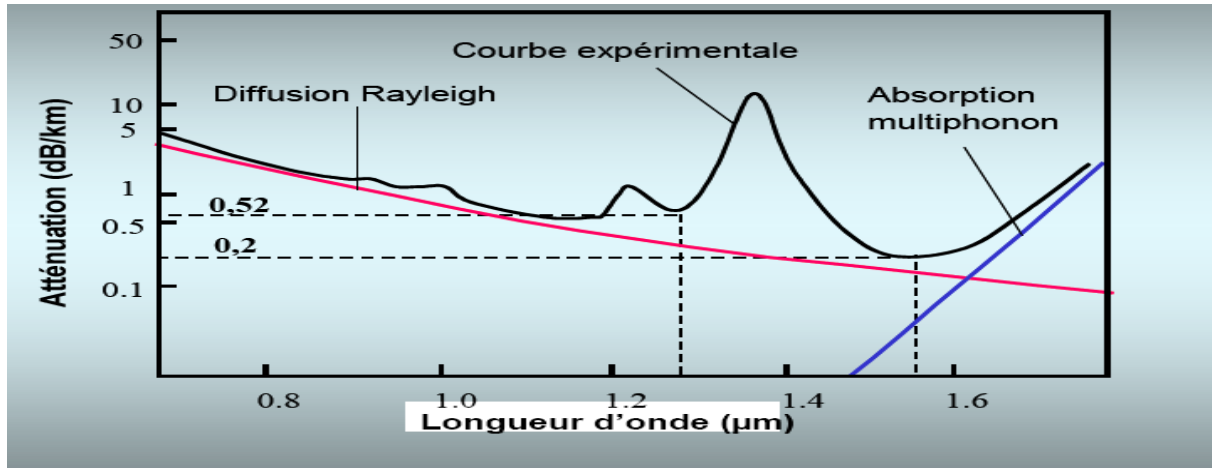


Figure .I.12. Atténuation des fibres optiques.

I.4.4.3.2. La dispersion :

La dispersion d'un signal optique se manifeste par une distorsion du signal et cause un élargissement des impulsions au cours de leur propagation dans la fibre optique. Il existe trois types de dispersion :

I.4.4.3.2.1. La dispersion chromatique :

La vitesse de propagation moyenne d'une impulsion est égale à la vitesse de groupe du mode fondamental. Le problème vient de ce que le temps de propagation de groupe varie avec la longueur d'onde. Or les sources de rayonnement lumineux ne sont pas rigoureusement monochromatiques. Il y a deux causes à prendre en compte :

- L'indice qui varie en fonction de la longueur d'onde (dispersion matériau).
- La vitesse de groupe qui varie avec la longueur d'onde (dispersion guide d'onde).

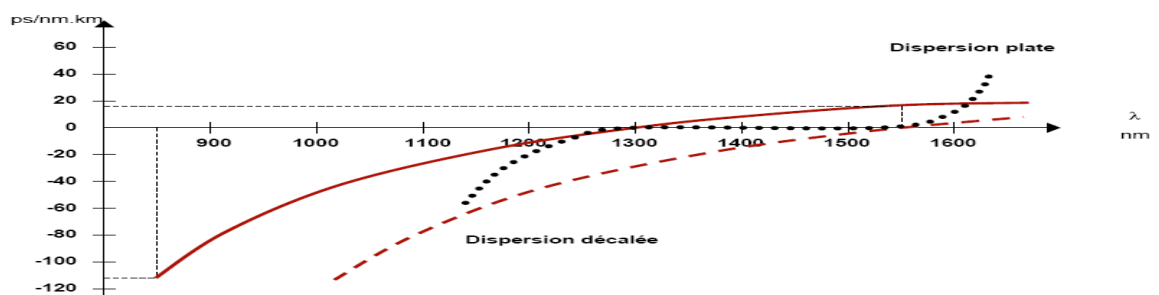


Figure. I.13. Dispersion chromatique

I.4.4.3.2.2. La dispersion modale :

Dans une fibre, un rayon à la limite de réflexion va parcourir une distance plus grande qu'un signal dans l'axe. Une impulsion à l'entrée de la fibre génère une multitude de rayons (modes, trajectoire différentes) qui partent ensemble mais n'arrivent pas tous en même temps.

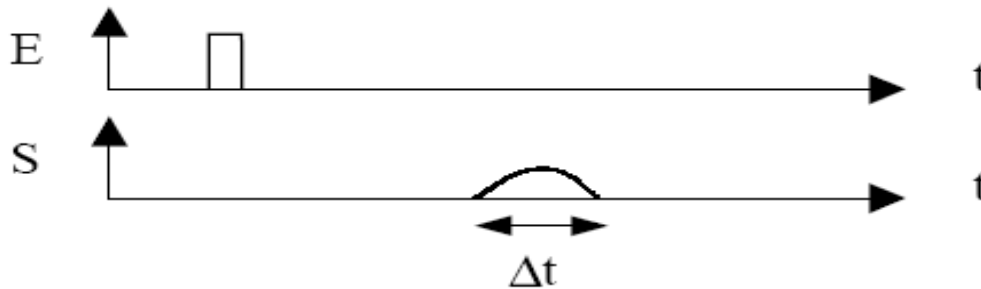


Figure. I.14 .Dispersion modale.

I.4.4.3.2.3. La dispersion de polarisation :

La fibre monomode véhicule en fait deux sous-modes propres orthogonaux, c'est-à-dire que le mode principale c'est dégénéré. Alors :

- Si la fibre n'est pas parfaitement circulaire, les deux modes peuvent se propager à des vitesses différentes.
- La dispersion qui en résulte est un phénomène aléatoire décrit statistiquement dans le temps et dans l'espace.

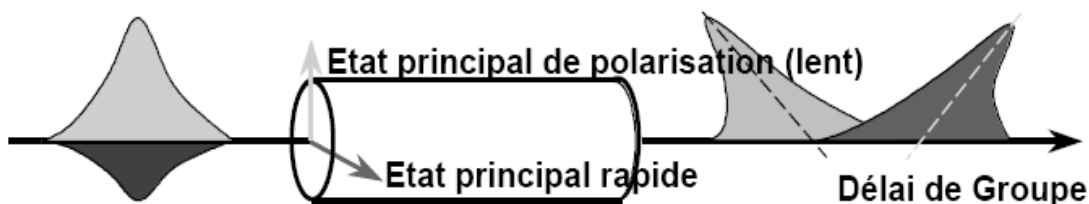


Figure. I.15. Dispersion de polarisation.

I.4.4.3.3. La bande passante :

La bande passante est un des paramètres les plus importants pour définir les propriétés de transmission d'une fibre optique. La définition de la bande passante totale (B_T) qui dépend de l'effet conjonctif des deux phénomènes de dispersion modale et chromatique, permettra de stabiliser la fréquence maximale transmissible en ligne. La bande totale est définie par l'expression :

$$B_T = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{B_m^2} + \frac{1}{B_c^2}}}$$

- B_m : bande résultante de la dispersion modale.
 - B_c : bande dérivante de la dispersion chromatique.
- ✓ Dans la fibre multimode, la bande passante totale dépend uniquement de la bande modale.

$$B_T = B_m$$

- ✓ La valeur de la bande modale normalement référencée à 100 m de longueur notée B_{m0} est donnée par le constructeur mais on peut la calculer avec la relation suivante :

$$B_m = \frac{B_{m0}}{L\gamma}$$

- B_{m0} : bande modale par unité de longueur.
- L : longueur de la liaison par fibre optique.
- γ : facteur caractéristique des modes renseigne sur le degré de couplage.

-Dans la fibre monomode, la bande totale est déterminée uniquement par la bande chromatique :

$$B_T = B_c$$

- ✓ La dispersion chromatique est d'autant plus importante que la largeur du spectre lumineux de la source est plus large.

$$B_c = \frac{1}{2ML\Delta\lambda}$$

- $\Delta\lambda$: largeur spectrale de la source à -3dB.
- L : longueur de la liaison fibre optique.
- M : coefficient de dispersion chromatique.

I.4.4.3.4. Les effets non-linéaires dans la fibre optique :

Les interactions non linéaires entre le signal et le support de transmission de la fibre de silice commencent à apparaître à mesure que les puissances du signal optique sont augmentées pour atteindre des distances élevées entre les amplificateurs à des débits élevés.

Ces non linéarités peuvent être classifiés en :

- ✓ **Effets de diffusion** : effet de diffusion Brillouin et de diffusion Raman stimulés.
- ✓ **Effet lié à la variation de l'indice de réfraction en fonction de l'intensité optique du signal** : modulation autophase, modulation transphase, instabilité de modulation, formation des solutions et mélange de quatre ondes.

I.4.4.3.4.1. Modulation autophase :

Etant donné que l'indice de réfraction d'une fibre dépend de l'intensité optique du signal, la variation temporelle de l'intensité optique du signal induit une modulation de sa propre phase. Cet effet est appelé modulation autophase (SPM). On peut exprimer l'indice de réfraction de la fibre comme suit :

$$n = n_0 + \frac{n_2}{A_{\text{eff}}} P$$

Où n_2 est l'indice de réfraction non linéaire de la fibre en m^2/W , A_{eff} est la surface effective de la fibre et P est la puissance injectée.

I.4.4.3.4.2. Modulation transphase :

Il s'agit de l'effet qu'un signal dans un canal est sur la phase d'un autre signal. La XPM se produit également comme un résultat de l'effet Kerr (comme la SPM) mais ne survient que lors de la transmission de canaux multiples sur la même fibre. Une fois que l'élargissement spectral est produit par la modulation transphase, le signal subit un élargissement temporel plus grand à mesure qu'il se propage le long de la fibre en raison des effets de la dispersion chromatique.

I.4.4.3.4.3. Mélange à quatre ondes :

Il s'agit d'un phénomène d'interférence produisant des signaux non désirés à partir de trois fréquences ($f_{xyz} = f_x + f_y - f_z$) de signal connus comme des canaux fantômes. Il y a un nombre de voies dans lesquelles les canaux peuvent se combiner pour former un nouveau canal. Avec des niveaux de puissance élevés, l'effet FWM produit un nombre de canaux fantômes dépendant du nombre de signaux réels. Par exemple, un système à quatre canaux produira 24 canaux fantômes et un système à 16 canaux produira 1920 canaux fantômes. Le FWM est un des effets non linéaires les plus défavorables dans les systèmes optiques.

II. Le multiplexage :

II.1. Définition de multiplexage :

Pour mieux assurer le transport des communications entre commutateurs on multiplexe les canaux que l'on transporte ensuite sur des supports à bande passante élevée (faisceaux hertziens, câbles coaxiaux, fibres optiques). Ce multiplexage consiste donc à faire passer plusieurs communications simultanées provenant des équipements (voies basse vitesse) sur un même canal de transmission ou support physique (voie haute vitesse). Pour conserver l'intégralité de chaque signal sur le canal, le multiplexage introduit, entre les signaux, une séparation temporelle, spatiale ou fréquentielle.

• Le partage de la ligne peut être un partage :

- ✓ De la bande disponible => Multiplexage fréquentiel.

- ✓ Du temps d'utilisation => Multiplexage temporel.

La voie haute vitesse : c'est la voie de communication entre le multiplexeur et le démultiplexeur, elle prend en charge l'ensemble du trafic des clients

La voie basse vitesse : c'est la voie de communication reliant le terminal de l'utilisateur au multiplexeur, elle prend en charge le trafic de l'utilisateur (c.à.d. données provenant des clients).

- ✓ **Multiplexeur** : Équipement permettant de combiner les signaux provenant des émetteurs pour les transmettre sur la voie haute vitesse. Le démultiplexage est l'opération inverse.
- ✓ **Démultiplexeur** : est l'équipement sur lequel les récepteurs sont raccordés à la voie haute vitesse.

II.2. Multiplexage fréquentiel FDM :

FDM (Frequency Division Multiplexing) ou FDMA ("Frequency Division Multiple Access") en français : MRF : (Multiplexage par Répartition de Fréquence).

- ✓ répartition en fréquence.
- ✓ adapté aux transmissions analogiques.
- Utilisation : ligne téléphonique et paires torsadées;
- Une fréquence porteuse est attribuée à chaque liaison;
- La voie haute vitesse est divisée en bandes de fréquences (plage de modulation) correspondant à chaque client voies basse vitesse;
- La voie haute vitesse doit assurer une capacité suffisante pour absorber le trafic;
- La bande passante de la ligne est divisée en sous-bandes ou canaux de fréquence : chaque canal utilise une bande de fréquence spécifique ;
- Une bande de garde est nécessaire entre chaque canal afin de limiter les interférences ;
- Les signaux sont superposés dans le temps ;
- Des filtres restituent les signaux de chaque voie en sortie ;
- Généralement utilisé pour la transmission des signaux analogiques par câble, voie hertzienne ou satellite (téléphonie, radiodiffusion et télévision).

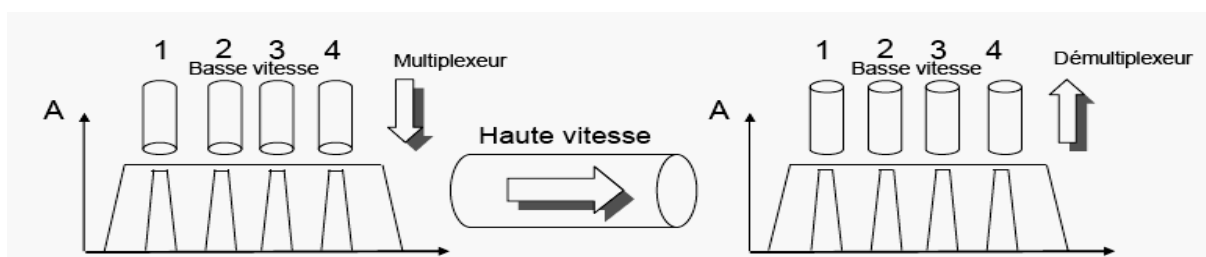


Figure. I.16. Multiplexage fréquentiel FDM.

II.3. Multiplexage temporel TDM :

Le multiplexage temporel, aussi appelé MRT (Multiplexage par répartition dans le temps ou TDM, Time Division Multiplexing) permet d'échantillonner les signaux des voies basse vitesse pour les transmettre successivement sur la voie haute vitesse en leur allouant la totalité de la bande passante, même si celles-ci ne possèdent pas de données à émettre.

- ✓ Partage du temps d'utilisation du support : les sources y ont accès à tour de rôle.
- ✓ Chaque tranche de temps est allouée cycliquement à la liaison;
- ✓ Meilleure utilisation de la bande passante que le multiplexage fréquentiel;
- ✓ Car allocation de la totalité de la bande passante à chaque tranche;
- ✓ Nécessité d'une mémoire tampon :
 - Si une trame du client se présente et que l'allocation de la tranche de temps n'a pas commencée, il faut stocker ces données;
 - Sa taille : nombre maximal de bits potentiellement en attente de deux tranches de temps du même client.
- ✓ On découpe par intervalle de temps (IT) réguliers les signaux à transmettre. Le signal transmis est composé en assemblant équitablement les fractions pour former des trames ;
- ✓ Multiplexage réservé aux signaux numériques.

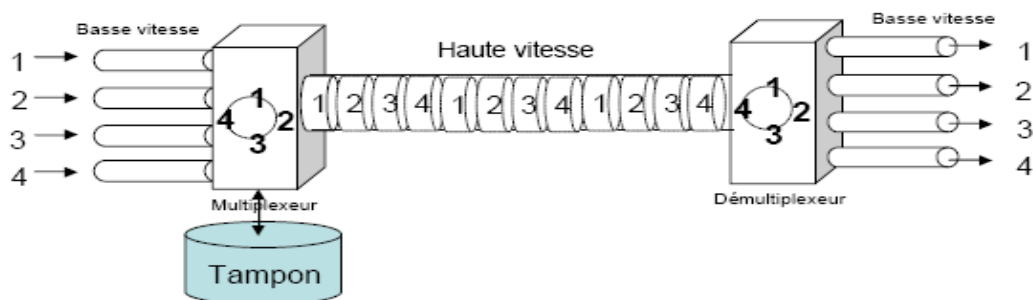


Figure. I.17. Multiplexage temporel TDM

II.4. La technique MIC :

La modulation par impulsion et codage MIC, PCM (pulse code modulation en anglais) est une modulation numérique pour la commutation temporelle de voies téléphoniques numérisées. Cette opération consiste à faire une correspondance entre une grandeur physique (signal à transmettre) et une série de nombres entiers sans réalité physique. La trame MIC permet la transmission de 30 voies numériques, la signalisation pour les 30 voies et la synchronisation de l'ensemble des informations.

II.4.1. Les étapes de la numérisation :

Le signal de la parole (que nous appellerons signal téléphonique) fut le premier à être numérisé pour être transmis sur le réseau. La bande passante nécessaire pour transmettre la voix humaine pour qu'elle puisse être correctement comprise est : 300 - 3400 Hz.

Avant l'échantillonnage et la numérisation, le signal BF traverse un filtre qui limite la fréquence du signal à 4000 Hz.

II.4.1.1. L'échantillonnage :

L'échantillonnage est une opération effectuée sur le signal à transmettre en vue de réaliser la conversion "analogique / numérique". A des instants précis, régulièrement espacés, on prélève un échantillon du signal, qui sera représentatif de l'amplitude de celui-ci. Le théorème de Shannon montre qu'on ne peut pas reconstituer correctement le signal origine si la fréquence d'échantillonnage n'est pas supérieure à 2 fois la fréquence supérieure du signal à transmettre.

Pour la trame MIC la fréquence d'échantillonnage F_e est de 8000 Hz.

II.4.1.2. La quantification :

Après échantillonnage, nous pouvant transmettre les impulsions modulées mais elles seraient très sensibles au bruit et distorsion alors qu'il n'est pas indispensable de transmettre directement ces impulsions. Pour cette raison, nous quantifions le signal en faisant correspondre à chaque amplitude d'échantillon, l'amplitude la plus voisine d'une suite discrète et finie d'amplitudes "étalons" appelées "niveaux". C'est la valeur de ces niveaux qui, à l'émission, après codage, sera transmise en ligne. Pour le MIC, les échantillons sont codés par des mots de 8 bits. On dispose donc de 128 échantillons = 256 plages, soit 256 mots de 8 bits. Il y a 128 plages de niveaux positifs et 128 plages de niveaux négatifs.

II.4.1.3. Le codage :

A chaque échantillon étalon est affecté un numéro binaire. Le codage d'un échantillon se fait sur un octet (8 bits) dont le premier est affecté au signe de l'échantillon et les sept bits suivants servent à coder son amplitude. Pour une fréquence d'échantillonnage de 8KHz, on obtient 8000 échantillons par seconde. Sachant que chaque échantillon est codé sur 8 bits, le signal numérique résultant est transmis à un débit : $D = 8000 \text{ (Hz)} * 8 \text{ (bits)} = 64 \text{ Kbit /s}$.

II.4.2. Le multiplexage à 2048 et 1544 Kbits/s :

Le débit de transmission à 2048 Kbits/s résulte du multiplexage de 30 canaux à 64 Kbits, en plus des informations de signalisation et de verrouillage nécessaire pour la gestion.

Ce débit primaire est employé dans le monde entier, seuls les Etats-Unis, le Canada et le Japon, emploient un débit primaire de 1544 Kbits/s constitué en multiplexant 24 canaux au lieu de 30 canaux.

Le traitement du signal produit une suite d'échantillons codés sur 8 bits toutes les 125 μ s. Le multiplexage de plusieurs voies sur un même support consiste à entrelacer les échantillons de diverses voies en respectant toujours le même ordre d'émission. Il en résulte un motif répétitif sur la période de 125 μ s appelé trame.

➤ **Le multiplexage à 2048 Kbits/s (2.048Mbits/s) (Norme Européenne) :**

La trame de période $125\mu s$ est constituée de canaux de 8 bits chacun, soit 32 intervalles de temps, ($IT_0, IT_1, \dots, IT_{31}$), IT_0 transporte le mot de verrouillage de trame (MVT), l'intervalle de temps IT_{16} est généralement réservé au transport de la signalisation des diverses voies multiplexées.

Sachant que chaque intervalle de temps (IT) représente un échantillon d'une voie de communication codé sur 8 bits, en plus des deux intervalles de temps réservés pour la signalisation et le verrouillage, alors on aboutit à l'émission de 256 bits durant $125\mu s$.

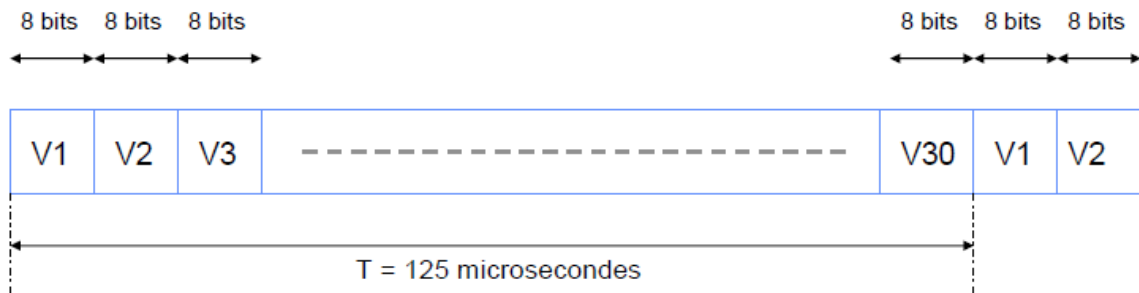


Figure. I.18. Structure de la trame de débit 2048Kbits /s.

➤ **Le multiplexage à 1544 Kbits/s (1.544Mbits/s) (Norme Américaine) :**

La trame de période de $125\mu s$ est constituée de 193bits. Le premier bit de la trame sert au verrouillage de la trame et aux données d'exploitation. Les 192bits suivants portent 24 intervalles de temps affectés à la transmission de 24 canaux à 64 Kbits.

Sachant que chaque intervalle de temps (IT) représente un échantillon d'une voie de communication codé sur 8 bits, en plus de premier bit de verrouillage, alors on aboutit à l'émission de 193 bits durant $125\mu s$.

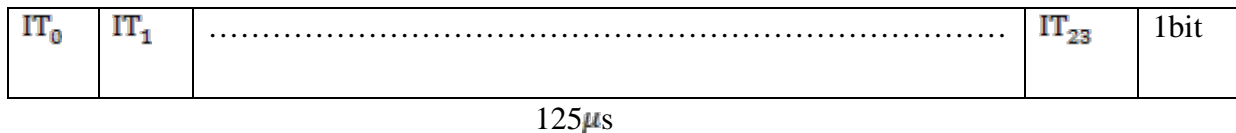


Figure .I.19.structure de la trame de débit de 1544Kbit/s

II.4.2.1. Comparaison entre la norme Américaine et Européenne :

	Système Européen	Système Américain
Fréquence d'échantillonnage	$F_e=8$ KHz	$F_e=8$ KHz
Nbre de niveau de quantification	$q=256$	$q=256$
Nbre de bits par échantillon	8 bits	8 bits
Débit binaire par voie	64 Kbit/s	64 Kbit/s
Nbre d'intervalle de temps	32	24
Nombre de voies	30	24
Nombre de bits/trame	$32 \times 8 = 256$	$24 \times 8 + 1 = 193$
Durée de l'intervalle du temps	$3,9 \mu s$	$5,2 \mu s$
Débit binaire totale	$256 \times 8 \text{ KHz} = 2,048 \text{ Mbits/s}$	$193 \times 8 \text{ KHz} = 1,544 \text{ Mbits/s}$

Tableau .I.1. Comparaison des deux normes Américaines et Européenne.

II.5. Hiérarchie digital plésiochrone :

La hiérarchie PDH (plésiochrone digital hierarchy en anglais) a évolué principalement pour répondre à la demande de la téléphonie (voix). Le principe de PDH consiste à multiplexer et à transporter des éléments binaires de débit inférieur en les transmettant à des débits supérieurs. Les débits inférieurs sont donc élevés à une valeur supérieure par injonction d'éléments binaires de justification, avec une indication de leur présence dans la trame résultante. Le débit n'est donc pas exactement le multiple de ce qui rentre mais légèrement plus.

Le principal défaut de cette technique de multiplexage est qu'elle ne permet pas d'avoir accès aux informations d'une voie directement sans démultiplexer l'ensemble des voies. Ainsi pour fournir une ligne à 2Mbit/s plusieurs démultiplexages doivent être faits pour l'extraire d'un canal rapide à 140Mbit/s.

Les différents débits de la hiérarchie PDH :

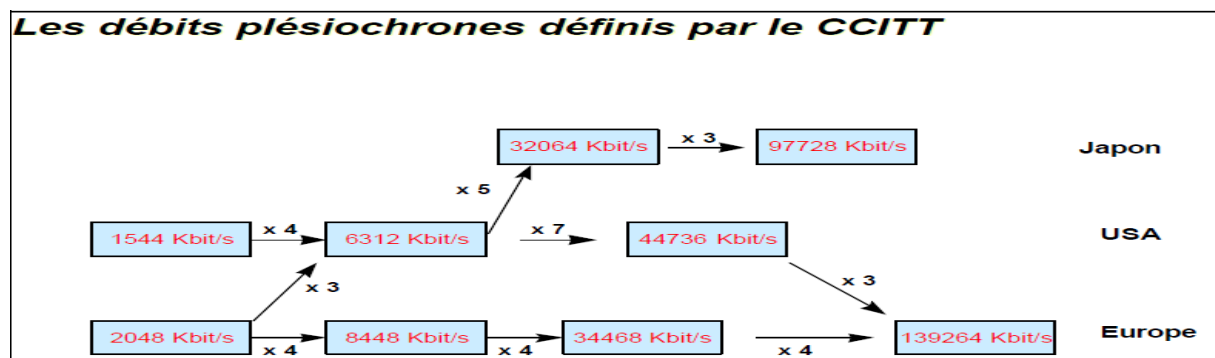


Figure .I.20. Les différents débits de la hiérarchie PDH.

II.6. Multiplexage synchrone SONET et SDH :

II.6.1. La hiérarchie SONET :

La hiérarchie SONET (Synchronous Optical NETWORK) a été conçue en 1986 par BELL Lab, elle est utilisée en Amérique du nord. La trame de base définie par cette hiérarchie est le OC-1 (Optical Container) au débit de 51.84 Mbits/s. Un réseau SONET supporte les débits plesiochrones américains.

TRAME	DEBIT EN Mbit/s
OC-I (STS-1)	51.84
OC-3(STS-3)	155.52
OC-9(STS-9)	466.56
OC-12(STS-12)	622.02
OC-18(STS-18)	931.12
OC-36(STS-36)	1244.16
OC- 48(STS-48)	2488.32
OC-192(STS-192)	9953.28

Tableau .I.2.Les différents débits de la SONET.

II.6.2. La hiérarchie SDH :

La hiérarchie numérique synchrone (SDH : Synchronous Digital Hiérarchy) a été développé dans le but essentiel de construire un réseau unique afin de faciliter l'interconnexion des différents réseaux de transmission à travers le monde entier, et pour répondre aux besoins croissants des applications en terme de bande passante. Cette hiérarchie est basée sur des principes comparables aux principes de SONET.

Il y existe différentes trames en SDH. La trame de base est appelée le STM-1 (Synchronous Transport Module, niveau 1). STM-1 à une longueur de 2430 octets. Sa fréquence de transmission est de 125ns ; ce qui nous donne un débit de : $2430 \times 8 / 125 = 155,52$ Mbit/s. Cette trame peut être considérée comme l'entrelacement de trois STS-1.

Le tableau suivant présente les différents débits définis par la hiérarchie SDH.

TRAME	DEBIT EN Mbit/s	SUPPORT
STM-1	155.52	FO, RADIO, COAX
STM-4	622.08	FO
STM-16	2 488.32 (~2.5Gbit/s)	FO
STM-64	9 953.28 (~10Gbit/s)	FO
STM-256	40 000(~40Gbit/s)	FO

Tableau .I.3.Les différents débits de la hiérarchie SDH.

II.7. Technique de multiplexage WDM :

La fibre optique possède un avantage non exploité par les deux premiers multiplexages présentés. En effet, sur une fibre optique, il est possible d'utiliser plusieurs longueurs d'onde simultanément. C'est justement sur ce principe qu'une technique de modulation a été mise en place avec de nombreux avantages.

La technique de multiplexage en longueur d'onde : WDM (**W**avelength **D**ivision **M**ultiplexing) est l'extension de la technologie SDH sur plusieurs longueurs d'ondes.

Le principe du multiplexage en longueur d'onde est donc d'injecter simultanément dans une fibre optique plusieurs trains de signaux numériques sur des longueurs d'ondes distinctes. La fibre optique se prête d'autant plus à cela que sa bande passante est très élevée (de l'ordre de 25000GHz).

Le multiplexage de longueur d'onde se fait exclusivement sur une fibre monomode.

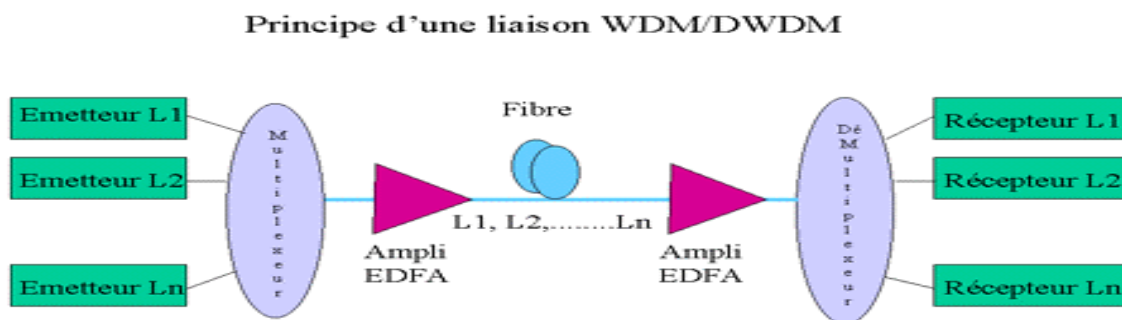


Figure. I.21. Principe d'une liaison WDM

Il existe d'autres déclinaisons du WDM comme le DWDM, le CWDM et encore le U-DWDM avec toujours le même principe de base.

L'introduction de la technologie WDM est la tendance vers le « réseau tout optique ». Les technologies les plus récentes combinent les taux de multiplexage SDH les plus élevés avec l'utilisation de WDM.

III. Les différents réseaux de télécommunication :

III.1. Le réseau local d'entreprise (LAN) : Désigne le réseau informatique de l'entreprise sur lequel sont raccordés les terminaux et les serveurs de système d'information de l'entreprise.

III.2. Le réseau d'accès : Moins de 10 Km, sert à la collecte des flux de trafic des abonnés. Il est encore désigné sous le nom de réseau de distribution.

III.3. Les réseaux MAN : Entre 10 et 50 Km, déployés entre le dernier autocommutateur à autonomie d'acheminement du réseau longue distance et une zone plus précise (campus, ville...).

III.4. Les réseaux WAN : Plus de 50 Km, il représente la couche supérieur de réseau de télécommunication. Il est compris entre deux autocommutateurs à autonomie d'acheminement.

Conclusion :

La Fibre optique a profondément modifié l'architecture des réseaux de transmission. De nouvelles architectures se mettent en place pour la transmission, le multiplexage et le brassage.

La Fibre optique associée au multiplexage et au brassage SDH a profondément modifié l'architecture des réseaux de transmission. Toutefois la SDH est limitée en débit, 10 Gbit/s au maximum. Pourtant des débits supérieurs à 10 Gbit/s sont nécessaires.

Ceci est désormais rendu possible par une nouvelle technologie de multiplexage, le multiplexage optique WDM, Wavelength Division Multiplexing.

INTRODUCTION :

Les télécommunications par fibre optique, dont le développement a sensiblement débuté il y a trente ans, connaissent un certain essor depuis l'introduction, il y a vingt ans environ, du multiplexage en longueur d'onde (en anglais Wavelength Division Multiplexing, ou WDM). Cette technologie a pour point fort d'exploiter avantageusement l'immense bande passante des fibres optiques. Elle permet actuellement de transmettre 160 canaux en longueurs d'onde, multiplexés chacun dans le temps à un débit binaire de 40 Gbits/s, soit un débit global de 6,4 TBits/s, ou encore 100 millions de communications téléphoniques à 64 kbits sur une unique fibre optique.

Les systèmes de télécommunication optiques mettent en jeu un ensemble d'éléments, à commencer par les composants d'émission/réception de la lumière, le support de propagation qui est la fibre optique, les amplificateurs optiques, ainsi que les composants spécifiques pour le WDM. À ces fonctions purement optiques et/ou optoélectroniques s'ajoutent des circuits électroniques rapides permettant de moduler et d'amplifier les signaux émis et recueillis, de récupérer les signaux de référence, ainsi que des organes de haut niveau de gestion du réseau.

I. Principe de WDM :

La technologie WDM repose sur le principe du multiplexage optique. Le principe consiste à transporter plusieurs signaux sur un brin de fibre optique. Ce n'est plus l'axe du temps qui est découpé en périodes pour chaque utilisateur mais la bande passante. Et chaque sous-bande est affectée à une voie. Ainsi plusieurs transmissions peuvent être faites simultanément, chacune sur une bande de fréquences particulières. Ce procédé est encore appelé multiplexage en fréquence (Frequency Division Multiplexing, FDM). Ces deux termes recouvrent la même notion, mais par habitude, on parle de multiplexage en longueur d'onde lorsque la séparation entre deux canaux est relativement grande (typiquement plus de 1 nm), tandis que l'on parle de multiplexage en fréquence lorsque cet écart est relativement petit.

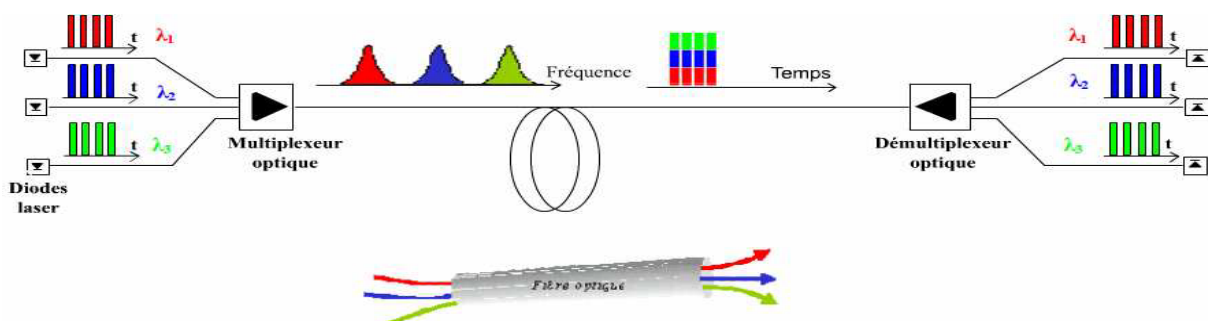


Figure .II.1. Principe de WDM

À l'émission, on multiplexe n canaux au débit nominal D , à la réception, on démultiplexe le signal global $n \times D$ en n canaux nominaux. La recommandation internationale ITU-T G.692 (Interfaces optiques pour systèmes multicanaux avec amplificateurs optiques) a défini un peigne de longueurs d'onde autorisées dans la fenêtre de transmission 1530-1565

nm. Elle normalise l'espacement en nanomètre (nm) ou en Gigahertz (GHz) entre deux longueurs d'onde permises de la fenêtre : 200 GHz ou 1,6 nm et 100 GHz ou 0,8 nm. La technologie WDM est dite dense (DWDM) lorsque l'espacement utilisé est égal ou inférieur à 100 GHz. Des systèmes à 50 GHz (0,4 nm) et à 25 GHz (0,2 nm) permettent d'obtenir respectivement 80 et 160 canaux optiques. Pour des espacements encore plus faibles, on parlera de U-DWDM : Ultra - Dense Wavelength Division Multiplexing. Ainsi, des systèmes à 10 GHz (0,08 nm) permettent d'obtenir 400 canaux optiques.

Il existe une autre forme de multiplexage WDM, moins performante, le C-WDM (Coarse WDM qui signifie WDM grossier). La norme ITU-T G.694.2 permet au CWDM d'utiliser des longueurs d'onde comprises entre 1270 et 1610 nanomètres, respectivement espacées de 20 nanomètres.

II. Structure du système WDM:

Une liaison WDM se compose d'un émetteur, d'un multiplexeur/démultiplexeur, d'une ligne de transmission, d'un récepteur et d'amplificateurs optiques qui se substituent aux régénérateurs électroniques. La ligne de transmission est composée de fibres optiques monomodes.

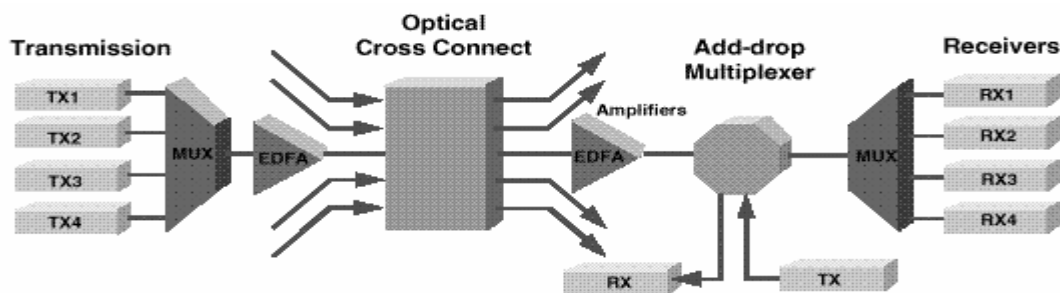


Figure. II .2. Composants d'un réseau optique WDM.

II.1. Composants d'émission/réception :

Le principe de fonctionnement des composants d'émission/réception repose sur l'interaction lumière/matière dans les semi-conducteurs (émission spontanée, émission stimulée, et absorption), ainsi que sur la physique des dispositifs électroniques, la jonction PN en particulier.

II.1.1. Composants d'émission :

II.1.1.1. Source optique :

On distingue classiquement les diodes électroluminescentes (DEL) et les diodes laser (DL) selon le type de mécanisme mis en jeu pour l'émission de lumière (émission spontanée pour les DEL et émission stimulée pour les DL). Dans le cas des liaisons haut débit, seules les diodes laser, nettement plus performantes, sont utilisées.

Les systèmes pratiques utilisent des sources à semi-conducteur émettant vers des longueurs d'ondes $\lambda=0,85\mu\text{m}$, $\lambda=1,3\mu\text{m}$, $\lambda=1,55$ (fenêtres de transmission optique).

On caractérise les sources par leurs spectres (répartition de la puissance émise en fonction de la longueur d'onde), et leurs diagrammes de rayonnement (répartition dans les différentes directions de la puissance émise).

Les matériaux semi-conducteurs utilisés dans les dispositifs optoélectronique peuvent être classés en :

- ✓ Composant primaires : Ge et Si.
- ✓ Composant binaires : GaAs et InAs.
- ✓ Composant ternaires : $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ et $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$.
- ✓ Composant quaternaires : $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}_{1-y}\text{As}_y$.

Tous ses composants se différencient par la largeur de la bande interdite qui fixe la longueur d'onde du signal crée. Cette longueur d'onde est donnée par la relation suivante :

$$\lambda(\mu\text{m}) = \frac{1,24}{\Delta E(\text{eV})}$$

En pratique, il est très rare de disposer d'un matériau correspondant à une utilisation souhaitée. Par contre, il est possible d'ajuster le GAP en agissant sur la concentration des dopants (x et y).

II.1.1.1.1. Les diodes électroluminescentes (LED, Light Emission Diode) :

Une LED est une jonction PN en direct. Une LED est une source incohérente spatialement et temporellement qui présente contrairement aux lasers un spectre d'émission assez large et un diagramme de rayonnement moins directif. Ces diodes sont généralement utilisées pour des applications bas débit.

II.1.1.1.2. Le LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation):

- ✓ **La diode laser:** Une diode laser est caractérisée par un spectre de raie très fine, répartie sur un intervalle spectral de quelques nanomètres. Il peut n'y avoir qu'une seule raie : on parle alors de laser monomode, la diode laser est une source cohérente dans le temps et dans l'espace, et monochromatique, elle est utilisée dans les transmissions à très grande distance.

II.1.1.1.3. La différence DEL / DL : Le rayonnement par émission stimulée d'une diode laser est spatialement cohérent, ce qui n'est pas le cas pour une DEL. Comparé à celui de la DEL, le lobe de rayonnement est beaucoup plus étroit et ceci facilite un couplage particulièrement efficace du rayonnement dans la fibre.

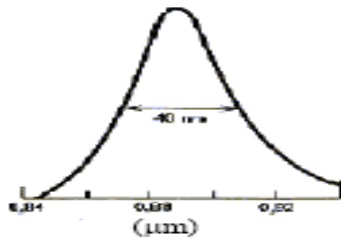


Figure II.3. Spectre d'émission d'une DEL

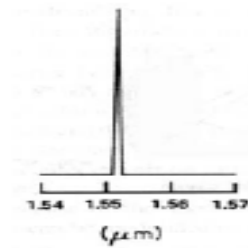


Figure II.4. Spectre d'émission d'une DL

II.1.1.1.4. Principe de fonctionnement d'un LASER :

Dans des conditions normales, les atomes ont une énergie minimale. Ils sont dans l'état d'énergie inférieur. Ils sont donc disposés à absorber de la lumière, mais pas à en émettre. C'est pourquoi l'absorption est généralement dominante par rapport à l'émission stimulée. Par contre, si on parvient à faire en sorte qu'un morceau de matière possède plus d'atome dans l'état d'énergie supérieur E_e que dans l'état d'énergie inférieur E_v , alors l'amplification de la lumière par l'émission stimulée (l'effet laser) devient possible. On nomme cette situation « inversion de population » car le nombre d'atomes excités (la population de l'état d'énergie supérieur) est plus grand que le nombre d'atomes non-excités (la population de l'état d'énergie inférieur), inversement à la situation normale.

En 1917, Einstein réalise qu'il existe trois types d'interaction entre la **lumière et la matière**. Les deux premiers types sont l'absorption de la lumière par la matière et l'émission spontanée de la lumière par la matière excitée. Einstein découvre que le processus d'absorption peut être inversé pour devenir un troisième type d'émission : l'émission stimulée. L'émission stimulée est le processus inverse de l'absorption, c'est-à-dire que la radiation reçue par un atome stimule ce dernier à émettre exactement la même sorte de radiation (même longueur d'onde, même phase, même polarisation ...). On remarque donc qu'il y a amplification, car il y a davantage de lumière après l'émission qu'avant.

Pour achever l'effet laser, il est nécessaire de concentrer les photons dans un milieu (la cavité) qui permet de maintenir cette cohérence. Le signal est amplifié à chaque fois qu'il traverse le milieu constituant la cavité.

La cavité permet de confiner l'énergie lumineuse pour avoir suffisamment de photons excitateurs, ce qui est indispensable au laser pour que ses rayons lumineux passe plusieurs fois dans le milieu amplificateur. La cavité résonante permet de sélectionner les modes d'oscillations données par l'équation :

$$F_p = \frac{c \times p}{2 \times d \times n}$$

- ✓ n : Indice de réfraction du milieu contenu dans la cavité.
- ✓ p : Nombre entier caractéristique du mode de résonance.
- ✓ d : Longueur de la cavité.

L'évolution de la puissance optique fournie par le laser en fonction de son courant de polarisation ne présente pas une bonne linéarité. Le courant de seuil, très sensible à la température, est donné par : $I_s = I_0 e^{T/T_0}$; ou T et T_0 sont la température de fonctionnement et la température absolue respectivement.

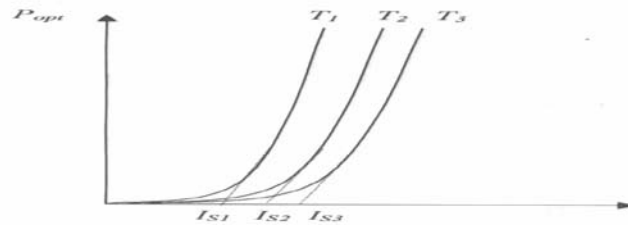


Figure II.5. Caractéristique de transfert pour différentes températures

Les diodes laser (DL) sont utilisées pour coder l'information sous forme optique que l'on injecte ensuite dans la fibre optique après avoir focaliser la lumière de laser dans une lentille. Afin de réduire les réflexions dans la cavité de laser, une photodiode est positionnée de l'autre coté de la fibre optique. Cette photodiode est aussi un moyen de contrôle de la sortie des Lasers et permet un feedback pour des éventuels ajustements. En fait, la tension de la photodiode impose une tension précise sur une résistance de charge, cette dernière est ensuite comparée à une tension de référence.

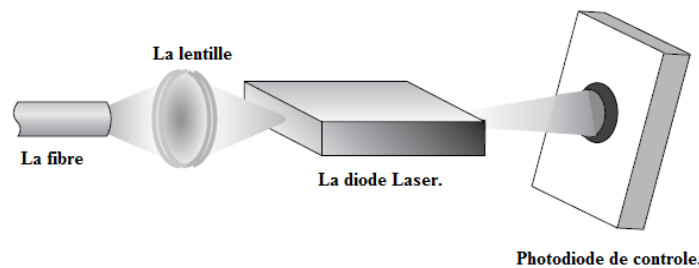


Figure II.6. L'injection du Laser dans la fibre optique.

II.1.1.1.5. Bruit d'intensité optique (Relative Intensity Noise ou RIN) :

Le bruit d'intensité optique est provoqué par l'émission spontanée de photons qui a lieu au sein de la cavité laser. Le spectre de ce bruit n'est pas « plat » et sa forme dépend du courant de polarisation. Des valeurs très basses de RIN sont nécessaires dans les liaisons optiques, typiquement < -100 dB/Hz.

II.1.1.1.6. L'exploitation du LASER dans les réseaux WDM :

Le laser « *Fabry-perot* » est la plus simple configuration des lasers à cavité, composé d'un guide d'ondes contenant le milieu amplificateur entouré de deux miroirs à Crystal. Il produit un spectre optique multimode déterminé par la cavité de Fabry-Perot et le GAP du semi-conducteur. La dispersion chromatique de différentes fréquences émises par ce LASER limite la distance de transmission à cause de la dépendance existante entre la vitesse de propagation et la longueur d'onde des ondes lumineuses.

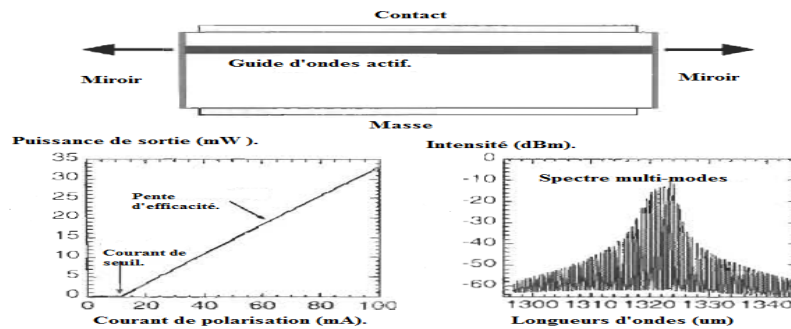


Figure. II.7. Le Laser Fabry-perot.

Les lasers monomodes longitudinaux, comme les lasers à cavités modifiées par rétroaction interne distribuée (laser DFB et DBR), utilise un mécanisme de sélection des fréquences, qui peut être accordé électriquement ou thermiquement. Ces derniers sont les plus utilisés dans les transmissions haut-débit à grandes distances comme c’est le cas de WDM.

Les lasers DFB utilise un réseau de diffraction à proximité de la région active pour favoriser un seul mode longitudinal. Un Laser DFB, incluant une couche à grande réflectivité (HR, Highly reflective) et une autre anti-réfléctive (AR, Antireflecting) est illustré dans la figure suivante. La longueur d’onde du laser DFB est accordée dans un petit intervalle en changeant sa température.

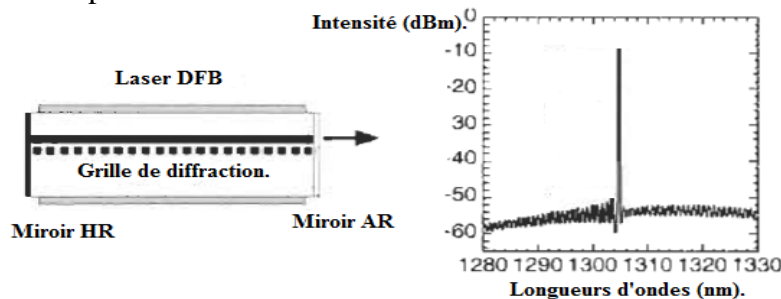


Figure. II.8. Le Laser DFB.

Un autre Laser monomode, dit Laser DBR, est désigné pour un meilleur contrôle de la longueur d’onde émise. Ce dernier utilise le mécanisme de diffraction par le réseau de Bragg. Le Laser DBR est le plus efficace dans la transmission WDM.

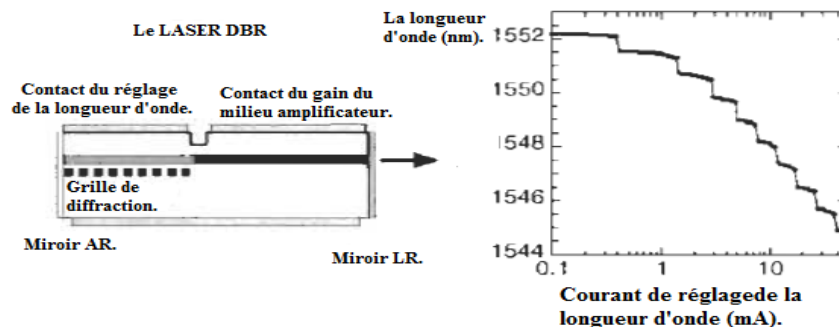


Figure. II.9. La Laser DBR

Enfin, les deux Laser DFB et DBR sont les plus utilisés dans les transmissions WDM vu qu’ils émettent une lumière monochromatique, efficaces dans les transmissions à grande

distance, permettent un bon rapport signal/bruit, et sont très linéaires. Ces Lasers ont des fréquences centrales dans la fenêtre 1310 nm et de 1520 à 1565 nm.

II.1.1.2 .Modulateurs/démodulateurs :

Le moyen le plus efficace de moduler et démoduler les signaux consiste à utiliser des lasers à semi-conducteur. La modulation du courant d'attaque d'un laser à semi-conducteur peut produire une modulation de fréquence ou d'intensité selon la configuration du modulateur à semi-conducteur.

II.1.1.2.1.Modulation directe :

On agit sur le courant de jonction qui provoque l'effet laser. En première approximation, la puissance optique délivrée varie linéairement en fonction du courant. Ce type de modulation provoque une modification dynamique du spectre due à la conversion amplitude-fréquence (désignée par le terme anglo-américain de chirp) et du diagramme de rayonnement, avec des effets nuisibles aux grandes vitesses de modulation.



Figure. II.10. Synoptique de la modulation directe.

II.1.1.2.2. Modulation externe :

Le champ émis par la source n'est pas modulé et passe par un circuit optique spécial où l'on peut provoquer une modulation de phase. Les modulateurs d'amplitude ne présentent aucune propriété de linéarité mais introduisent beaucoup moins de conversion amplitude-fréquence. Le signal modulé envoyé dans la fibre est donc nettement moins affecté par ce phénomène mais également moins puissant que dans le cas de la modulation directe. Le principe utilisé dans ces modulateurs externes est soit la variation de l'indice de réfraction, soit la variation de l'absorption (dispositif à base de semi-conducteur).

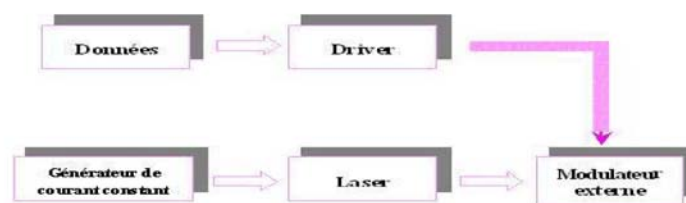


Figure. II.11. Synoptique de la modulation externe.

II.1.1.2.3. Modulateurs de Mach-Zehnder (électroréfractifs) :

Le matériau utilisé est le niobate de lithium (LiNbO_3) dans une configuration d'interféromètre de Mach-Zehnder en onde guidée. La phase de l'onde lumineuse est modifiée dans un des bras au rythme de la tension appliquée au matériau de ce bras. Il en résulte, après recombinaison des deux ondes, des interférences constructives ou destructives suivant la tension appliquée.

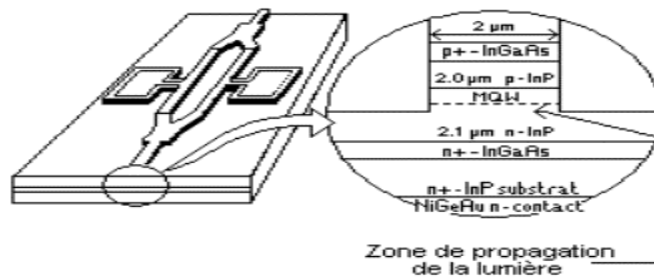


Figure II.12. Schéma d'un modulateur Mach-Zehnder à multiples puits quantiques.

II.1.1.2.4. Modulateurs électro-absorbants :

À base de semi-conducteur, la modulation de la puissance lumineuse résulte directement de la variation de l'absorption du matériau avec le champ électrique.

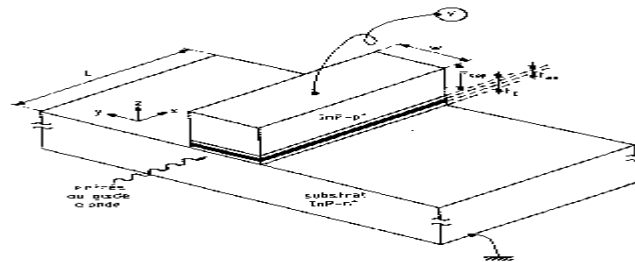


Figure. II.13. Structure d'un guide d'onde en arête contenant un matériau électro-absorbant.

Les faces clivées sont recouvertes de couches anti-réfléchissantes afin de diminuer les pertes par réflexion. Malgré la sensibilité à la polarisation provenant de la différence des facteurs de confinement des modes TE et TM dans le guide, l'avantage de cette structure est de permettre d'associer sur un même substrat une diode laser fonctionnant en continu et un modulateur d'intensité.

II.1.2. Composants de réception :

II.1.2.1. Le récepteur optique :

La détection est un point clef des liaisons par fibre optique. En général, les signaux reçus sont très faibles (typiquement de nW) et rapides (le débit binaire des liaisons peut atteindre 40 GBits/s). Il est donc nécessaire que le système de détection soit sensible et rapide. Le rayonnement incident crée, par génération bande à bande, des paires électron-trou séparées par un champ électrostatique, puis collectées par des contacts électriques. Ce flux de charges donne lieu à un photocourant I_{ph} . Le système de détection comprend, en plus de l'élément photodétecteur proprement dit (par exemple une photodiode PIN), un ensemble de circuits électroniques, à commencer par un pré-amplificateur faible bruit.

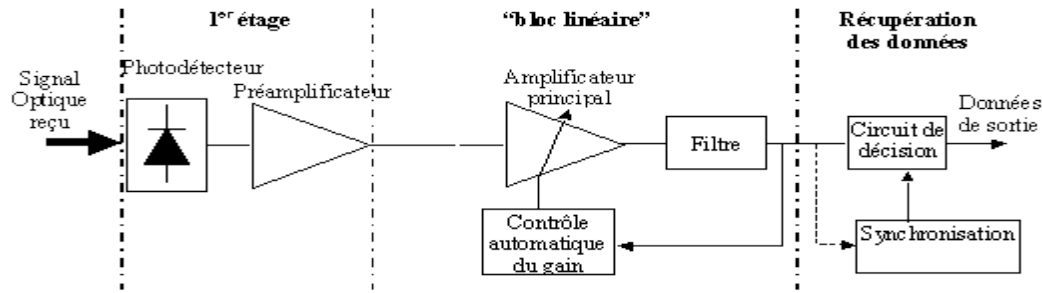


Figure. II.14. Schéma d'un récepteur de données à détection directe.

- ✓ Le bloc de 'premier étage' composé du photodétecteur. Il peut être accompagné d'un préamplificateur, qui a pour but de rendre le photocourant généré suffisamment fort malgré le faible signal optique reçu ou la faible sensibilité du photodétecteur.
- ✓ Le bloc 'linéaire', composé d'un amplificateur électrique à gain élevé et d'un filtre, réducteur de bruit.
- ✓ Le bloc 'récupération des données', correspondant au dernier étage du récepteur. On y trouve un circuit de décision et un circuit de récupération de rythme, encore appelé circuit de synchronisation.

II.1.2. 1.1. Photodétecteurs :

Le Photodétecteur est un composant essentiel dans les communications par fibres optiques. Son rôle est de convertir en énergie électrique la puissance optique reçue (photons). Le facteur essentiel qui détermine le rendement d'un photodétecteur est le coefficient d'absorption qui est caractéristique du matériau utilisé. Ce coefficient d'absorption dépend bien sûr de la longueur d'onde de la lumière. Les autres caractéristiques sont les suivantes :

- ✓ la longueur d'onde de coupure λ_c au-delà de laquelle le matériau devient transparent au rayonnement est déterminée par l'énergie de bande interdite EG du semiconducteur :

$$\lambda_c (\mu\text{m}) = 1,24 / \Delta E (\text{eV}).$$

- ✓ le rendement quantique (η_Q) est le rapport du nombre de paires de porteurs « photo créés et collectés » au nombre de photons incidents.
- ✓ la sensibilité $S(\lambda)$ de la photodiode est le rapport du photocourant I_{ph} au flux énergétique (ou puissance optique) reçu.
- ✓ Le courant d'obscurité est déterminé comme le photo-courant et est détecté par le photodétecteur en absence de puissance optique incidente. Il introduit beaucoup de bruit.
- ✓ La puissance optique P_{opt} décroît selon une loi exponentielle dans laquelle intervient le coefficient α

$$P_{opt}(x) = P_{opt}(0) \times e^{-\alpha(\lambda).x}$$

x désigne la profondeur de pénétration de la lumière dans le semiconducteur :

Ces grandeurs sont reliées par les relations suivantes, où e représente la charge élémentaire de l'électron :

$$\eta_Q = \frac{(I/e)}{(P_{opt}/hv)} \quad \text{et} \quad S(\lambda) = \frac{I_{ph}}{P_{opt}} = \eta_Q \frac{e\lambda}{hc}$$

➤ Les différents types de photodétecteur :

Les photodiodes peuvent être classées en deux catégories : celles qui n'ont aucun gain interne (PN et PIN) et celles qui ont un gain interne (APD).

II.1.2. 1.1.1. Les photodiodes (PIN) :

Pour effectuer la photodétection en évitant les recombinaisons des paires électron-trou, il est nécessaire que les photons soient absorbés dans une zone dépourvue de porteurs mobiles (intrinsèque), 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. Cette photodiode polarisée en inverse, est réalisée à partir de trois couches de semiconducteur. Deux couches fortement dopées P+ et N+ entre les quels existe une couche de grande résistivité (presque intrinsèque) où il existe très peu de charge mobiles.

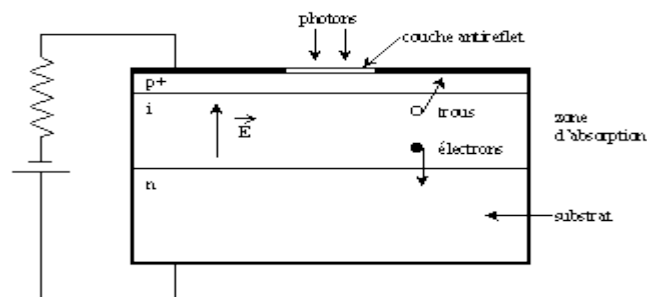


Figure II. 15. Photodiode PIN.

L'expression du courant total dans la photodiode est donné par :

$$I_{pho} = S \cdot I_{opt} + I_{obs}$$

Où I_{obs} est le courant d'obscurité, I_{obs} , qui circule dans la jonction en l'absence d'éclairement.

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. 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.

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. Il est nécessaire de tenir compte aussi du bruit d'obscurité associé au courant d'obscurité. En plus, la photodiode est caractérisée également par un bruit en $1/f$ (avec f la fréquence du signal) et un bruit thermique, provenant des circuits de polarisation du photorécepteur et notamment du préamplificateur.

ii.1.2. 1.1.2. Photodiode à avalanche (APD) :

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 soulevée, 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 avalanche ou PDA (en anglais APD). 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 photodétection. La valeur du courant relatif au nombre de photons absorbés devient :

$$I_{PDA} = M(V) \times S(\lambda) \times P_{opt}$$

Le gain augmente avec la différence de potentiel appliquée, mais est limité à une valeur maximale. Si le champ devient trop fort, il y a risque de claquage. Cette valeur limite de tension dépend du matériau et de la structure utilisés.

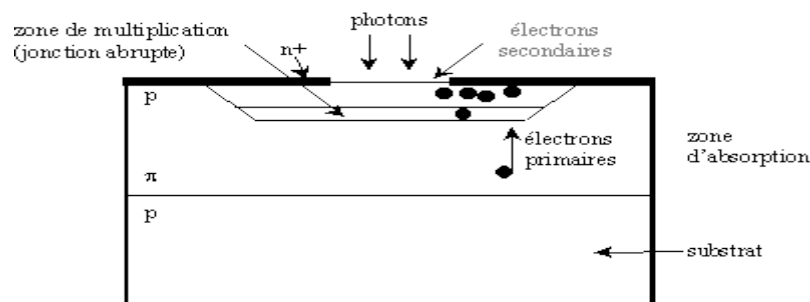


Figure. II.16. Structure d'une photodiode à avalanche.

L'absorption a lieu dans une zone large et peu dopée, dite π et la multiplication à lieu dans la jonction abrupte pn^+ . En outre, pour une tension inverse élevée, la zone de charge d'espace s'étend dans la zone π , dont la résistivité va augmenter avec la tension. Ce principe introduit un effet stabilisateur : le champ électrique et le gain augmentent lentement, ce dernier peut atteindre de fortes valeurs tout en le commandant avec précision. Il est plus facile d'éviter le claquage.

Le courant d'obscurité observé, I_{obs}' , est plus important dans une photodiode en régime d'avalanche, le courant débité par la PDA vaut :

$$I_{ph}' = M \cdot S \cdot P_{opt} + I_{obs}'$$

La rapidité est affectée par le phénomène d'avalanche. Elle est donc inférieure à celle des photodiodes PIN, à cause du temps de multiplication, mais reste élevée (de l'ordre de la nanoseconde). Les mêmes bruits que ceux des photodiodes PIN affectent les photodiodes PDA. Il faut noter que le bruit quantique est également multiplié par le gain M . De plus, chaque porteur primaire ne donne pas naissance à un même nombre m de porteurs secondaires. Cette fluctuation de m donne naissance à un bruit supplémentaire.

II.1.2. 1.1.3. Comparaison PIN, APD :

Une comparaison des performances entre les deux photodiodes permet de faire un choix. Le rapport Signal sur Bruit (S/B) est défini par le rapport du (Photo-courant engendré par la puissance du signal optique)² sur le (Courant de bruit du photo-détecteur + courant de bruit de l'amplificateur)². Pour de faibles niveaux, le rapport signal sur bruit est meilleur avec une photodiode à avalanche alors que pour des niveaux plus forts, il vaut mieux utiliser une photodiode PIN.

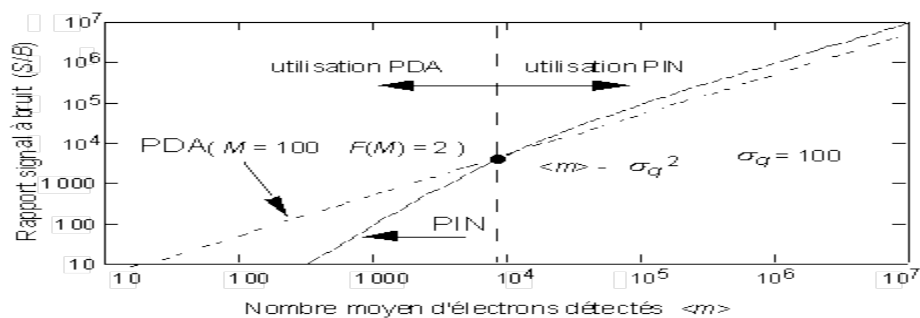


Figure. II.17. Rapport signal à bruit en fonction de l'intensité du signal émis pour les photodiodes PDA et PIN.

II.1.2. 1.1.4. Amplification électrique :

Le courant émis par la photodiode, malgré la présence d'un préamplificateur, reste souvent assez faible. Il est donc nécessaire d'utiliser un amplificateur en sortie de photorécepteur. Le gain adéquat peut être assez élevé.

II.1.2. 1.1.5. Le filtrage :

Afin de minimiser le bruit en sortie du récepteur, il faut filtrer le signal numérique dans une bande $0 - \Delta F$ qui soit la plus petite possible, tout en ne créant pas d'interférences intersymboles (IES), c'est-à-dire telle que la réponse du filtre à un symbole s'annule à tous les instants de décision sur les symboles voisins.

II.1.2. 1.1.5. La décision :

On doit assurer à l'abonné une qualité d'information parfaite. Pour cela, une remise en forme du signal détecté est réalisée grâce au bloc de décision. Ce dernier est composé d'un détecteur à seuil et d'un circuit de récupération de rythme, encore appelé circuit de synchronisation.

Lors d'un front montant de l'horloge, le signal reçu est comparé au seuil de décision. S'il est supérieur, alors un niveau haut sera détecté et établi, sinon, ce sera un niveau bas. L'horloge doit être synchronisée sur le signal incident. Cette récupération de rythme est effectuée grâce à une boucle à verrouillage de phase classique.

II.2. Composants du canal de transmission :

II.2.1. Fibre optique :

La fibre optique est le support de propagation de la lumière. Il s'agit d'un guide d'onde diélectrique à géométrie cylindrique. On distingue principalement les fibres optiques multimodes et les fibres optiques monomodes, selon le nombre de modes pouvant se propager compte tenu de la géométrie de la fibre (essentiellement son diamètre de cœur) et le profil de dopage cœur/gaine.

Du point de vue de la propagation de la lumière, les propriétés principales d'une fibre sont d'une part son atténuation (pertes α en dB/km), et d'autre part ses propriétés de dispersion.

La principale source de dispersion dans les fibres multimodes est la dispersion intermodale, liée à une différence de vitesse de propagation des différents modes présents. La dispersion se traduit par un étalement temporel des impulsions lumineuses se propageant dans la fibre, qui peut conduire à un recouvrement total des impulsions codant les différents bits d'information.

Pour les fibres monomodes, utilisées pour l'établissement de liaisons rapides, la dispersion chromatique intervient seule. Elle est liée au caractère non-monochromatique de la source de lumière et au fait que la vitesse de propagation du mode de la fibre varie avec la longueur d'onde. L'étalement temporel des impulsions s'exprime par la relation suivante :

$$\Delta T = D_2 \times \Delta \lambda \times L$$

Où D_2 est le coefficient de dispersion de la fibre en p/ (nm.km), $\Delta \lambda$ la largeur spectrale effective de la diode laser, et L la longueur de la liaison en km.

ii.2.2. Amplificateur optique :

Les amplificateurs optiques sont destinés à amplifier les signaux optiques sans recourir à des solutions optoélectroniques basées sur des conversions de type optique/électronique et électronique/optique (photodétection, amplification électronique, puis émission laser à la même longueur d'onde à partir du signal amplifié électroniquement). Parmi les amplificateurs optiques, figurent principalement les amplificateurs à fibre dopée Erbium (EDFA, de l'acronyme anglais Erbium Doped Fiber Amplifier), les amplificateurs à semiconducteurs et les amplificateurs Raman. Leur principe repose toujours sur la possibilité d'amplification optique par émission stimulée de lumière, de la même manière que pour les lasers.

L'amplification optique est à l'origine d'une véritable révolution dans le domaine des télécommunications, vu les avantages que cette technologie procure en association avec le multiplexage en longueur d'onde (WDM). En effet, cette amplification peut intervenir sur l'ensemble des N longueurs d'onde d'un multiplex, sans distorsion du signal utile.

II.2.2.1. Principe de l'amplification optique :

L'amplification optique repose sur le phénomène d'émission stimulée. Le signal est amplifié dans un guide (semi-conducteur ou fibre) grâce à un apport extérieur d'énergie appelé pompage (courant injecté ou source de lumière) qui vient créer une inversion de population. La recombinaison électron-trou peut ensuite être provoquée par un photon incident, ce qui donne naissance à un deuxième photon de même fréquence, de même phase et même direction. Cette émission est dite stimulée et conduit à une amplification du signal.

En même temps, la recombinaison peut se faire sans la présence d'un photon incident. Ces photons, émis de façon spontanée, de manière non cohérente, constituent le bruit de l'amplification optique.

L'ensemble des photons, originels ou pas, subissent une série d'amplifications. Les photons spontanés seront aussi amplifiés, ce qui définit la source de bruit appelée ESA (Emission Spontanée Amplifiée).

II.2.2.2. Les amplificateurs à fibre dopée Erbium (EDFA) :

Un amplificateur à fibre dopée Erbium consiste en une courte section de fibre optique (typiquement quelques dizaines de mètres), possédant une fraction de l'élément terre rare Erbium sous la forme d'ions Er^{3+} . L'amplification optique repose sur la possibilité d'amplification stimulée du signal. Les ions Er^{3+} , insérés dans la matrice amorphe de silice, matériau constituant la fibre optique, présentent un diagramme énergétique simplifié à trois niveaux.

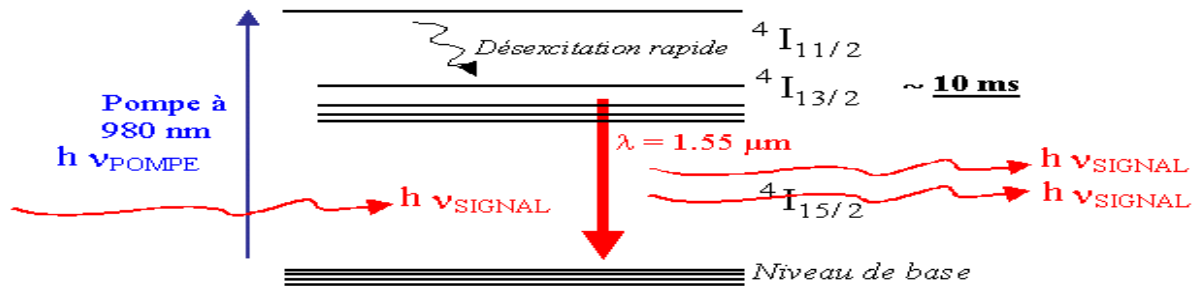


Figure .II.18. Schéma simplifié des niveaux en énergie intervenant dans le processus d'émission stimulée.

Le principe de fonctionnement de l'EDFA est le suivant :

- ✓ Le signal à amplifier est mélangé à un signal de pompe de forte puissance (de 10 à 200 mW typiquement) grâce à un multiplexeur de longueurs d'onde, et le signal résultant est injecté dans la fibre dopée Er³⁺. Deux longueurs d'ondes sont disponibles pour le signal de pompe : 980 nm ou 1480 nm.
- ✓ Le signal de pompe provoque une inversion de population des ions Er³⁺ et le milieu devient amplificateur vis-à-vis du signal optique d'entrée.
- ✓ Lorsque l'émission stimulée domine, elle donne lieu à de l'amplification optique. Cela dit, trois phénomènes coexistent toujours : absorption, émission spontanée et émission stimulée.

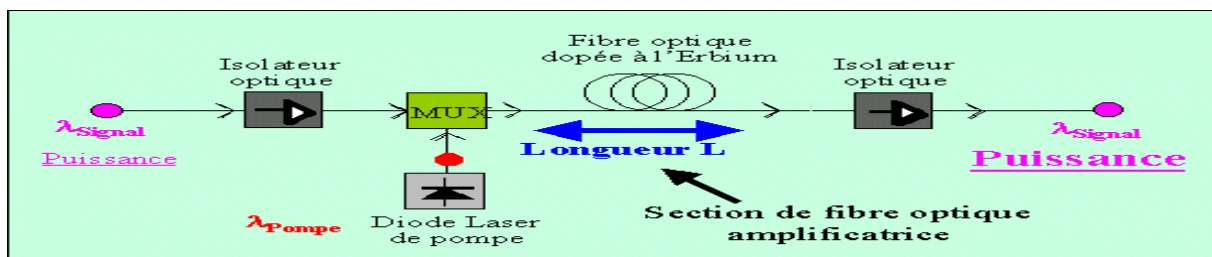


Figure. II.19. Schéma de principe de l'amplificateur à fibre dopée Erbium (EDFA).

Des isolateurs présents à chaque extrémité en assurent aussi la stabilité en bloquant tous les faisceaux lumineux susceptibles de revenir en aval. Les amplificateurs EDFA permettent un gain de plus de 30 dB, une puissance de sortie de +17 dB. Le gain d'un EDFA est dépendant de la longueur d'onde, ceci est corrigé en utilisant des filtres permettant une amplification uniforme des différentes longueurs d'ondes.

Quantitativement, les caractéristiques techniques principales des EDFA sont les suivantes :

- ✓ le gain de l'amplificateur (rapport en décibels (dB) de la puissance de sortie sur la puissance en entrée) : typiquement 30 dB ;

- ✓ le niveau de puissance de saturation PS du gain de l'amplificateur, qui chiffre la puissance de sortie pour laquelle le gain de l'amplificateur sature déjà : typiquement 1 à 10 mW ;
- ✓ la bande spectrale d'amplification $\Delta\lambda$: typiquement 25 nm ;
- ✓ le facteur de bruit F , qui chiffre la dégradation du rapport signal à bruit à la traversée de l'amplificateur du fait de l'amplification de l'émission spontanée (**ESA**) et qui limite la distance de transmission sans amplificateurs à environ 120 Km: typiquement 6 dB.

II.2.2.3 Les amplificateurs à semi-conducteur :

Leur structure de base est peu différente de celle d'une diode laser. Nous retrouvons l'inversion de population, l'émission spontanée et stimulée, les recombinaisons non radiatives, une source externe. Contrairement aux lasers à semi-conducteur, il n'y a pas de miroirs aux extrémités mais un revêtement antireflets déposé sur les faces clivées afin de diminuer les réflexions de la lumière vers l'intérieur du circuit.

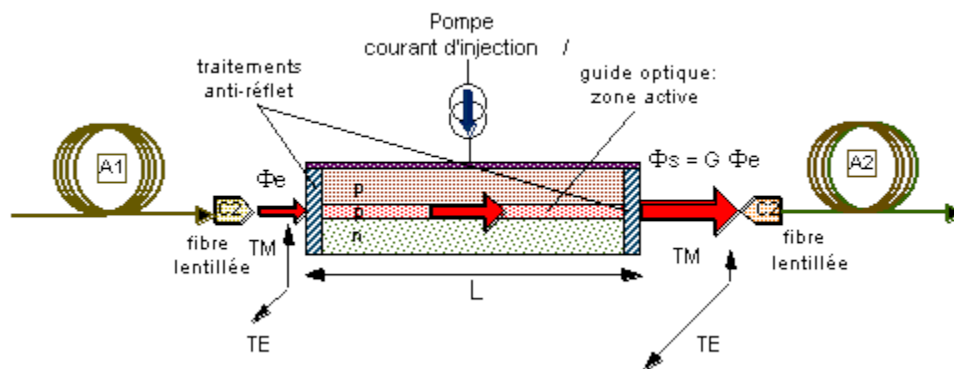


Figure. II.20. Configuration de base d'un amplificateur optique à semi-conducteur.

Les applications couvrent une gamme de longueurs d'onde assez étendue incluant 1330 et 1550 nm. Le semi-conducteur le plus utilisé dans les SOA (Semi-conductor Optical Amplifier) est le composé quaternaire InGaAsP. Ce matériau a un GAP correspondant à une longueur d'onde émise de 0.9 à 1.65 μm . Une amplification efficace est obtenue en confinant la lumière et les porteurs injectés dans une étroite couche active. Ceci est accompli en l'enfermant entre deux couches du revêtement d'un plus grand GAP et plus petit index de réfraction. Le SOA est caractérisé par des pertes de couplage mais grâce aux lentilles, les pertes de couplages sont réduites entre 2 et 4 dB. Parmi les caractéristiques les plus attrayantes du SOA, son gain élevé qui peut aller jusqu'à 30 dB et une grande bande passante de l'ordre de 5 THz, soit environ 40 nm autour de 1550 nm. Cependant ce gain dynamique très rapide induit une grande diaphonie entre les canaux WDM.

II.2.2.4. Les amplificateurs 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, celui-ci a besoin d'une source externe, une source optique. Des lasers YAG sont les plus souvent utilisés dans ce cas, en émettant 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.

II.2.2.5. Comparaison des amplificateurs :

L'amplificateur à semi-conducteur n'apparaît que très peu dans un système de transmission, car il présente aujourd'hui des caractéristiques assez peu favorables, au regard des EDFA. On notera cependant qu'il est le meilleur candidat à 1,3 μm . De plus, il se prête à l'intégration monolithique, ce qui est difficilement réalisable avec les EDFA.

L'apparition de ces derniers a néanmoins eu des conséquences fondamentales. Ils ont permis de fabriquer un milieu de propagation sans perte sur une très grande distance dans les systèmes de transmission travaillant à 1,55 μm . En les insérant périodiquement, ils trouvent leur application dans les liaisons sous-marines. Ils introduisent de plus faibles pertes d'insertion, une faible distorsion du signal, un gain plus important et sont insensibles à la polarisation de la lumière incidente contrairement aux AOSC. Ceci conduit à préférer les EDFA. Leur plus gros défaut est leur limite à amplifier uniquement autour de 1550 nm.

Le choix d'un amplificateur optique doit cependant se faire en fonction de son rôle. Il peut servir d'amplificateur de puissance en émission (booster), de préamplificateur en réception ou d'amplificateur en ligne. Selon l'utilisation qui en est faite, les paramètres diffèrent. On demandera par exemple à un amplificateur de puissance d'être capable de délivrer une puissance de sortie élevée et ses caractéristiques de bruit seront assez peu critiques, tandis qu'un préamplificateur doit être le moins bruyant possible. L'amplificateur en ligne sera un compromis à tout cela afin à la fois de ne pas dégrader la qualité du signal transmis et allonger la distance de transmission.

II.2.2.6. Le rapport signal à bruit optique (OSNR) :

L'OSNR est le rapport de la puissance du signal optique par la puissance du bruit optique sur une bande de fréquence donnée. Les sources de bruits peuvent être l'émetteur, la diaphonie, ou l'émission spontanée amplifiée (ASE) pour ne citer que ceux-là. Toutefois, on ne s'intéressera qu'à l'ASE qui constitue le facteur le plus important.

La détection du signal est généralement affectée par l'atténuation et la dispersion. Pour cela, on utilise des amplificateurs qui, d'un autre côté, entraînent des imperfections supplémentaires causées par l'ASE. En pratique, l'utilisation d'un amplificateur aide à améliorer la qualité du signal car l'augmentation de l'amplitude du signal aide à dépasser le bruit généré par le récepteur. Cependant, le bruit de fond optique qui accompagne le signal optique désiré sera amplifié avec le signal. Par conséquent, l'OSNR aura tendance à se dégrader en passant à travers le système de transmission.

L'OSNR est le plus important paramètre associé à un signal optique. En effet, le facteur Q dépend directement de l'OSNR. Ils sont liés par l'égalité suivante :

$$Q_{dB} = 20 \log_{10} \sqrt{OSNR} \sqrt{\frac{B_0}{B_c}}$$

Où B_0 est la bande passante du composant d'extrémité (photo-détecteur) et B_c est la bande passante du filtre du récepteur.

L'OSNR est une quantité mesurable pour un réseau donné et elle peut être calculée à partir des paramètres de système.

II.2.3. module de compensation de dispersion :

Dans les systèmes de télécommunication de fibre optique, les effets de la dispersion chromatique deviennent importants et doivent être corrigés pour des débits de 10 Gbits/s et plus. Le module de compensation de dispersion peut être un filtre ou une fibre de compensation de dispersion. Le filtre de compensation de dispersion peut être déployer pour compenser un seul canal ou plusieurs canaux. Le module de compensation de la dispersion est caractérisé par sa perte d'insertion ainsi que par la valeur de compensation (une valeur négative) ou par la pente de la courbe de dispersion.

II.2.4. Les isolateurs :

En optique comme en électricité, un isolateur est un dispositif passif non réciproque qui a une faible atténuation dans un sens et une forte atténuation dans l'autre sens. Il a donc une entrée et une sortie. Dans les systèmes de télécommunications par fibre optique, les isolateurs sont le plus souvent employés pour atténuer la lumière issue des réflexions parasites, qui, par exemple en revenant dans le laser, vient troubler son fonctionnement. Les occasions d'avoir des réflexions tout au long de la ligne sont fréquentes (un connecteur optiquement mal adapté,

une extrémité de fibre mal coupée, ...). Ces réflexions intempestives augmentent le bruit RIN de ces lasers.

Les isolateurs sont également utilisés dans les amplificateurs optiques à fibre dopée afin de les empêcher de résonner et de se transformer en lasers s'il y a réflexion.

Ils existent plusieurs types d'isolateurs optiques. Citons juste les isolateurs à polariseurs et les isolateurs à prisme de rutile. Sans détailler leur fonctionnement, l'isolateur à polariseurs est constitué de deux polariseurs et un rotateur de Faraday composé d'un matériau dia- ou paramagnétique. Les polariseurs, dont les axes passants sont décalés de 45° , sont situés à l'avant et à l'arrière du rotateur. Ce dernier, soumis à un certain champ magnétique, fait subir une rotation de 45° à la lumière qui le traverse. Ainsi, dans un sens, le second polariseur dont l'axe est orienté comme la nouvelle vibration décalée, permet le passage de la lumière alors que dans l'autre sens, la lumière se présente au second polariseur avec un angle de 90° et ne peut passer.

Le principe de fonctionnement d'un isolateur à prismes de rutile est différent. La biréfringence du rutile fait qu'un rayon incident se sépare à son entrée dans le cristal en deux rayons. Ces deux rayons sont polarisés à angle droit. Dans le sens passant, les angles des prismes sont tels que les rayons doivent se focaliser dans la fibre. Et dans l'autre sens, ils se focalisent en des points hors du cœur de la fibre.

Les pertes d'insertion sont liées à l'absorption dans les différents éléments. Elles ne dépassent pas 2,5 dB. Le taux d'isolation dépend soit de la précision sur les angles des prismes dans un cas, soit du taux d'extinction des polariseurs ainsi que de la précision de l'orientation de ces polarisateurs dans l'autre cas. Une isolation supérieure à 40 dB est tout à fait possible.

II.2.5. Les coupleurs :

Dans les réseaux de fibres optiques, les coupleurs permettent de distribuer le signal optique vers plusieurs fibres ou inversement, acheminer le signal venant de plusieurs fibres vers une seule. Le principe de base est celui du couplage par onde évanescente entre deux fibres dont les cœurs sont très proches. Le champ électromagnétique s'étend au delà des cœurs. De ce fait, la lumière qui se propage dans un guide sent la présence de l'autre guide et se transfère progressivement dans l'autre guide. Si les guides sont identiques, la totalité de la lumière passe dans le second guide après une longueur d'interaction L_{inter} . Si cette région d'interaction est supérieure à L_{inter} , la lumière repasse dans le premier guide.

II.2.6. Les filtres optiques :

Le filtrage a pour but de limiter l'occupation spectrale d'un signal. La séparation spectrale est réalisée en réfléchissant une certaine gamme de longueurs d'onde et en transmettant les autres. On caractérise donc le filtre par sa bande passante, c'est-à-dire le domaine de fréquences (ou de longueurs d'onde) pour lequel il laisse passer la lumière et par sa bande atténuée, c'est-à-dire le domaine de fréquences (ou de longueurs d'onde) pour

lesquelles il réfléchit la lumière incidente. Ces deux domaines spectraux peuvent être très larges notamment pour les filtres passe-haut et passe-bas.

Deux types de filtres sont couramment utilisés, les filtres dichroïques et les filtres Fabry-Perot.

II.2.7. Les commutateurs optiques :

II.2.7.1. Les répartiteurs :

Un répartiteur (Fiber Optical Cross-Connect, F-OXC) permet d'effectuer une fonction de commutation entre les fibres d'entrée et de sortie du routeur. C'est le plus élémentaire des commutateurs optiques et le moins coûteux en fabrication. Ce type d'équipements ne permet pas d'effectuer les opérations de démultiplexage sur les signaux entrants ni de multiplexage sur les signaux sortants. C'est pourquoi le répartiteur est dit insensible aux longueurs d'onde. Les fonctions d'extraction et d'insertion de signaux avec le terminal relié au routeur sont possibles, mais c'est alors l'ensemble des canaux WDM multiplexés qui est extrait d'une fibre d'entrée ou inséré dans une fibre de sortie.

II.2.7.2. Les multiplexeurs à insertion /extraction optiques :

II.2.7.2.1. OADM fixe : Il représente la première génération de multiplexeurs à insertion/extraction optique. Les longueurs d'ondes à insérer/extraire étaient fixe pour un OADM fixe.

II.2.7.2.2. OADM dynamique : A l'inverse des OADM statiques, les OADM dynamiques peuvent être reconfigurés. Il existe deux générations : la deuxième est utilisée dans les réseaux WDM point à point pour remplacer les OADM de première génération et apporter les avantages de la configuration du réseau, la troisième génération est aujourd'hui utilisée dans les boucles optiques pour pouvoir extraire une longueur d'onde particulière (qui peut être reconfigurée) et insérer de nouvelles données à sa place.

II.2.7.3. Les brasseurs optiques (OC, Optical Cross Connect) :

II.2.7.3.1. Les brasseurs passifs :

Dans ces brasseurs on utilise la même longueur d'onde de bout en bout, il n'est y'a pas de réallocation de longueurs d'onde.

- ✓ **Brasseur fixe (brasseur à fibre):** Dans un brasseur fixe les connections sont permanentes. Il permet à un message arrivant sur un port d'entrée du démultiplexeur d'être routé vers un autre port de sortie du multiplexeur sur la même longueur d'onde.
- ✓ **Brasseurs dynamiques :** Un brasseur dynamique contient : des démultiplexeurs 1 : N pour séparer les différentes longueurs d'onde de chaque signal d'entrée, des multiplexeurs N : 1 pour combiner les N différentes longueurs d'onde de chaque signal de sortie, et des matrices des commutateurs optiques pour le routage des signaux. Dans

cette architecture particulière, nous supposons la disponibilité d'une matrice pour chaque longueur d'onde. Dans un brasseur dynamique, des commutateurs optiques sont introduit afin qu'un message arrivant sur un port d'entrée puisse être routé vers n'importe quelle sortie, mais sur la même longueur d'onde.

II.2.7.3.2. Les brasseurs actifs (brasseurs avec échange de λ) :

Un brasseur actif contient : des démultiplexeurs 1 : N, des multiplexeurs N : 1, des matrices MxM et des commutateurs optiques pour le routage des signaux. Dans cette architecture particulière, nous supposons la disponibilité d'une matrice pour chaque longueur d'onde. Une certaine matrice K permet donc de distribuer dynamiquement les M signaux de longueur d'onde λ_k provenant des ports d'entrée vers les M ports de sortie. Le commutateur optique permet de relier M ports d'entrées avec M ports de sorties.

Dans un brasseur actif, les canaux optiques peuvent utiliser plusieurs longueurs d'onde. Pour cela un étage de convertisseur de longueurs d'onde est ajouté, qui permet une régénération partielle du signal (remise en forme), et permet de convertir le signal optique modulé sur une longueur d'onde donnée a l'entrée en un même signal modulé sur une autre longueur d'onde à la sortie.

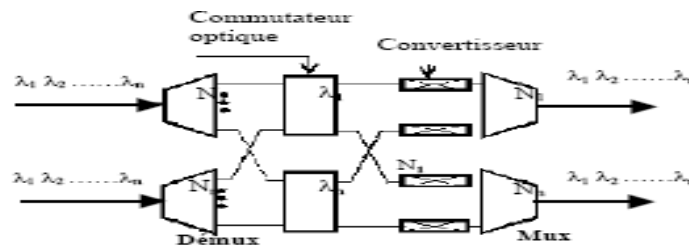


Figure. II.21. Les blocs fonctionnels d'un brasseur actif.

II.2.8. Convertisseurs optiques :

Un convertisseur optique permet de modifier la longueur d'onde d'un signal optique. Ce composant est donc très utile pour les réseaux utilisant de nombreuses longueurs d'ondes. De nombreux travaux traitent des différentes techniques de conversion en longueur d'onde. On distingue deux catégories de conversion en longueur d'onde. En premier lieu, la conversion optoélectronique qui consiste à traduire le signal optique en signal électrique puis le réémettre optiquement sur une deuxième longueur d'onde. Un étage de régénération électronique du signal peut être ajouté au niveau du convertisseur pour remédier aux déformations de l'information suite aux conditions de propagation. La deuxième catégorie englobe les techniques de conversion tout-optique des longueurs d'onde et permet d'atteindre des débits plus importants. Les mécanismes de conversion tout-optique sont divisibles en deux familles : les mécanismes de conversion par commutation et les mécanismes de conversion par mélange.

II.2.8.1. La conversion par commutation (Optical switch types) :

Les convertisseurs de ce type sont basés sur la commutation optique. Un signal optique à la longueur d'onde λ_1 portant l'information est utilisée pour commander le convertisseur et

par suite copier le contenu du signal de commande sur une longueur d'onde différente λ_2 . Les commutateurs optiques exploitent les non-linéarités du milieu de gain qui est généralement un semi-conducteur. Différentes configurations sont possibles. Les techniques de conversion par commutation sont :

- ✓ La modulation du gain croisé ou XGM (Cross-Gain Modulation)
- ✓ La modulation de phase croisé ou XPM (Cross-Phase Modulation).
- ✓ La modulation différentielle de phase ou DPM (Differentiel Phase Modulation).

Ces techniques se caractérisent par la compacité des dispositifs utilisés, l'efficacité élevée de la conversion et l'insensibilité à la polarisation.

II.2.8.2. La conversion par mélange (Optical mixing types) :

Les mécanismes de conversion en longueur d'onde par mélange optique exploitent le comportement non-linéaire des matériaux en présence du signal à transformer à la longueur d'onde λ_1 et une pompe à λ_2 . Le signal récupéré est à une longueur d'onde différente λ_3 . La conversion par mélange permet de convertir des débits encore plus élevés que les techniques de commutation et permet d'assurer la conversion simultanée de plusieurs canaux.

- ✓ Le mélange à quatre ondes (FWM).
- ✓ La génération de fréquence différentielle (DFG).

III. Multiplexage en longueurs d'onde WDM :

III.1. Multiplexage à filtre optique :

Les filtres permettent la séparation spectrale en réfléchissant une certaine gamme de longueurs d'onde et en transmettant les autres. En effet, Le filtrage a pour but de limiter l'occupation spectrale d'un signal. D'autre part Le multiplexage optique regroupe les signaux occupant des gammes de longueurs d'onde différentes tandis que la fonction réciproque, le démultiplexage, permet de séparer des signaux occupant des bandes de longueurs d'onde différentes.

III .1.1. Les types des filtres optiques :

III.1.1.1. Les filtres dichroïques :

Ces dispositifs présentent un pic de réflexion à une longueur d'onde donnée. Il est possible d'accroître le domaine de réflexion en empilant des couches successives et d'obtenir ainsi des filtres passe haut et passe bas. Les filtres dichroïques sont donc constitués par un empilement des couches diélectriques d'indice alternativement haut et bas. Le filtre est caractérisé par son coefficient de transmission T en bande passante, et son coefficient de réflexion R en bande atténuée.

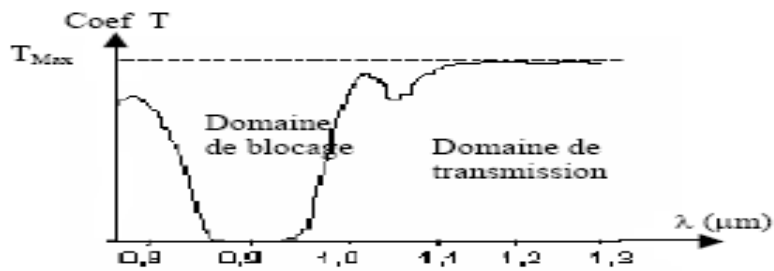


Figure. II.22. La variation du coefficient de transmission d'un filtre dichroïque.

III.1.1.2. Les filtres Fabry-Perot :

Ils ont une caractéristique de transmission passe bas, ils présentent un pic de transmission étroit autour d'une longueur d'onde λ_0 et les deux domaines spectraux adjacents sont réfléchis. Pour accroître la raideur du filtre, on peut répéter l'empilement pour un assemblage à deux ou trois cavités. Comme pour le filtre dichroïque, le coefficient de réflexion est supérieur à 99%, le coefficient de transmission peut atteindre 95%.

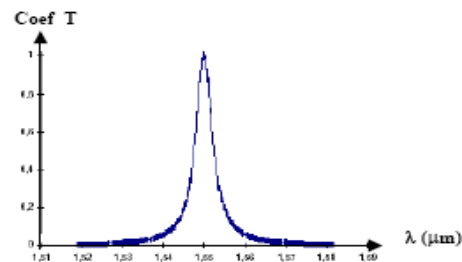


Figure. II.23. La variation du coefficient de transmission d'un filtre Fabry-perot.

III.1.1.3. Les filtres à réseaux de Bragg :

Les filtres à réseaux de Bragg ont pour fonction de réfracter une ou plusieurs longueurs d'onde d'un signal lumineux. Aujourd'hui des réseaux de Bragg ajustables (utilisation de la technologie opto-magnétique) sont à disposition, ce qui permet de construire des ROADM (Reconfigurable OADM).

III.2. Multiplexage à coupleurs sélectifs :

Le principe de ces composants est l'interaction cohérente entre deux guides optiques, ils sont appelés les coupleurs de puissance, qui sont utilisés pour coupler ou séparer les signaux optiques de différentes longueurs d'ondes. Il existe plusieurs formes de coupleurs, telles que les coupleurs en X (2 : 2), les coupleurs en arbres, les coupleurs en étoile qui disposent de N entrées et de N sorties, les coupleurs séries qui disposent de deux entrées et une sortie et inversement, les coupleurs en T et les coupleurs en Y.

III.3. Multiplexage à réseau de diffraction :

Le réseau à l'avantage de traiter simultanément un grand nombre de voies à l'intérieur de la même fenêtre. Un réseau se compose d'une surface optique qui transmet ou réfléchit la lumière et sur laquelle un grand nombre de traits sont gravés au diamant.

Le réseau a la propriété de renvoyer, séparer angulairement, les différentes longueurs d'ondes contenues dans un même faisceau incident. En vertu du principe de retour inverse de la lumière, le réseau peut combiner dans une même direction des faisceaux incidents séparés angulairement et des longueurs d'onde adéquates. L'angle de diffraction est fonction de l'espacement des traits et de l'angle d'incidence.

Considérons le cas de réseaux à surface optique réfléchissante et un rayonnement monochromatique de longueur d'onde. Soit θ_1 l'angle du rayonnement incident avec la normale au réseau et θ_2 l'angle du rayon diffracté. Le réseau est caractérisé par des traits régulièrement espacés d'une distance « a ».

La différence de marche entre deux rayons diffractés est : $D = a (\sin\theta_1 + \sin\theta_2)$. Lorsque la différence de marche est multiple de la longueur d'onde, on déduit l'équation de diffraction du réseau : $\sin\theta_1 + \sin\theta_2 = K\lambda / a$ avec K : l'ordre d'interférence (nombre entier).

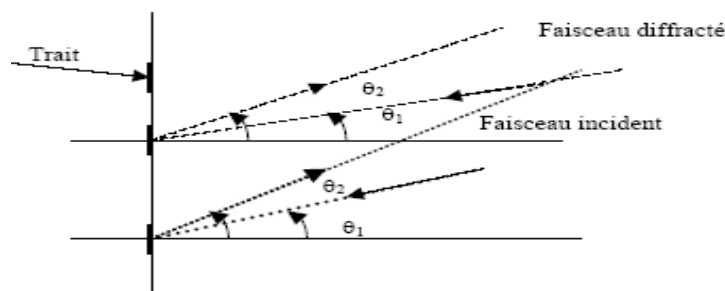


Figure. II.24. Schéma principe d'un réseau de diffraction en réflexion.

IV. Les avantages de la technologie WDM :

- ✓ Media transparente,
- ✓ Transmission pour des longs trajets,
- ✓ Capacité élevée,
- ✓ Utilise les fibres optiques existantes,
- ✓ Rapport élevée de performance,
- ✓ Fiabilité et performance,
- ✓ Facile à améliorer,
- ✓ Pas de connexion électrique,
- ✓ Interférence électromagnétique minimale.

Conclusion :

La capacité des systèmes de transmission à multiplexage en longueur d'onde (WDM) à récemment augmenté d'une manière spectaculaire, en raison notamment de la multiplication du nombre de canaux, toutefois pour atteindre des capacités encore plus grandes, il faudra augmenter le débit binaire par canal (de 10 Gbits/s vers 40 Gbits/s), rapprocher les canaux et élargir la bande passante optique exploitée.

Introduction :

Le développement des télécommunications par fibre optiques a multiplié les architectures des réseaux. La conception des systèmes associés est un problème de plus en plus complexe, tant le nombre de paramètres influant sur les performances de la liaison est important. De plus, il est demandé à ces derniers à la fois de transporter des capacités d'informations de plus en plus importantes, et de se renouveler très rapidement. La méthode expérimentale, qui consiste en des mesures itératives sur un banc de test, est très couteuse en temps et en argent. Aussi, les outils de simulation constituent une assistance intéressante pour trouver des solutions, aussi bien au niveau du composant que du système. Les logiciels peuvent être une aide à la conception et à la prise de décision, tout en évitant la multiplication d'essais compliqués et onéreux. Ils permettent de prendre en compte les améliorations technologiques des composants, parfois même avant qu'ils ne soient disponibles sur marché. Non seulement ils vont mesurer la qualité de transmission d'une liaison, mais aider à en optimiser les performances.

Ce chapitre est consacré à la simulation d'une liaison optique, à l'aide du logiciel de simulation COMSIS.

I .Le logiciel de simulation COMSIS :

I.1. Présentation générale :

COMSIS est un logiciel de simulation des systèmes de télécommunications développé par une société française, IPSIS (Ingénierie pour Signaux et Systèmes), basé sur la technopole de rennes. L'acronyme de COMSIS signifie COMmunication System Interactive Software).

Ce logiciel est un outil qui permet aux chercheurs et aux ingénieurs de modéliser, simuler, analyser et concevoir tout module de traitement du signal allant du dispositif le plus élémentaire au système complet de communication. C'est un environnement interactif qui allie des outils numériques à des fonctionnalités graphiques et une interface utilisateurs. Il permet d'analyser des systèmes analogiques ou numériques décrits sous la forme de schémas-blocs.

I.1.1. L'éditeur du schéma-bloc :

COMSIS offre un environnement intégré où toutes les fonctions d'édition et de traitement s'articulent autour de l'éditeur de schéma-bloc.

Avec ce logiciel assez convivial, la construction d'un schéma-bloc est assez facile. Il suffit de sélectionner, à l'aide de la souris, des objets disponibles dans la bibliothèque et de les déposer sur la feuille de dessin. Ces objets représentent des modélisations d'opérateurs, d'entrée et de sorties et doivent être interconnectés et nommés

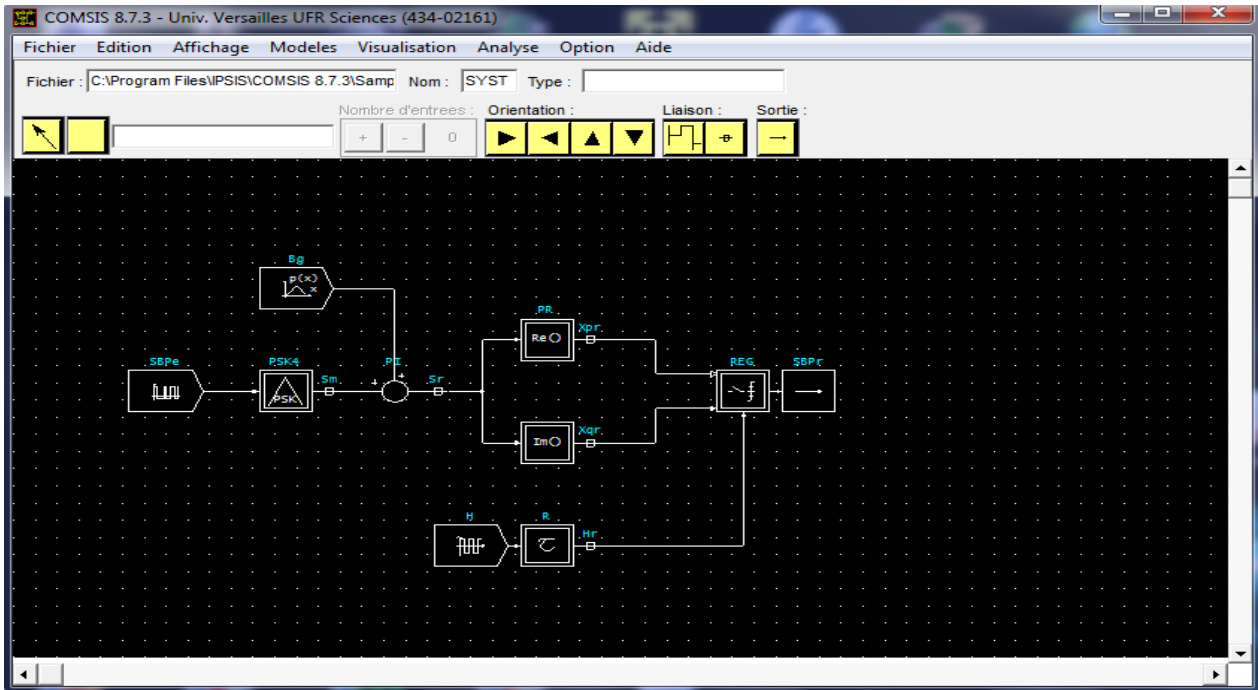


Figure. III.1.L'éditeur de schéma-bloc de COMSIS.

I.1.2. la bibliothèque :

Parmi les modèles disponibles dans la bibliothèque de COMSIS, nous citerons, les codes en ligne, les codes correcteurs d'erreurs, les fonctions logiques, les modulateurs, les démodulateurs, les filtres, les perturbations, le GSM, l'UMTS, les signaux de télévision, les composants optiques.....

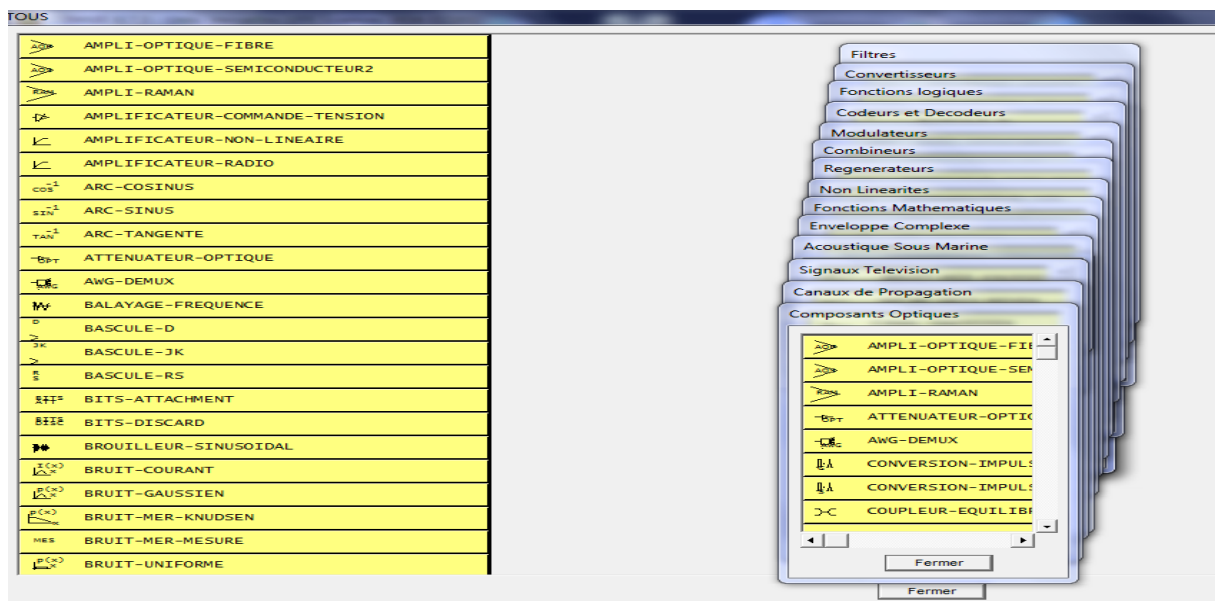


Figure. III.2 La bibliothèque de modèles de COMSIS.

La bibliothèque est assez étendue et continue régulièrement de s'enrichir. De plus, COMSIS offre la possibilité de développer nos propres modèles écrits en langage C ou FORTRAN, grâce au builder de COMSIS.

I.2. Les différentes étapes de simulation d'un système :

Une fois le schéma construit, la simulation peut être lancée. La première phase que réalise le logiciel COMSIS est la modélisation du système, en suite une analyse de la liaison est réalisée.

Les simulations que nous pouvons réaliser comportent principalement les étapes suivantes :

- ✓ Chaque élément du système étudié, par exemple une liaison point à point, est décrit individuellement, soit par ses paramètres système, soit par ses paramètres physiques.
- ✓ On accède aux modèles (composant, sous-systèmes, canaux de propagation.....).

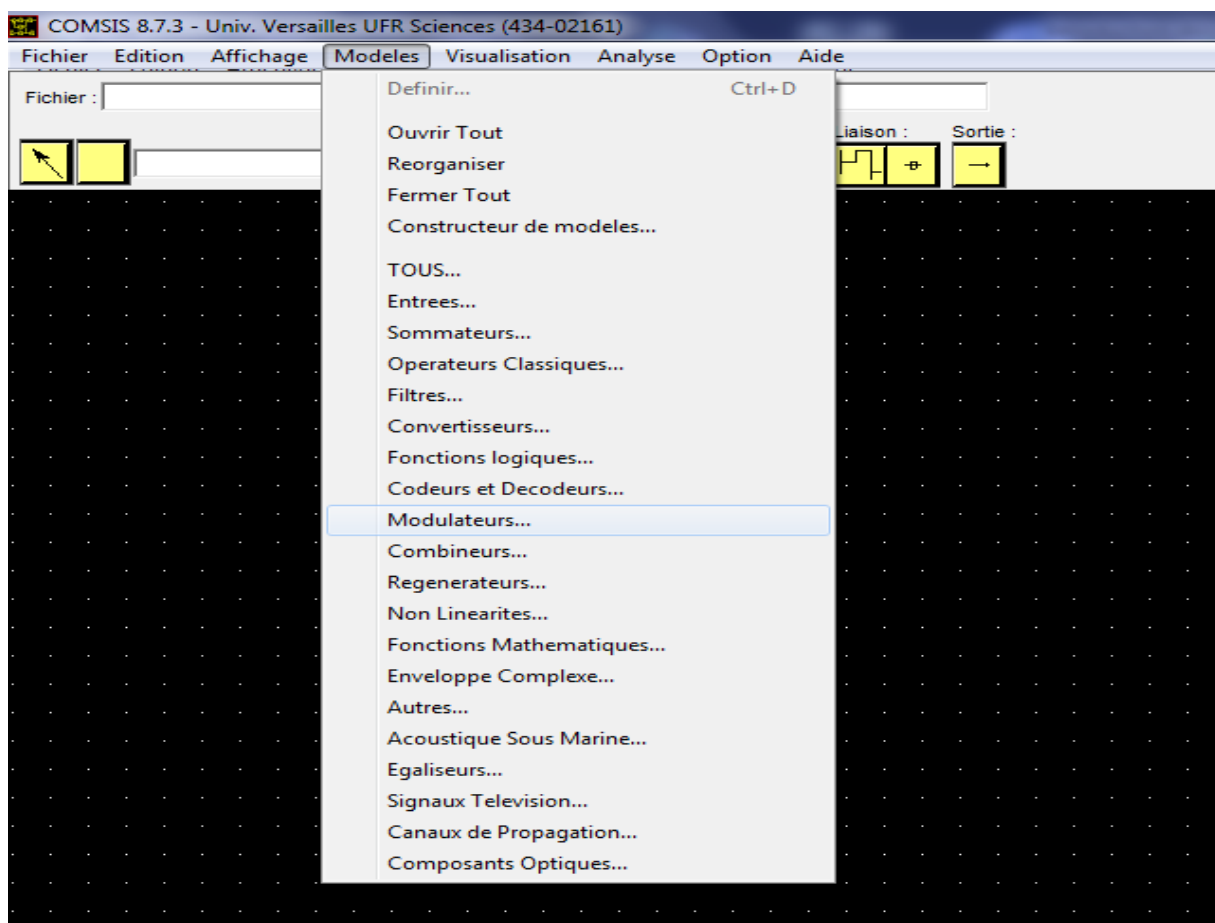


Figure.III .3. Menu des modèles de COMSIS.

- On rassemble les différents éléments au moyen de fils de connexion. On place des variables intermédiaires pour la visualisation à la sortie de chaque module et on les nomme.

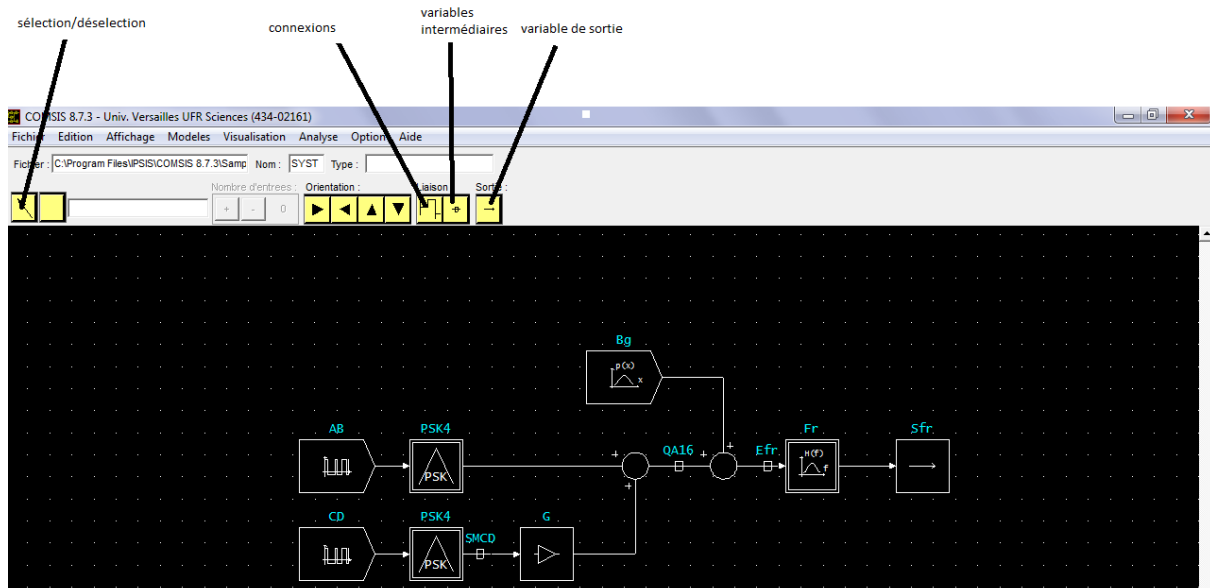


Figure.III.4 .Menu principal du logiciel.

- A ce stade, il est possible de visualiser le système décrit lors des étapes précédentes. Une fenêtre contextuelle, dite mode alphanumérique, permet de visualiser :
 - ✓ Les équations de système ;
 - ✓ Les paramètres du système ;
 - ✓ La nature du système (continu ou échantillonné).

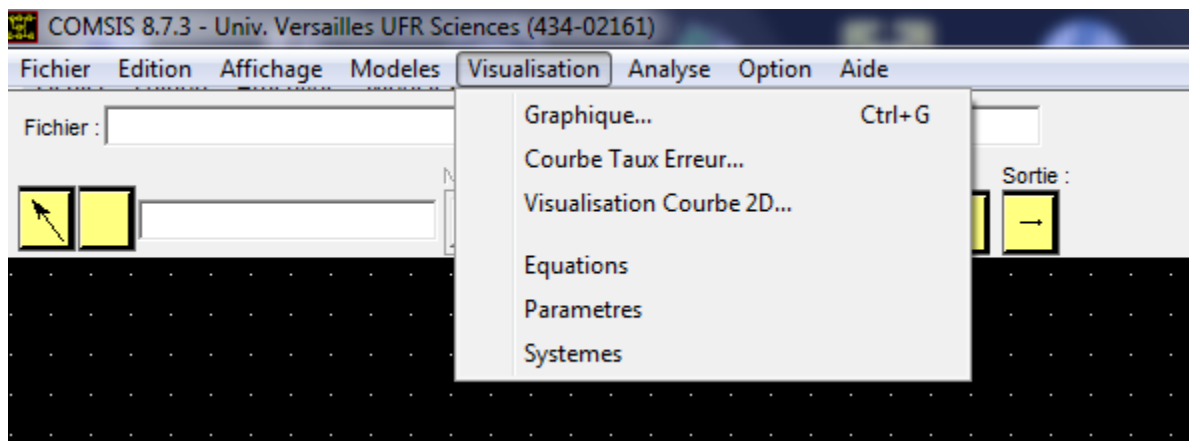


Figure.III.5.Menu visualisation de COMSIS.

- La partie simulation proprement dite est accessible par le menu Analyse. Nous utiliserons principalement pour l'étude des chaines de communication optiques, les options Analyse Statique et Analyse temporelle.

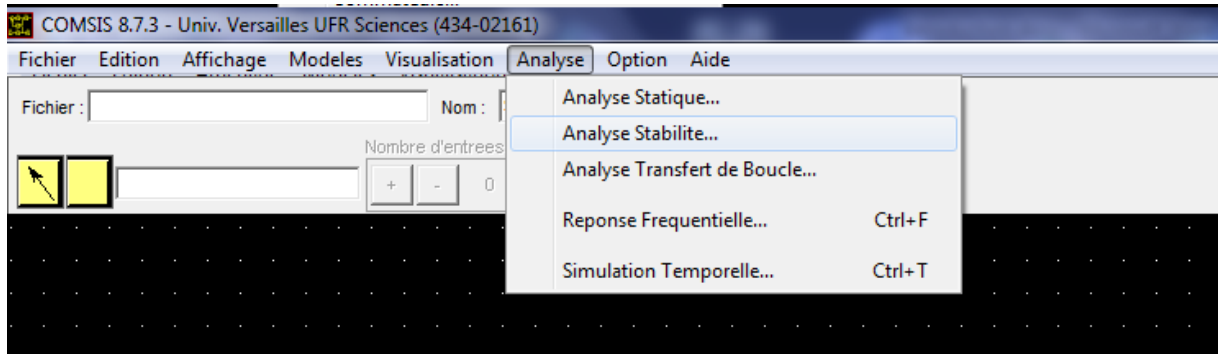


Figure.III.6.Menu Analyse de COMSIS.

- La visualisation des résultats s'effectue au moyen d'une fenêtre graphique contextuelle qui offre des possibilités de configurations graphiques assez complètes. Un traitement des courbes et des grandeurs visualisées est accessible par le menu Dialogue de la fenêtre graphique.

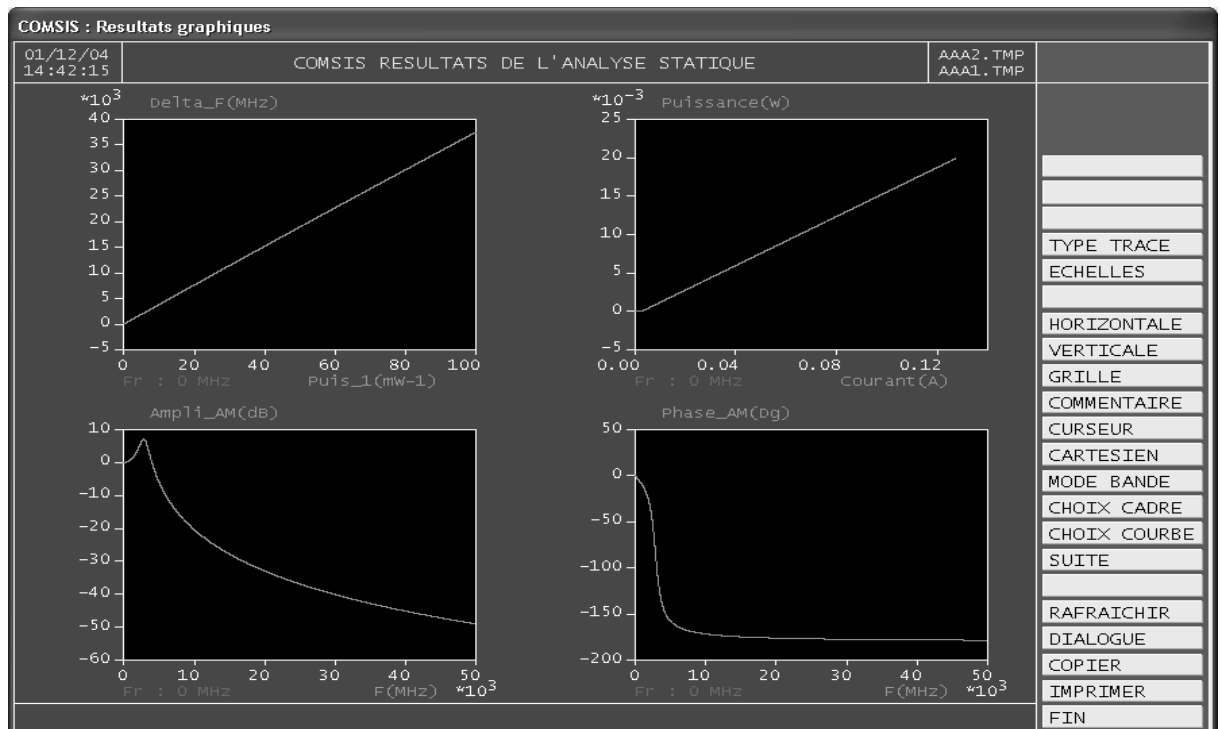


Figure.III.7.Menu résultat graphique de COMSIS.

- La fenêtre Evaluation des performances offre la possibilité de visualiser l'entrée, les variables intermédiaires et la sortie pendant la durée de simulation (Visualisation Globale) ou bien sur une fraction limitée de celle-ci (Visualisation Tronquée), etc.....

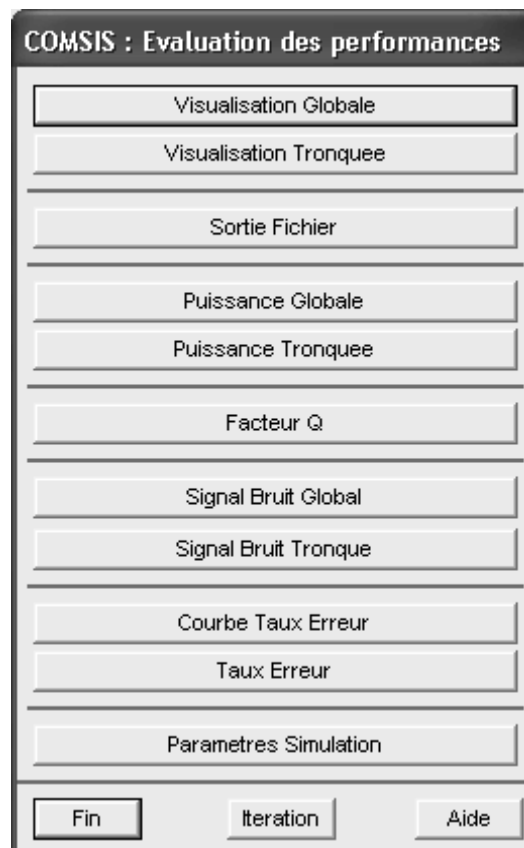


Figure.III.8. Menu Evaluation des performances.

- Lorsque l'un des choix est effectué, par exemple Visualisation Globale, la fenêtre Variable et pré-traitement à visualiser permet de choisir entre une visualisation temporelle simple de la variable sélectionnée (Réponse temporelle), sa fonction d'auto-corrélation, son diagramme de l'œil, sa puissance.....

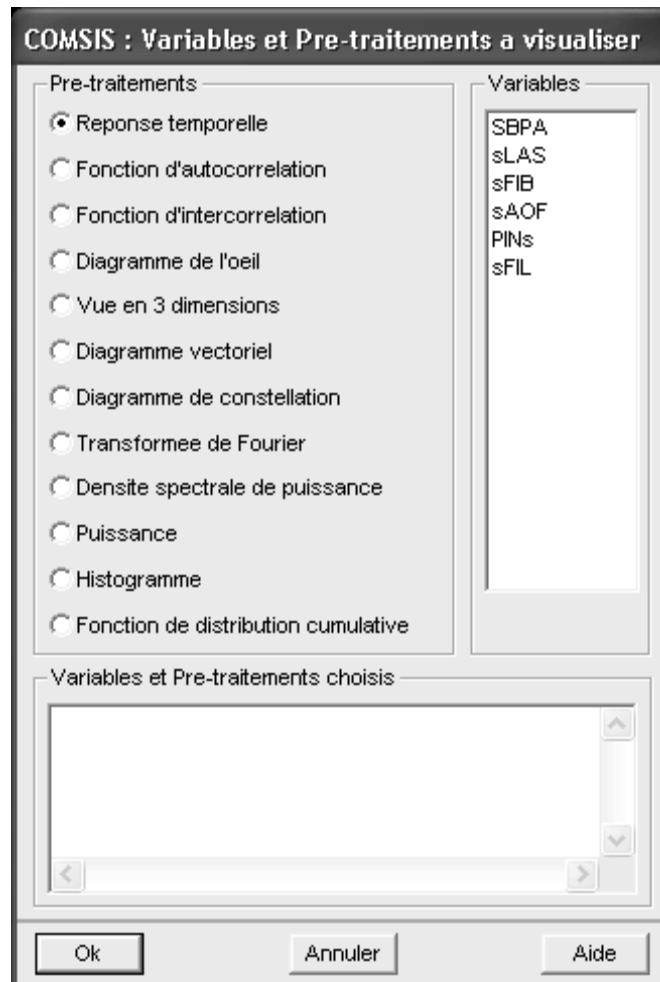


Figure .III.9. Menu Variables et Pré-traitement à visualiser.

II. Simulation d'une liaison optique WDM :

Le premier intérêt de du WDM est de permettre le transport de débits d'informations très importants sur une même fibre, à destination de plusieurs utilisateurs. On trouve aujourd'hui des systèmes à 4×10 Gbits/s, 4×2.5 Gbits/s. dans un futur proche, des systèmes à 40 Gbits/s par longueur d'onde seront installés. Mais le véritable point de départ du développement des systèmes de transmission WDM s'est fait lorsqu'il a été associé à l'amplification optique. En effet, l'apparition des amplificateurs à fibre dopée à l'erbium (EDFA) a permis l'amplification simultanée de l'ensemble des N canaux d'un multiplex, sans distorsion du signal utile. Envoyer N canaux dans une fibre optique plutôt que N fibres devenait un avantage économique indiscutable. Si, il y a encore peu de temps, l'espacement entre canaux était de l'ordre de 1 nm, le terme DWDM (Dense WDM) est maintenant utilisée. En effet, avec l'apparition, sur le marché, de lasers accordables de très bonne qualité, l'espacement entre les longueurs d'onde a pu être progressivement réduit, et est descendu à 0.8 nm ou 0.4 nm.

L'objectif principal de cette simulation est de simuler des exemples de liaisons optiques afin d'obtenir des liaisons qui répondent le mieux à nos besoins :

- Un grand rapport de signal sur bruit.
- Un grand facteur de qualité.
- Une puissance de réception acceptable.
- Un diagramme de l'œil de plus en plus ouvert.

Dans cette partie on va simuler les liaisons suivantes :

- ✓ Liaison WDM 4 * 2.5 Gbits/s.
- ✓ Liaison WDM 4*10 Gbits/s.

Après la simulation, on va faire des comparaisons entre les modèles simulés en se basant sur la qualité de réception (diagramme de l'œil, rapport S/B, facteur de qualité Q).

II.1. Simulation 1 : 4*10 Gbits/s :

Cette simulation porte sur une transmission de 4 signaux avec un débit de 10 Gbits/s à travers une fibre monomode (4 longueurs d'ondes à espacement de 0.8 nm entre elles) en utilisant une modulation externe d'intensité de la source laser et une détection directe par une photodiode.

II.1.1. Schéma de la liaison :

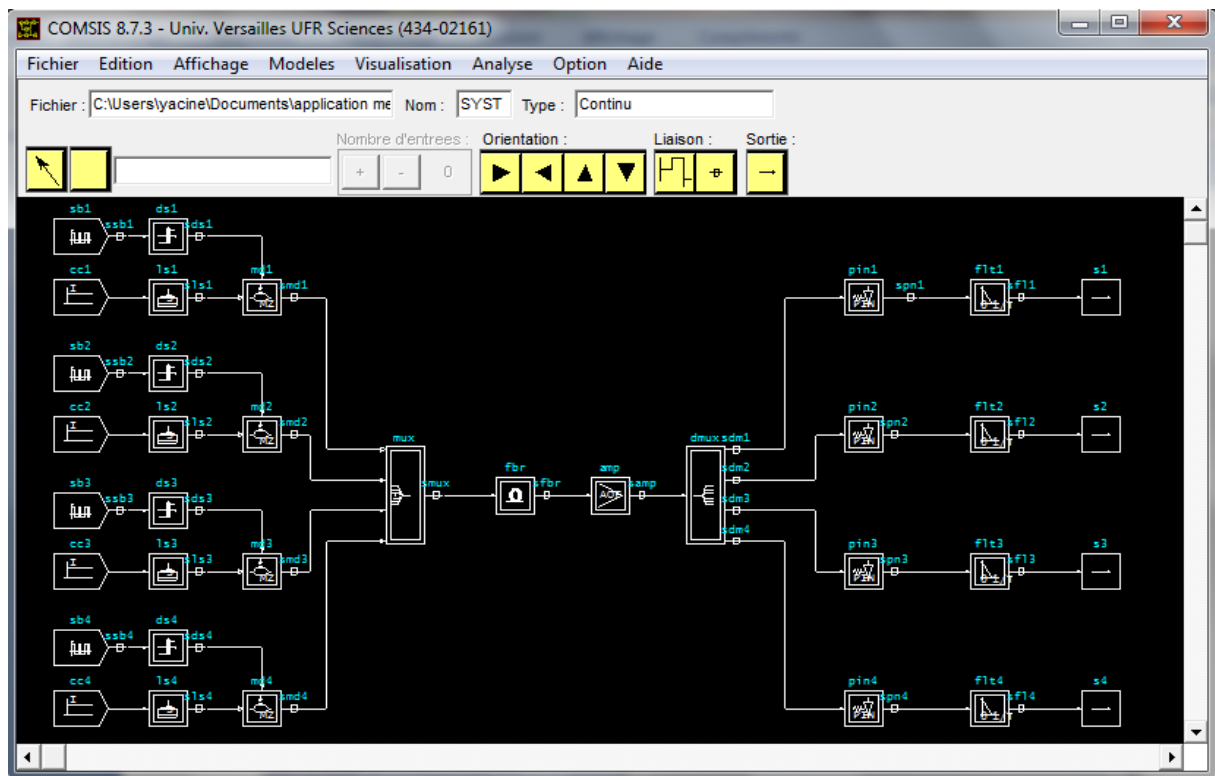


Figure.III.10.Schéma bloc de la liaison optique 4*10 Gbits/s.

II.1.2. Description des blocs fonctionnels de la liaison a 4*10 Gbits/s :

II.1.2.1. Bloc fonctionnel c c : Courant-continu :

- ✓ **Caractéristiques :**
- Valeur de courant (mA) :150.

II.1.2. 2. Bloc fonctionnel sb : Séquence Binaire Aléatoire :

Les séquences binaires aléatoires permettent de modéliser l'information désignant le message à transmettre. Elles sont formées de créneaux d'amplitude ± 1 de durée égale à l'inverse du débit et ont la propriété d'avoir des fonctions d'autocorrection de type impulsion.

- ✓ **Caractéristiques :**
- Débit binaire (Mbits/s) : 10000.
- Pourcentage de 1 de la séquence : 50.

II.1.2. 3. Bloc fonctionnel ds : Détection-Seuil :

- ✓ **Caractéristique :**
- Niveau bas de détection : -1.
- Niveau haut de détection : +1.
- Niveau bas de sortie : -4.
- Niveau haut de sortie : 0.

II.1.2. 4. Bloc fonctionnel ls : Laser-Système :

- ✓ **Caractéristique :**
- Longueur d'onde (nm) :1550.
- Courant de seuil (mA) :2.
- Rendement (dB) :0.9.
- Largeur de raie (MHz) : 5 pour 50 mA
- Taux d'amortissement (MHz) :4000
- Bande a -3dB (MHz) : 5000.

II.1.2. 5. Bloc fonctionnel mod : Modulateur Mach-Zehnder :

- ✓ **Caractéristique :**
- Tension d'offset (V) :10.
- Tension d'ouverture (V) :6.
- Taux d'extinction (dB) :10.
- Chirp : 6.
- Gain (ou perte) (dB) :8.

II.1.2. 6. Bloc fonctionnel mux/dmux : Mux/Démuux non polarisés :

- ✓ **Caractéristique :**
- Longueur d'onde centrale (nm) :1551.2.
- Espacement entre canaux (GHz) :100.
- Bande passante a -3dB (GHz) :40.
- Réflectivité : 0.95.
- Isolation du canal adjacent (dB) :60.
- Isolation des autres canaux (dB) :60.
- Pertes d'insertion totales (dB) :0.

II.1.2. 7. Bloc fonctionnel fibr : Fibre Optique Monomode :

- ✓ **Caractéristique :**
- Longueur (km) :100.
- Coefficient d'atténuation (dB) :0.18.
- Dispersion (ps /nm.km) :0
- Effet Kerr : non.
- Effet Raman : non.

II.1.2. 8. Bloc fonctionnel ampl : Amplificateur Optique :

- ✓ **Caractéristique :**
- Gain petit signal (dB) :30.
- Puissance de saturation (dBm) :9.
- Facteur de bruit (dB) :6.
- Longueur d'onde de mesure (nm) :1550.
- Retard (ns) :0.

II.1.2. 9. Bloc fonctionnel pin : Photodiode-Pin :

- ✓ **Caractéristique :**
- Sensibilité (A/W) :0.9.
- Courant d'obscurité (nA) :0.

II.1.2. 10. Bloc fonctionnel fil : Filtre-Cosinus-BF :

- ✓ **Caractéristique :**
- Bande passante a -3 dB (Mhz) :5000.
- Coefficient d'arrondi : 0.5.
- Retard (ms) :0.

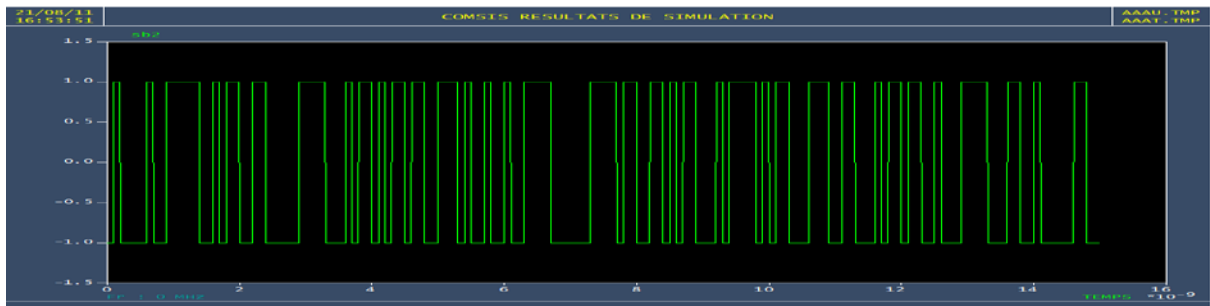
II.1.3. Résultat de la simulation :

II.1.3.1. Représentation temporelle :

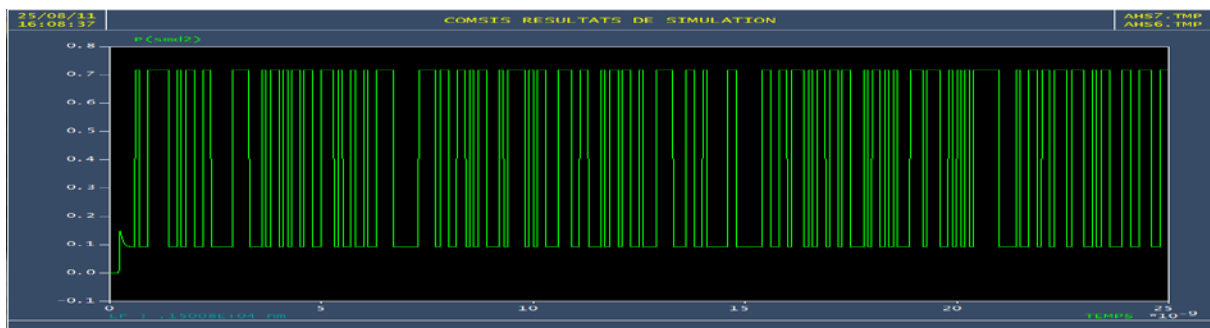
Cette représentation permet d'observer directement les variables simulées, sans prétraitement. L'abscisse des courbes est constituée d'une base de temps.

Représentation temporelle des signaux à la sortie de chaque bloc dz la chaine de transmission.

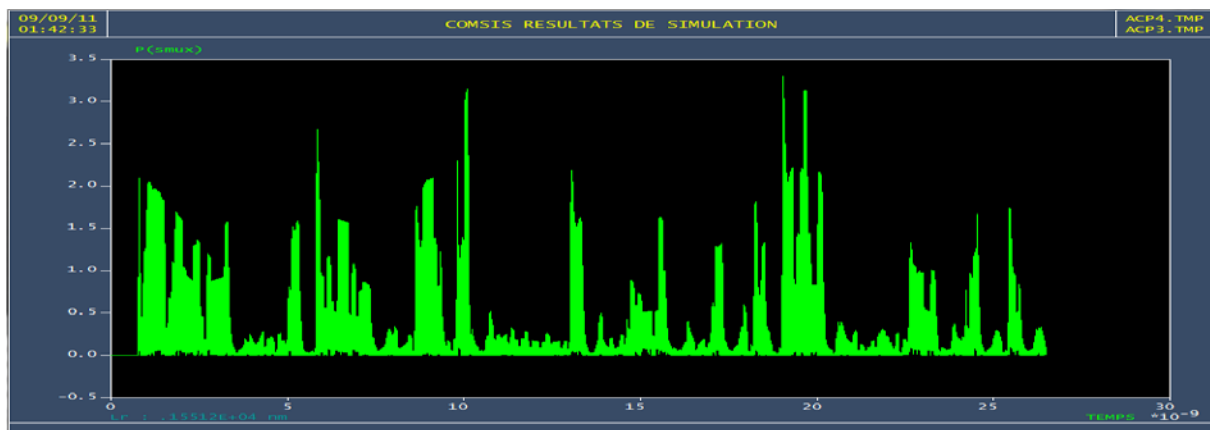
- ✓ Les séquences binaires à l'entrée de chaque canal de la liaison (sb2).



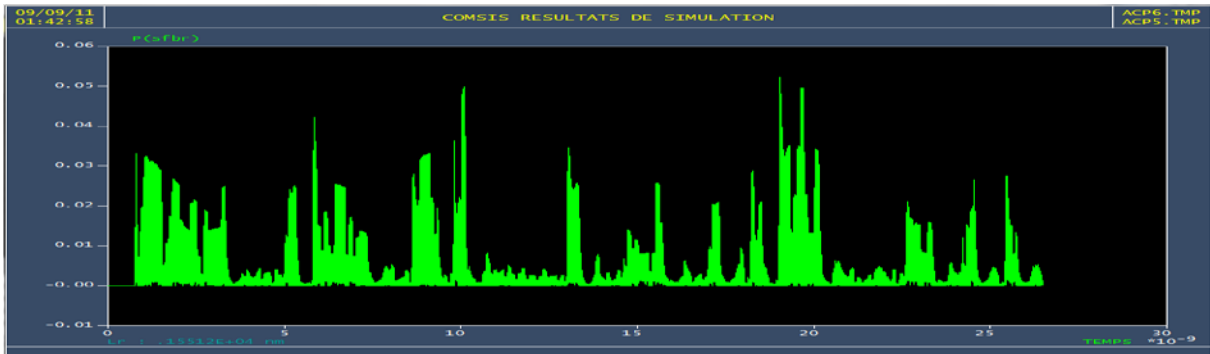
- ✓ Le signal à la sortie du modulateur (smd2) :



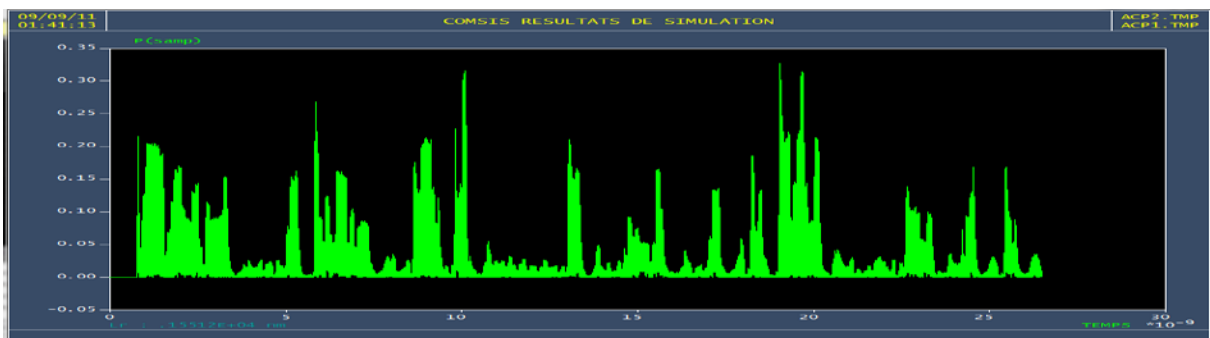
- ✓ Le signal à la sortie de multiplexeur (smux) :



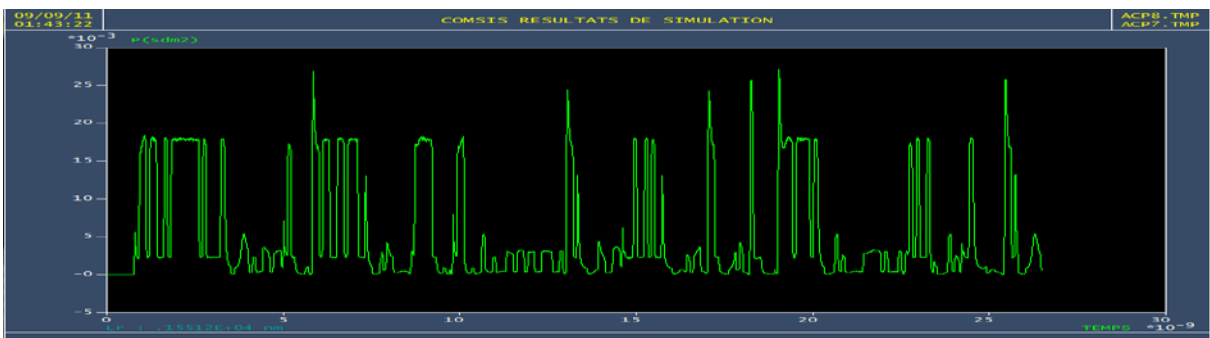
✓ Le signal à la sortie de la fibre :



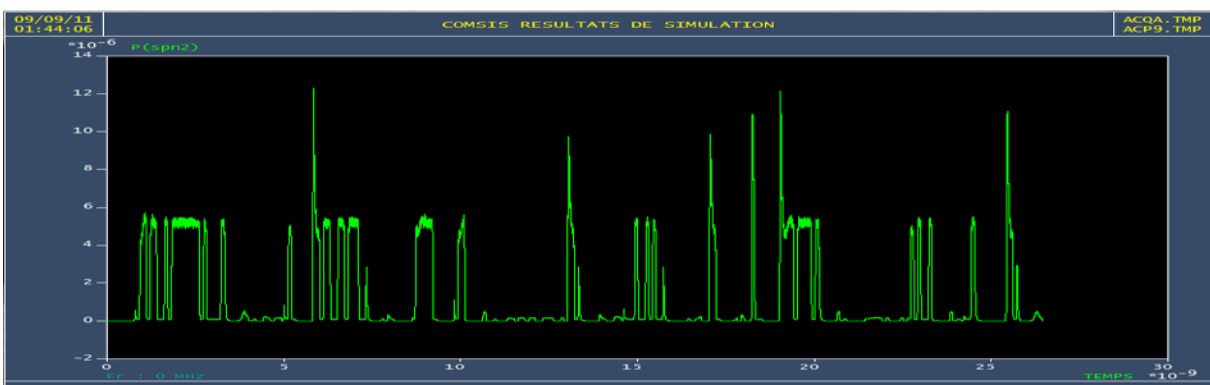
✓ Le signal à la sortie de l'amplificateur :



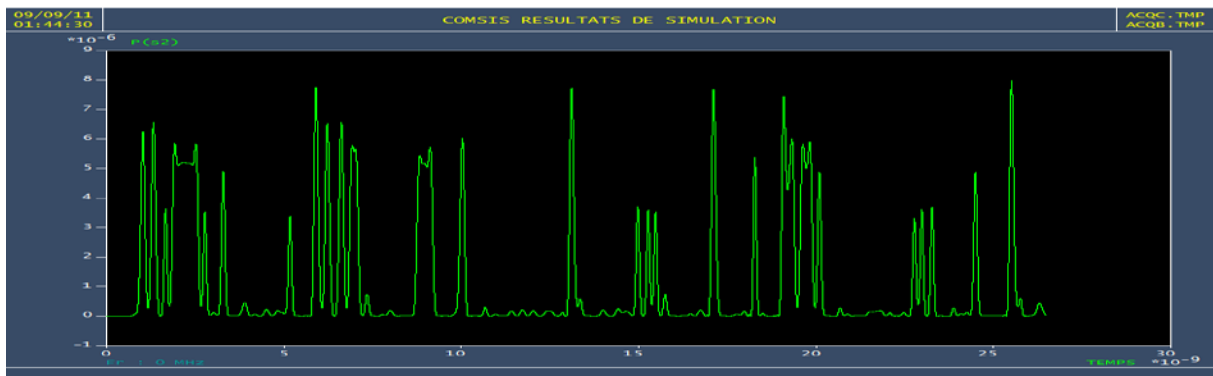
✓ Le signal à la sortie de démultiplexeur :



✓ le signal à sortie de la PIN (spn2) :

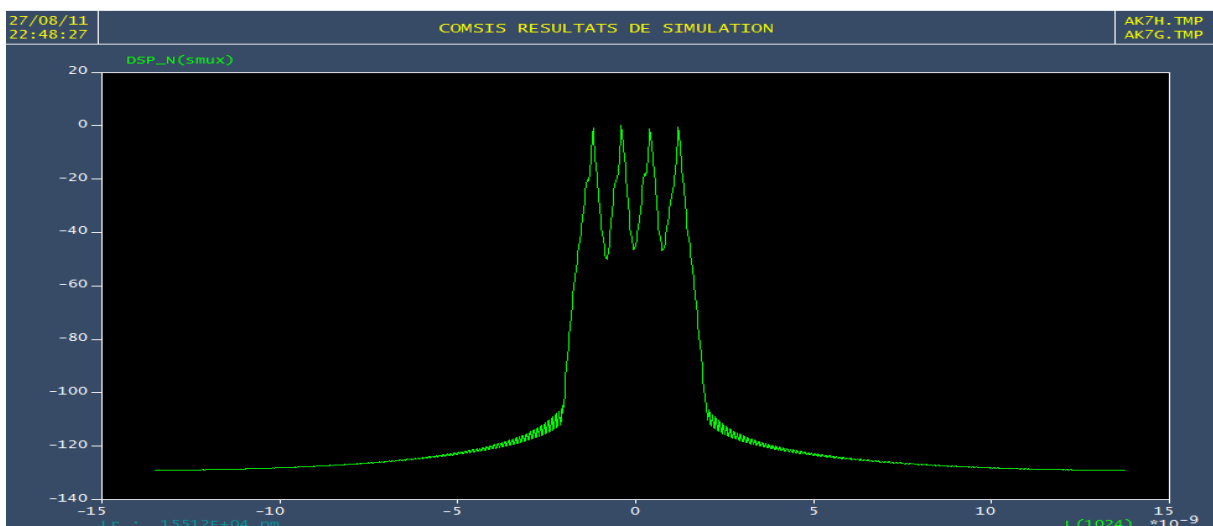


✓ le signal à la sortie de la liaison (s2) :

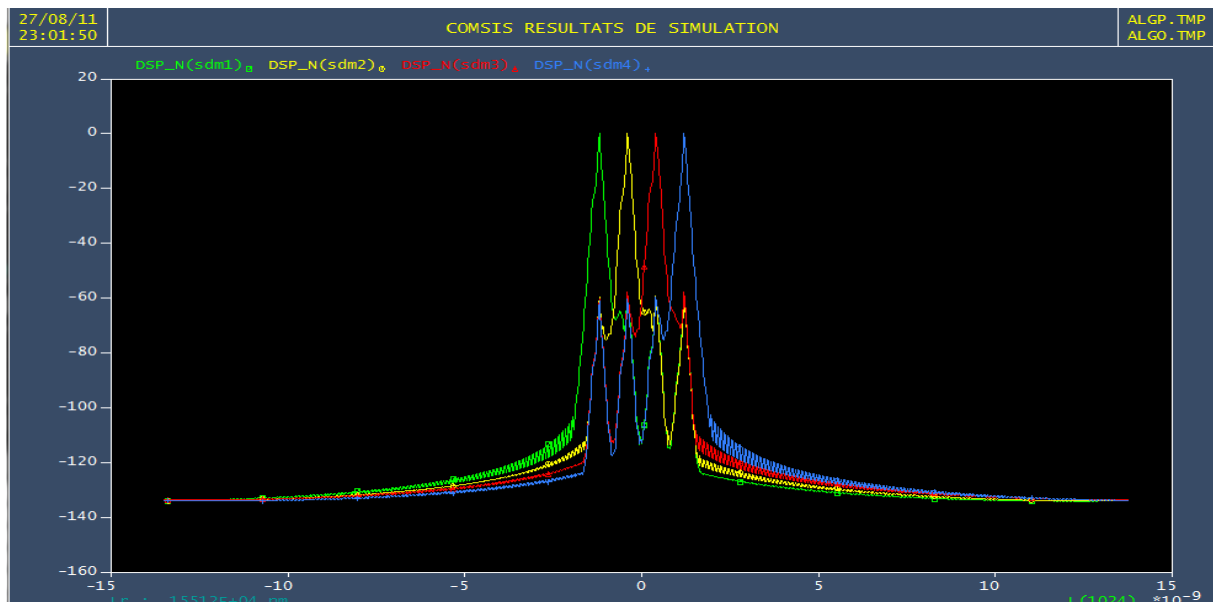


II.1.3.2. La densité spectrale de puissance :

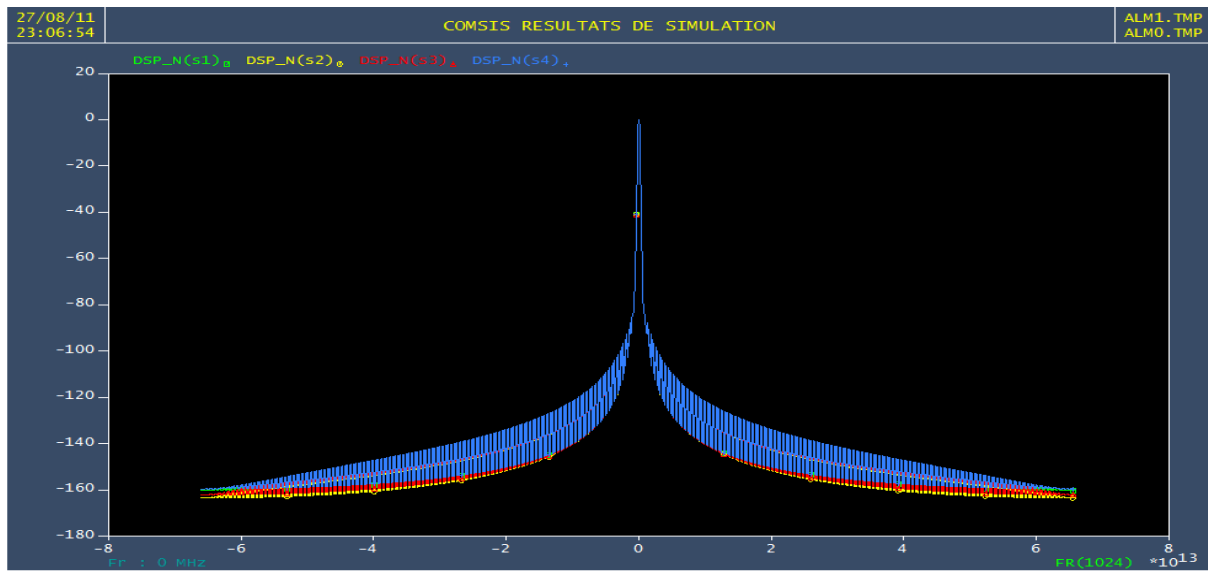
✓ La densité spectrale à la sortie de multiplexeur :



✓ La densité spectrale aux sorties de démultiplexeur :



✓ La densité spectrale aux sorties de la liaison :



II.1.3.3. Le diagramme de l'œil :

L'émission d'une suite aléatoire de symboles ($a_k ; k=1, m$) de durée T_m , conduit à la réception à un signal $x(t)$ qui est la somme des réponses du système à chacun de ces symboles a_k . Or, ces différentes réponses se perturbent mutuellement. La superposition graphique de tous les intervalles de temps T_m associés au signal $x(t)$ permet d'apprécier ces perturbations. Elles font apparaître des ouvertures en forme de losanges arrondis qui lui ont valu son nom « diagramme de l'œil ».

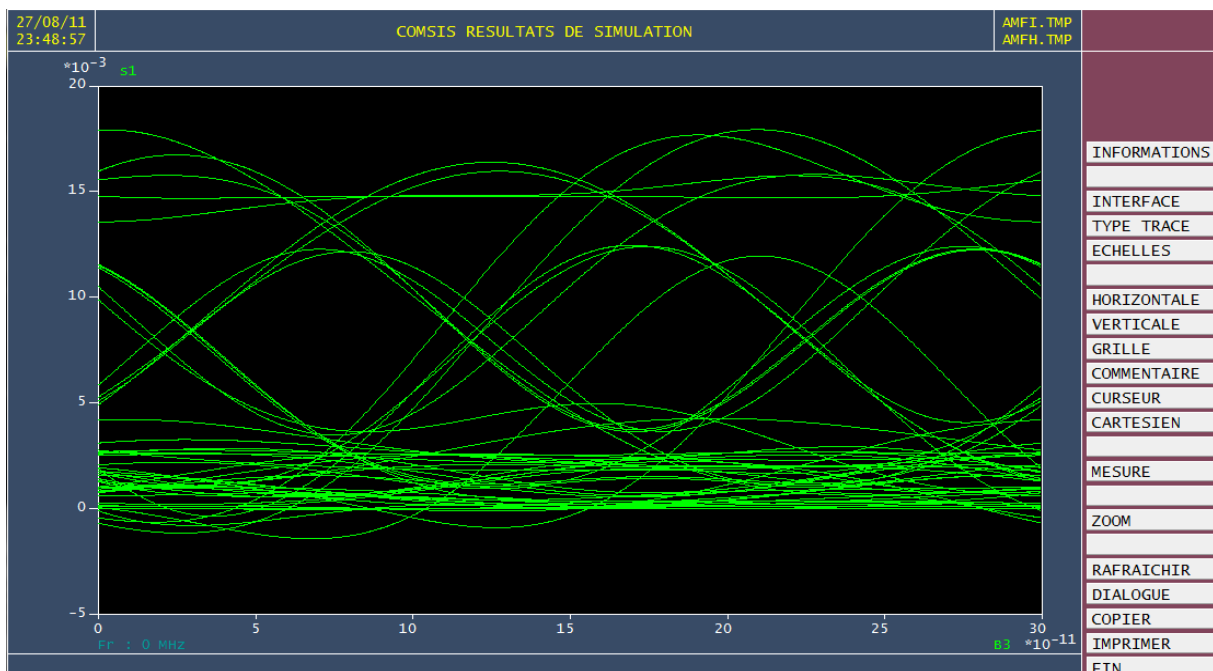


Figure.III.11. le diagramme de l'œil à la sortie de la liaison 4*10 Gbits/s.

II.1.4. Les mesures :

- Le rapport S/B :67.56.
- Lfacteur de qualité (Q) :1.75.

II.2. Simulation 2. 4*2.5 Gbits/s :

Cette simulation porte sur une transmission de 4 signaux à un débit de 2.5 Gbits/s a travers une fibre optique monomode (4 longueurs d'ondes à espacement de 0.8 nm entre elles).

II.2.1. Schémas de la liaison :

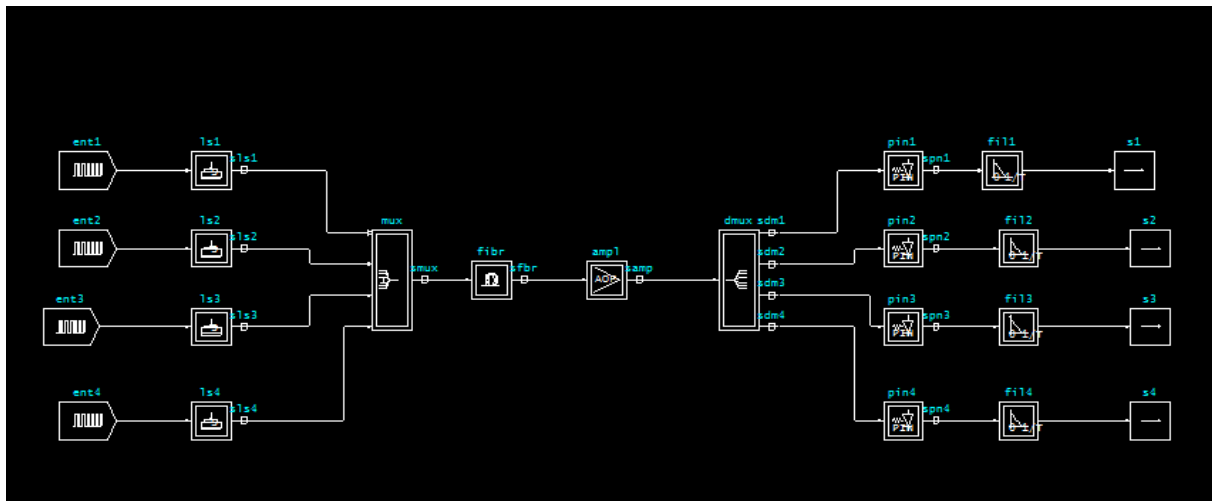


Figure.III.12. Schémas bloc de la liaison 4*2.5 Gbits/s.

II.2.2. Description des blocs fonctionnels de la liaison a 4*2.5 Gbits/s :

II.2.2.1. Bloc fonctionnel ent : Courant Laser :

- ✓ **Caractéristique :**
 - débit binaire (Mbits/s) : 2500.
 - longueur du registre : 8.
 - Courant minimum (mA) : 10.
 - Courant maximum (mA) : 45.

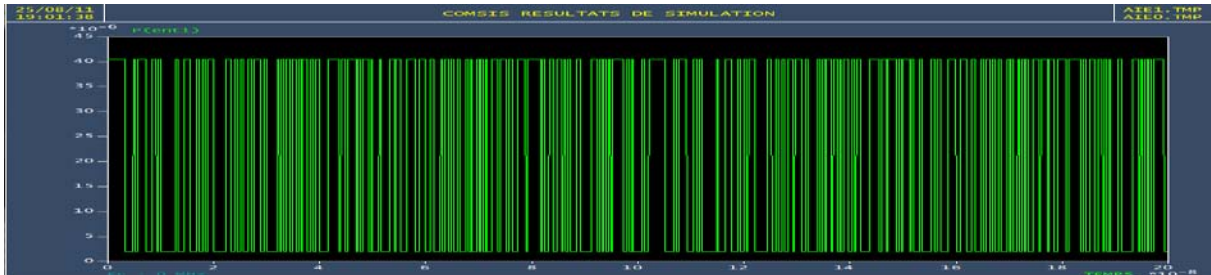
II.2.2.2. Autres bloc fonctionnel :

Les caractéristiques des autres blocs fonctionnels sont les même que celles de la liaison de 4*10 Gbits/s.

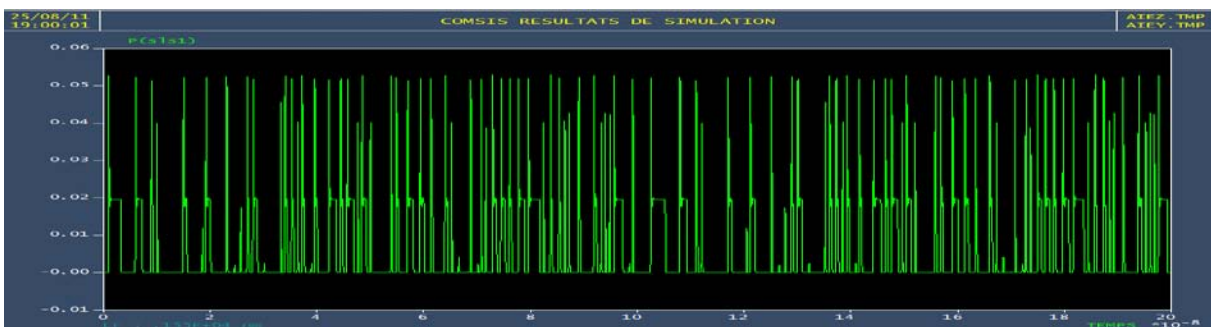
II.2.3. Résultat de la simulation :

ii.2.3.1. Les signaux de la liaison :

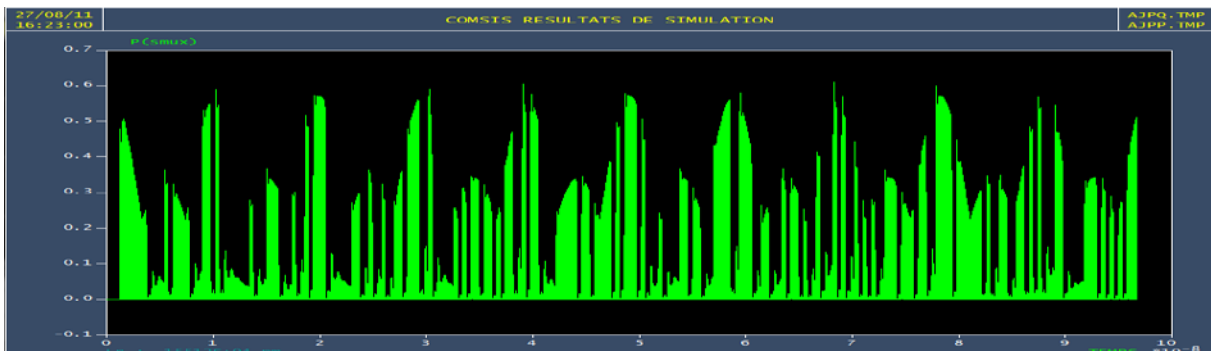
- ✓ Le signal à l'entrée de la liaison (ent1) :



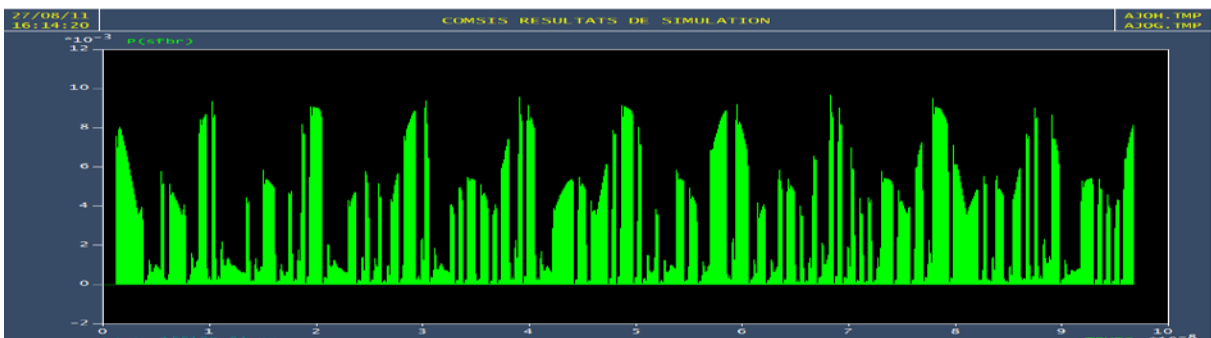
- ✓ Le signal à la sortie de laser (sls1) :



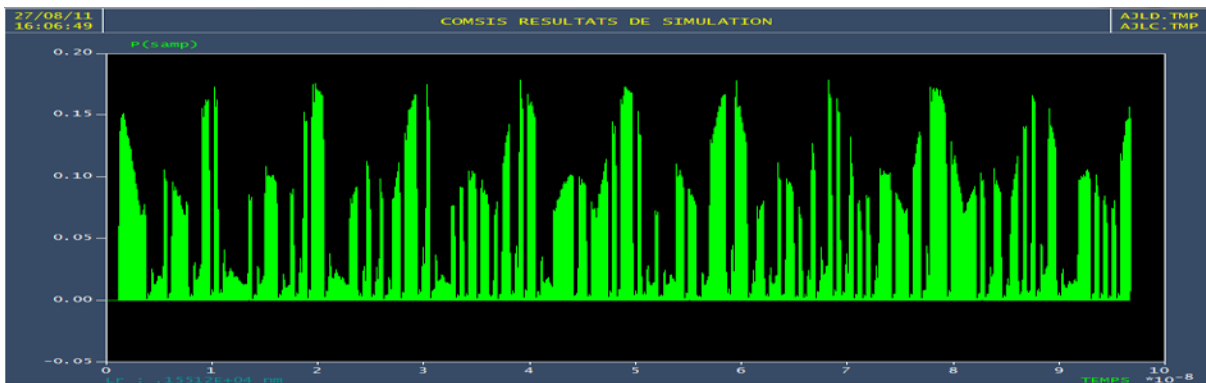
- ✓ Le signal à la sortie de multiplexeur (smux) :



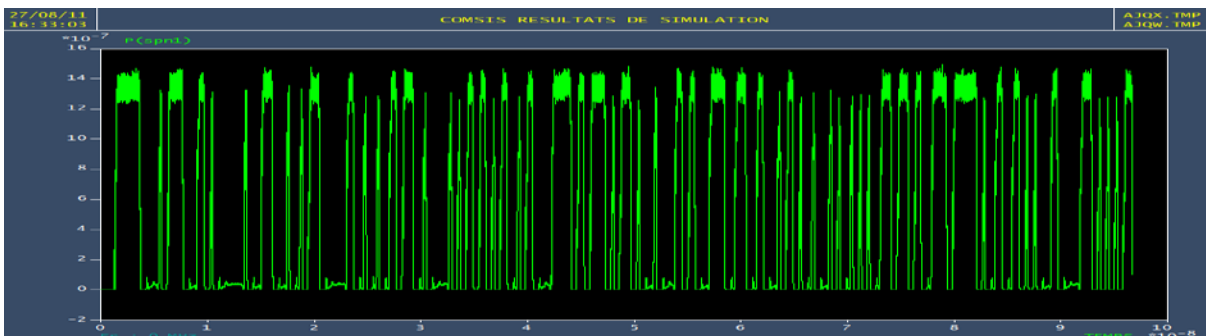
- ✓ Le signal à la sortie de la fibre (sfbr) :



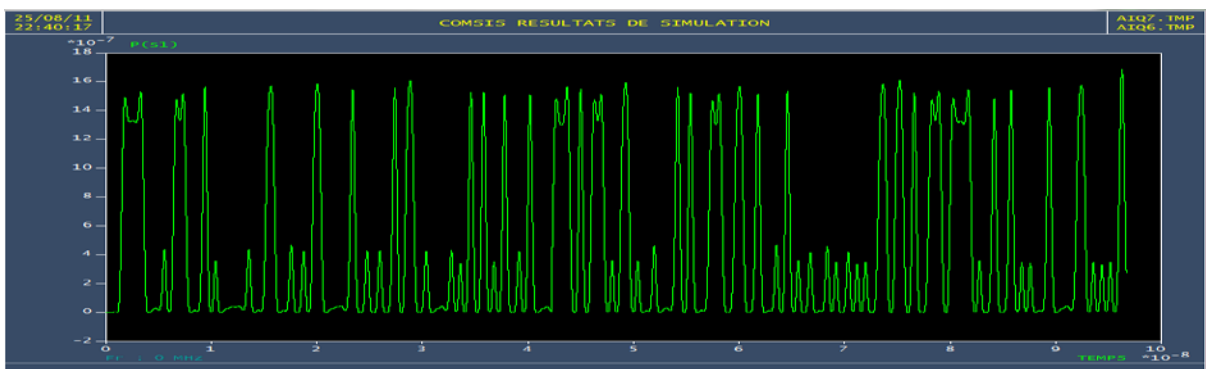
✓ Le signal à la sortie de l'amplificateur (somp) :



✓ Le signal à la sortie de la photodiode PIN (spn1) :

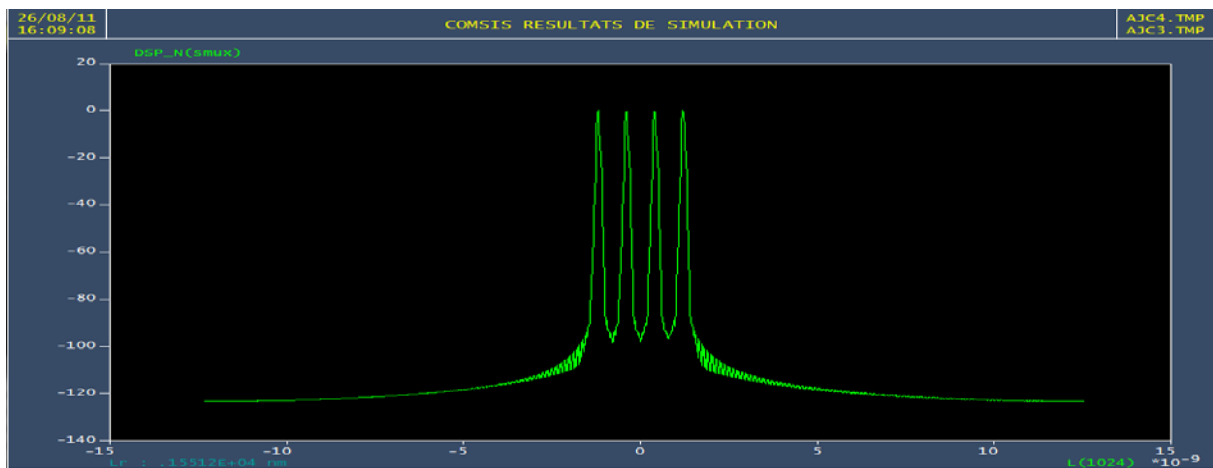


✓ Le signal à la sortie de la liaison (s1) :

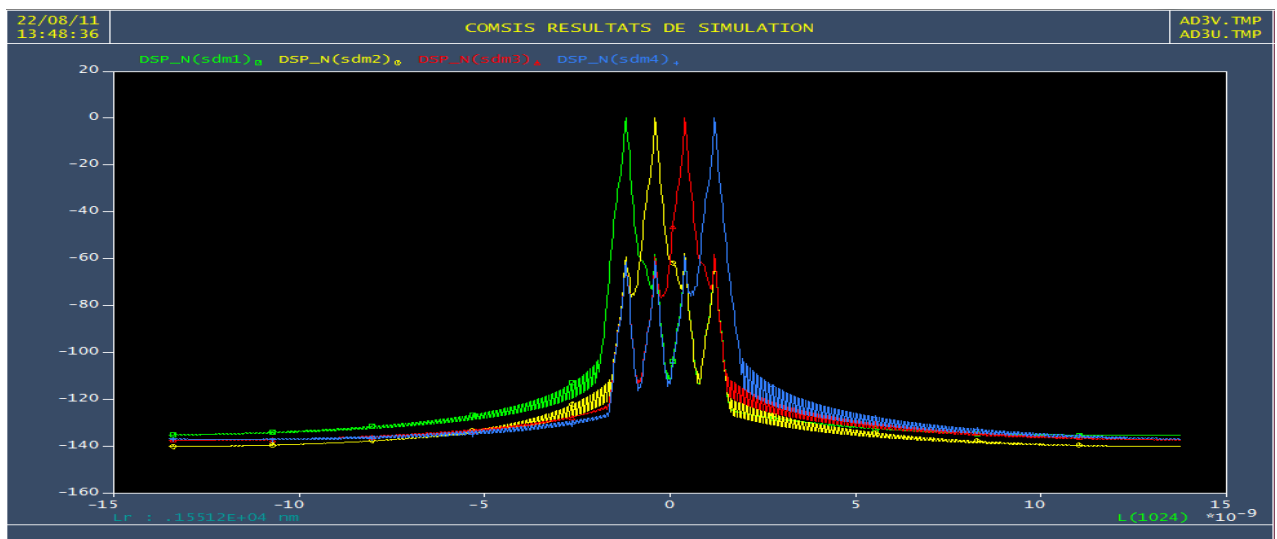


II.2.3.2. La densité spectrale de puissance :

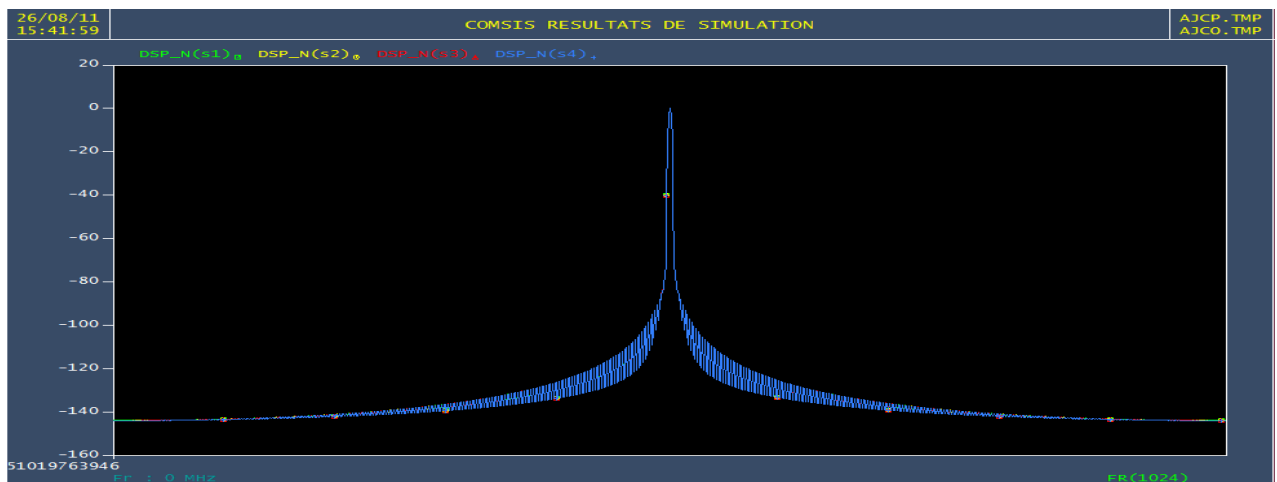
- ✓ La densité spectrale de puissance a la sortie de multiplexeur :



- ✓ La densité spectrale de puissance aux sorties de démultiplexeur :



- ✓ La densité spectrale de puissance aux sorties de la liaison :



II.2.3.3. Diagramme de l'œil :

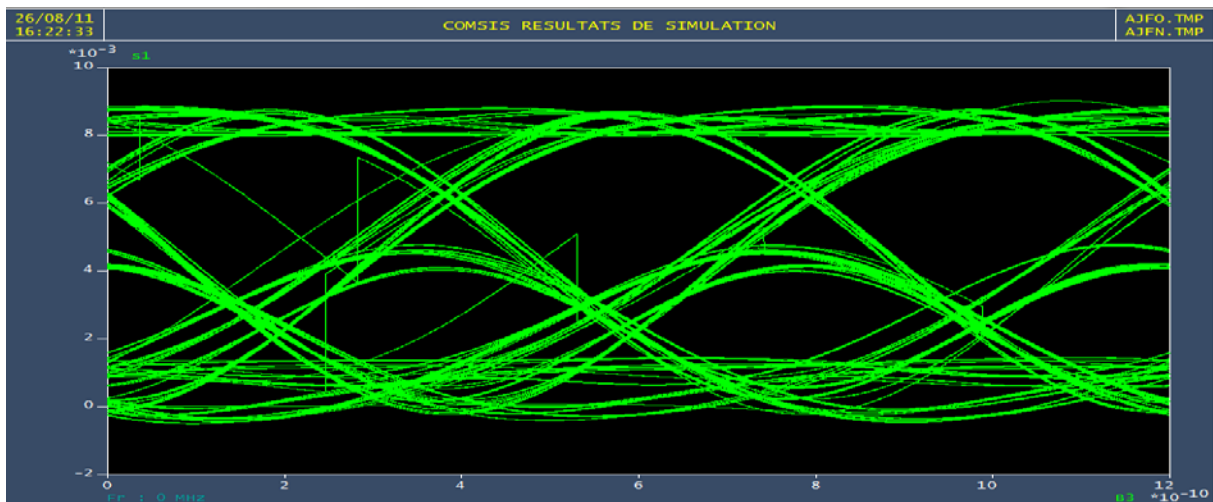


Figure.III.13. Le diagramme de l'œil à la sortie de la liaison 4*2.5 Gbits/s.

II.2.4. Les mesures :

- Le rapport signal sur bruit (S/B) :49.92 dB.
- Le facteur de qualité Q : 1.59.

II.3. Comparaison entre les modèles simulés :

système	Facteur Q	Rapport S/B	Diagramme de l'œil
4*10 Gbits/s	1.75	67.56 dB	
4*2.5 Gbits/s	1.59	49.92 dB	

III. Interprétation de résultats de la simulation :

COMSIS offre plusieurs possibilités pour mesurer la qualité d'un système de transmission de données. C'est pourquoi nous avons tracé le diagramme de l'œil afin d'évaluer qualitativement les performances de la liaison optique. Le diagramme de l'œil permet de spécifier les performances d'un système de transmission qu'il soit PDH, SDH ou WDM. Il présente le degré de discrimination des différents niveaux d'un signal par conséquent de bons renseignements sur l'immunité aux erreurs de la liaison.

Dans cette partie nous avons simulé deux liaisons optiques : 4*10 Gbits/s et 4*2.5 Gbits/s. les résultats de ces simulations sont représentés dans un premiers temps par une représentation temporelle qui permet de visualiser l'allure des signaux en divers points de la liaison optique ainsi que les transformations successives du signal durant son parcours dans la chaîne de transmission.

Dans un deuxième temps, nous avons évalué les performances des systèmes par des représentations fréquentielles et à l'aide du diagramme de l'œil. Il apparait nettement que les résultats obtenus pour la liaison 4*10 Gbits/s sont meilleurs par rapport à ceux obtenus pour la liaison 4*2.5 Gbits/s, ce qui montre que le système 4*10 Gbits/s est plus performant à cause de l'utilisation de la modulation externe ainsi que l'utilisation efficace de la bande passante de la fibre optique.

Conclusion :

Ce chapitre a présenté le logiciel de simulation COMSIS en détaillant ses fonctionnalités, et les critères de performances qu'il offre pour la conception des systèmes hauts débits.

Les résultats obtenus ont permis de valider le choix de système de transmission le plus performant qui le système 4*10 Gbits/s et généralement on peut dire que les systèmes N*10 Gbits/s sont meilleur que les systèmes N*2.5 Gbits/s.

Ce logiciel est un outil d'aide à la décision avant tout investissement pour l'acquisition et l'installation des systèmes de transmission optique.

Introduction :

Le multiplexage en longueur d'onde (WDM) est aujourd'hui la technologie la plus adaptée aux réseaux de communication optique, car elle permet une utilisation efficace de la bande passante offerte. Dans un réseau WDM, des faisceaux lasers de longueurs d'ondes différentes sont utilisés pour établir des canaux de communications fixes et à hauts débits entre des paires de nœuds du réseau. En l'absence de convertisseur en longueur d'onde, un canal optique doit utiliser la même longueur d'onde entre sa source et sa destination. Dans ce cas le réseau est dit tout-optique. Le problème qui se pose pour ce type de réseaux consiste à définir une route et une longueur d'onde pour chaque canal requis par une demande de connexion. Ce problème est appelé le problème de RWA (Routing and Wavelength Assignment). Pour résoudre ce problème nous, devons tenir compte d'une forte contrainte : deux chemins partageant le même lien ne doivent pas utiliser la même longueur d'onde. L'objectif de résolution de ce problème dépend du modèle de trafic considéré. Dans ce chapitre, nous définissons tout d'abord le problème RWA avant d'étudier les types de trafic qui peuvent exister. Ensuite, nous allons évoquer les méthodes et les algorithmes de résolution proposés pour résoudre ce problème.

I. Principes de routage dans les réseaux optiques WDM :

Les réseaux optiques fonctionnent pour la plupart en mode connecté : lorsqu'un émetteur veut se mettre en communication avec un récepteur, un chemin optique doit être assigné à la communication. Un chemin optique est décrit par la donnée d'une suite de fibres allant de l'émetteur au récepteur et de la longueur d'onde utilisée sur chaque fibre. Cet ensemble de donnée constitue le routage de la communication.

L'affectation des longueurs d'ondes doit satisfaire une contrainte forte : deux chemins optiques utilisant la même fibre ne peuvent être portés par la même longueur d'onde. Dans le cas contraire, les signaux se brouilleraient mutuellement et les informations qu'ils transportent seraient perdues.

Certains routeurs permettent de faire la conversion de longueurs d'ondes, c'est-à-dire permettent à un chemin qui rentre dans le nœud avec une certaine longueur d'onde d'en ressortir avec une autre. On peut distinguer deux types de schémas de conversion :

I.1. La conversion totale :

Un chemin utilisant une longueur d'onde quelconque en entrée peut ressortir avec n'importe quelle autre longueur d'onde (toujours sous contrainte qu'il n'y ait pas deux chemins utilisant la même longueur d'onde sur la même fibre).

I.2. La conversion partielle :

Une longueur d'onde particulière ne peut être convertie qu'en une longueur d'onde appartenant à un ensemble dépendant de la longueur d'onde de départ.

II. Les types des réseaux WDM :

En théorie, une fibre peut être parcourue dans les deux sens. En pratique toutefois, des contraintes technologiques dues au placement des équipements d'émission et de réception des nœuds, imposent des communications unidirectionnelles. Par ailleurs, le coût d'une fibre supplémentaire entre deux nœuds étant minime, les réseaux sont la pluparts de temps symétriques. Une simplification qui s'impose est de considérer des réseaux multifibres symétriques et que tous les liens composant le réseau ont le même nombre de fibres. Cette simplification reste proche de la réalité puisque les fibres sont regroupées dans des câbles de tailles standardisées. Un tel réseau est dit « k-fibres », ou k est le nombre de fibres par lien.

II.1. Réseaux Broadcast and Select :

La particularité de ce type de réseau est le fait que les nœuds sont tous complètement connectés. Chaque paquet d'information engendré par un nœud est reçu par tous les autres nœuds du réseau, qui peuvent l'écarté s'il ne leur est pas destiné. Les topologies physiques typiquement utilisées sont : l'anneau, le bus et l'étoile, qui représentent les topologies typiques des LANs. Les réseaux Broadcast and Select sont généralement conçus pour des LANs vu que l'intérêt de ces réseaux est mis en évidence pour des topologies ayant un grand nombre de nœuds. Dans ce type de réseau, chaque nœud est lié à une paire de fibres, l'une pour l'émission et l'autre pour la réception, et chaque fibre dispose de W longueurs d'ondes multiplexées avec la technique WDM. Le problème de ce type de réseau est lié au fait que tous les nœuds sont interconnectés et ceci augmente la probabilité de collisions. On parle de collision lorsque deux nœuds différents émettent sur la même longueur d'onde sur une même fibre.

II.2. Réseau Wavelength Routed :

Ces réseaux sont des réseaux maillés. Une longueur d'onde est attribuée à chaque paire de nœuds demandant une connexion ; Les longueurs d'ondes peuvent être utilisées par plusieurs demandes de connexions si les chemins assurant ces connexions ne partagent pas un même lien physique.

II.3. Evolution des réseaux optiques :

II.3.1. Les réseaux opaques :

Dans un réseau WDM opaque, le signal optique est régénéré au niveau de tous les nœuds intermédiaires du chemin optique. La régénération du signal optique consiste à l'amplifier et à le remettre en forme en éliminant le bruit. En effet, tous les nœuds du réseau sont dotés d'équipement de régénération optoélectronique. Cela implique qu'aucun signal ne peut traverser plus qu'un saut dans le domaine optique. On a affaire à une transmission point à point.

II.3.2. Les réseaux transparents :

Dans un réseau WDM transparent, les communications se font de bout en bout dans le domaine optique. Le signal transmis ne subit aucune conversion optoélectronique au niveau des nœuds. Cependant, la qualité du signal optique se dégrade au cours de sa transmission le long du chemin optique traversant des composants optiques, à cause des phénomènes physiques (dispersion, émission spontanée des amplificateurs, phase non linéaire, etc.).

Pour palier ces dégradations, la régénération du signal est nécessaire. Cette régénération peut se faire dans le domaine optique. Toutefois, les régénérateurs tout-optiques restent jusqu'à aujourd'hui très coûteux. Pour cette raison, la conception des réseaux WDM transparents de grandes dimensions restent difficile pour les prochaines années, et ce type de réseau se limite juste à des petits réseaux où les nœuds ne sont pas très éloignés géographiquement.

II.3.3. Les réseaux hybrides :

Un réseau WDM hybride se situe à mi-chemin entre un réseau opaque et un réseau transparent. L'intérêt de ce nouveau type de réseau réside dans la réduction du nombre des fonctions de conversions optoélectroniques et donc dans la réduction du cout total du réseau.

Par rapport à un réseau opaque dans lequel la régénération OEO est prévue en chaque nœud traversé, on effectue cette régénération seulement dans certains endroits lorsque cela est nécessaire.

II.4. Les algorithmes de routage et d'affectation de longueurs d'ondes (RWA) :

Le problème de routage et d'affectation de longueurs d'ondes (Routing and Wavelegths Assignment en anglais) est un problème crucial dans les réseaux WDM dans la mesure où il permet l'optimisation de l'utilisation des ressources. Etant données la topologie physique du réseau WDM et un ensemble de demandes de trafic, le problème du RWA consiste à allouer à

chaque demande de connexion un chemin optique et une longueur d'onde parmi les choix disponible, sans que deux chemins partageant un même lien n'aient la même longueur d'onde. En l'absence de convertisseurs de longueurs d'onde, chaque chemin doit garder la même longueur d'onde sur tous les liens qu'il utilise, cette contrainte s'appelle contrainte de continuité de longueur d'onde. Elle est relâchée dans le cas de présence de convertisseurs de longueurs d'ondes au niveau des nœuds du réseau. Les demandes de trafic sont généralement de deux catégories : des demandes statiques ou permanentes et des demandes dynamiques. Les demandes statiques sont des demandes permanentes entre un nœud source et un nœud destination. Le chemin et la longueur d'onde correspondants à une demande statique doivent être définis au préalable « off-line » et demeurent affectés à la demande en question. Cependant, pour une demande dynamique, la connexion n'est établie que par requête du nœud source, et les ressources restent réservées jusqu'à la fin de la connexion. La figure 1, présente une connexion statique entre deux nœuds A et B, les équipements du réseau (NE) sont constamment sollicités par la demande, alors que pour une connexion dynamique, ils ne sont sollicités qu'après la demande de connexion du nœud source comme le montre la figure 2.

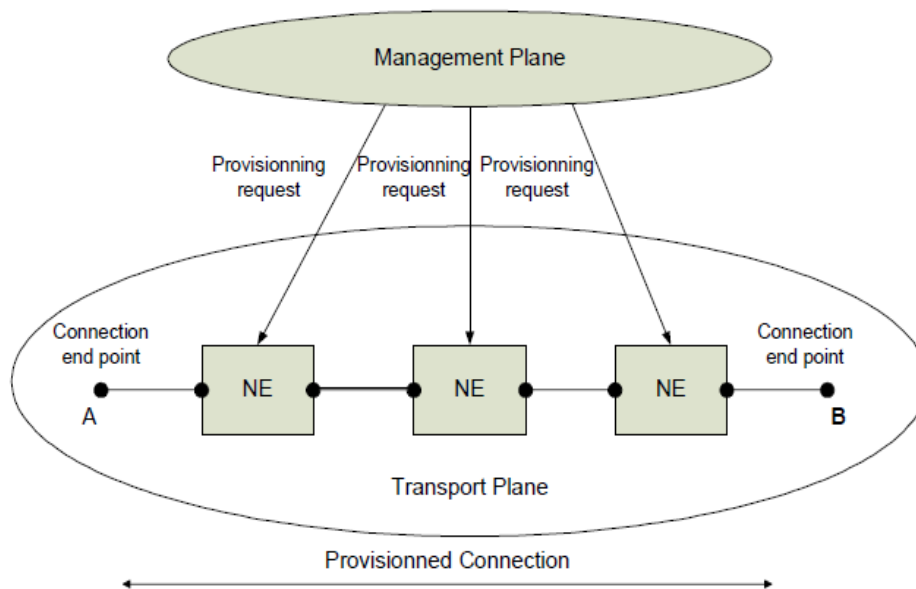


Figure. IV.1. Connexion permanente de bout en bout selon ITU-T G.807

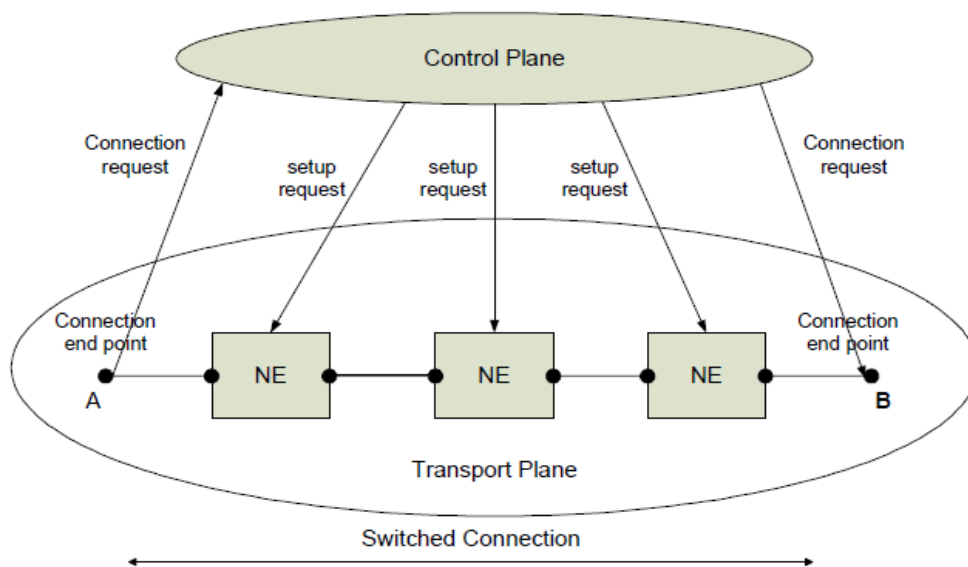


Figure. IV 2. Connexion commuté selon ITU-T G.807

II.4.1. Le routage :

Dans le cas des réseaux WDM, on appelle demande de communication un couple (émetteur, récepteur) qui doit être connecté par un chemin dans le réseau. Un ensemble de demandes de communication est appelé une instance de communication.

Réaliser une instance de communication consiste à trouver un routage c'est-à-dire un multi-ensemble de chemins reliant chaque demande de communication de l'instance et une affectation de longueur d'onde à ces chemins satisfaisant la contrainte des réseaux WDM dans le cas où le réseau ne contient pas des convertisseurs de longueurs d'ondes.

Le choix d'un algorithme de routage dépend notamment de la nature de trafic et du critère d'optimisation. Par exemple, si le critère d'optimisation consiste à minimiser le nombre de sauts, il est clair qu'un algorithme calculant les plus courts chemins entre chaque paire de nœuds comme l'algorithme de Dijkstra peut être utilisé. Dans un autre cas, si en revanche on a pour objectif de répartir la charge de trafic sur l'ensemble des liens du réseau, l'algorithme de Dijkstra n'est pas judicieux dans ce cas, et d'autres algorithmes doivent être envisagés. De nombreuses études ont traité le problème du RWA pour des demandes de trafic. Le problème RWA est présenté sous forme d'un problème linéaire à nombre entiers dont la complexité augmente exponentiellement avec les dimensions du système à étudier (nombre de nœuds du réseau, nombre de demandes de trafic,.....).

Pour des systèmes de grandes dimensions, des approches heuristiques doivent être utilisées.

II.4.2. Type de trafic :

II.4.2.1. Le trafic statique :

Ce modèle de trafic suppose que les demandes de connexions sont permanentes et connues à l'avance. Dans ce cas, le problème de RWA peut consister soit à établir les chemins requis par chaque demande en minimisant les ressources du réseau (comme le nombre de longueurs d'ondes disponibles par lien ou le nombre de fibres dans le réseau) ou bien chercher à établir le plus possible de demandes de connexions pour un nombre fixe de longueur d'onde disponibles par lien. Dans la littérature, le problème de RWA pour un modèle de trafic statique est reconnu par le problème de SLE (Statique Lightpath Establishment).

II.4.2.2. Le trafic incrémental :

Dans ce modèle, les demandes de connexion arrivent de façon séquentielle. Une fois tous les chemins optiques requis par une demande qui arrive sont établis, ces derniers restent indéfiniment dans le réseau.

II.4.2.3. Le trafic dynamique :

Dans ce modèle, les chemins requis par une demande de connexion qui arrive sont établis et seront relâchés après une période de temps finie.

Notons que l'objectif du problème de RWA dans le cas du modèle de trafic incrémental ou dynamique peut être soit d'établir les chemins optiques et d'affecter les longueurs d'ondes de façons à minimiser le taux de blocage des connexions (ou maximiser le nombre de connexions établies), ou bien de minimiser le nombre des connexions bloquées.

Au niveau de ces deux derniers types de trafic, l'objectif est d'assurer le maximum de connexions établies sur le réseau à un moment donné ou réduire au minimum le taux de blocage et de rejet des demandes de connexions. Ces problèmes sont connus sous le nom de DLE : Dynamic Lightpath Establishment.

Pour les problèmes SLE, qui sont des problèmes NP-complet, des algorithmes sont utilisés tandis que pour les problèmes DLE qui sont plus difficiles, généralement ce sont des méthodes heuristiques qui sont employées. Et la problématique, pour les deux, pourra être divisé en deux sous problèmes (qui vont être présentés dans la section suivante) :

1-Problème de routage.

2-Problème d'affectation de longueurs d'ondes.

II.4.3. Heuristique de routage :

Dans cette partie, nous allons présenter trois approches différentes pour traiter le problème de routage. Ces trois approches sont toutes fondées sur des algorithmes heuristiques.

II.4.3.1. Routage fixe :

Cette approche est la plus intuitive, la plus facile et la plus utilisée. On choisit tout simplement une route fixe pour chaque couple source et destination. Un exemple très connu et très important est le routage utilisant le critère de plus court chemin (Shortest Path), où l'on choisit le parcours physique le plus court entre le nœud source et le nœud destination, sans se soucier de l'état de la charge de trafic du réseau, c'est-à-dire sans considérer les chemins déjà établis. Les chemins sont calculés « off-line » par l'algorithme de Dijkstra.

L'avantage de cette méthode réside dans son extrême simplicité et sa grande vitesse d'exécution. Cependant cette méthode présente quelques inconvénients tels que sa grande probabilité de blocage. En effet, il est possible que plusieurs chemins établis pour des demandes distinctes partagent un même lien physique et ceci implique que tous ces chemins doivent utiliser des longueurs d'onde différentes ce qui n'est pas toujours possible vu le nombre de longueurs d'onde limité. Donc certaines demandes vont être rejetées.

II.4.3.2. Routage fixe alterné :

Cette approche est une amélioration de l'approche précédente. Le principe est le même sauf que dans le routage fixe alterné, on calcule plusieurs chemins possibles entre une source et une destination : les K-plus courts chemins. Lors du calcul d'un chemin entre deux nœuds, les K-plus courts chemins sont testés selon la disponibilité de leurs longueurs d'onde. Les K-plus courts chemins peuvent être traités du chemin le plus court au chemin le plus long, mais peuvent être aussi traités aléatoirement. Selon cet ordre de traitement, on cherche à trouver un chemin ayant une longueur d'onde libre.

Cette approche permet de réduire la probabilité de blocage par rapport à l'approche du routage fixe, car le routage d'une demande tient compte des chemins réservés pour les autres demandes. De plus cette approche offre un certain niveau de protection, car dans le cas d'une panne physique d'un lien, la demande peut toujours être routée sur un autre chemin n'utilisant pas le lien défaillant.

II.4.3.3. Routage adaptatif :

Le principe du routage adaptatif est de choisir dynamiquement un chemin entre deux nœuds, dans le sens où l'on analyse l'état du réseau avant de choisir un chemin et cherche à répartir le trafic sur l'ensemble des liens. Le concept d'état du réseau sous-entend l'implémentation d'un algorithme qui analyse et prend en compte tous les chemins déjà établis. L'algorithme le plus utilisé pour mettre en place ce type d'approche est le Shortest Cost Path. L'idée de cet algorithme est d'affecter à chaque lien un coût selon la charge de trafic qu'il supporte.

II.4.4. Algorithme de routage :

II.4.4.1. Modélisation :

La modélisation d'un réseau optique WDM en termes de graphes est très classique. Puisqu'on manipule des chemins et des longueurs d'ondes.

❖ Les graphes :

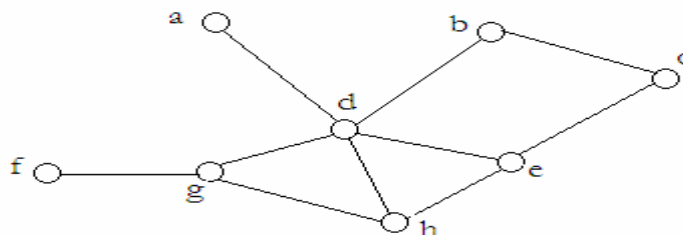
Un graphe est une représentation symbolique d'un réseau. Il s'agit d'une abstraction de la réalité de sorte à permettre sa modélisation. Principalement un graphe permet de décrire un ensemble d'objets et leurs relations, c'est-à-dire les liens entre les objets.

- ✓ Les objets sont appelés les nœuds, ou encore les sommets du graphe.
- ✓ Un lien entre deux objets est appelé une arête ou un arc.

Un graphe G est un couple (V, E) ou :

- V est un ensemble (fini) d'objets. Les éléments de V sont appelés les sommets du graphe.
- E est un sous-ensemble de $V \times V$. Les éléments de E sont appelés les arêtes du graphe.
- Une arête e du graphe relie deux sommets x et y . Les sommets x et y sont les extrémités de l'arête.

Un exemple de graphe à 8 sommets, nommés a à h , comportant 10 arêtes :



$G = (V, E)$

- $V = \{a, b, c, d, e, f, g, h\}$.
- $E = \{(a, b), (b, c), (b, d), (d, e), (e, c), (e, h), (h, d), (f, g), (d, g), (g, h)\}$.

Cette définition de graphe correspond au cas des graphes simples, pour lesquels il existe au plus une arête liant deux sommets. Dans le cas contraire le graphe est dit multiple.

II.4.4.2. Modélisation d'un réseau optique WDM :

Un réseau optique WDM est dit de câbles noté $G = (V, E)$ orienté, où V est l'ensemble des sommets et E est l'ensemble des arcs. Chaque nœud est représenté par un sommet, ainsi que chaque lien reliant deux nœuds est représenté par un arc. La capacité d'un arc e , $c(e)$, correspond au nombre K de fibres que contient le lien multiplié par le nombre de longueurs d'ondes W , $c(e) = K * W$.

II.4.4.3. Modélisation d'une instance de communication :

Une demande de communication sur le réseau optique WDM se représente par une paire de sommets. Ainsi, l'ensemble des demandes de communication, appelée instance de communication est modélisée par un graphe dit de requêtes.

Une instance de communication est un graphe $G_r = (V, E_r)$ orienté, où l'ensemble des sommets V est l'ensemble de paires de nœuds représentant une demande de communication et l'ensemble E_r représente l'ensemble des arcs nécessaires pour satisfaire toute les demandes de communication. La capacité d'un arc dit volume de la requête ou demande, correspond au volume de données à faire transiter de la source vers la destination de l'arc.

II.4.4.4. Modélisation du problème de routage :

Dans ce modèle du réseau optique, ainsi que d'instance de communication, le problème du routage optique se définit comme suit :

Entrée : Un graphe de liens G , un graphe de requêtes G_r et un nombre de longueurs d'onde W .

Sortie : Satisfaire le maximum de demande de communication en utilisant au plus W longueurs d'onde.

Il faut respecter l'objectif suivant, Minimiser :

- 1) La charge maximale allouée sur les arcs.

Ou

- 2) La somme des charges allouées sur les arcs.

II.4.5. Algorithmes de base pour la recherche de chemin :

Considérons un réseau optique $G = (V, E)$, où V est l'ensemble des nœuds du réseau et E l'ensemble des liens du réseau. On associe à chaque lien $e \in E$ un nombre $l(e) \in \mathbb{R}^+$ appelé longueur de lien. Si $e = (s, d)$, s et d appartient à V , on utilisera également la notion $l(s, d)$ pour la longueur de lien e . De même manière, on associe à chaque nœud $v \in V$ un nombre positif $c(v) \in \mathbb{R}^+$ correspondant au coût de chemin de la source au nœud v . La recherche de chemins particuliers a de nombreuses applications pratiques car la longueur $l(e)$ peut s'interpréter aussi bien comme le temps nécessaire pour parcourir le lien e , comme la longueur de ce lien....etc.

II.4.5.1. Algorithme de Dijkstra :

L'algorithme de Dijkstra recherche les plus courts chemins en termes de longueur sur les liens de la source (nœud donné en entrée de l'algorithme) aux autres sommets du réseau. Cet algorithme construit un arbre de nœud de coût minimum, les plus courts chemins de la source vers tous les autres nœuds du réseau se retrouvent en parcourant cet arbre. On note S l'ensemble des sommets dont la plus courte distance à la source est connue, et Q les autres.

On note aussi $dist(i)$ la plus courte distance de i à la source quand on passe uniquement par des sommets de S et $pred(i)$ désigne le prédécesseur de i dans un plus court chemin, ainsi que $succ(i)$ désigne l'ensemble des successeurs de nœud i . L'algorithme de Dijkstra est alors le suivant :

Algorithme 1 Algorithme de Dijkstra :

Dijkstra (source, destination)

Initialisation ;

Pour tous les sommets i de graphe G faire

$dist(i) = 0;$

$pred(i) = 0 ;$

Fin pour

$S = \emptyset;$

$Q = \{0, \dots, N-2\}; N: \text{nbre de nœuds.}$

$nœud = source$

Tant que $\{Q \neq \emptyset\}$ faire

$s = \text{min.dist}(Q);$

$S = S \cup \{s\};$

$Q = Q \setminus \{s\};$

$\text{pred}(s) = nœud ;$

$\text{dist}(s) = \text{dist}(nœud) + l(nœud, s);$

$nœud = s;$

Fin tant que

$P = destination;$

$nœud = destination ;$

Tant que $\{nœud \neq source\}$ faire

$P = P \cup \{\text{pred}(nœud)\};$

$nœud = \text{pred}(nœud);$

Fin tant que

Return $P;$

Avec $\text{min.dist}(s, Q)$

Renvoie le nœud le plus proche de $s \in Q \cup \text{succ}(s).$

II.4.5.2. Algorithme de la marche aléatoire :

Une marche aléatoire est un algorithme qui calcule aléatoirement un chemin entre une source et une destination, tous les deux en entrée de l'algorithme. L'aléatoire réside dans le fait que les nœuds successeurs sont choisis aléatoirement. Soit P un tableau de nœuds ayant

comme taille le nombre de nœuds du réseau, $succ(i)$ est l'ensemble des nœuds successeurs de i et $S(i)$ le nombre des nœuds successeurs de i .

Algorithme 2 Algorithme de la marche aléatoire :

marche. aléatoire (source, destination)

$P = \{source\}$;

$nœud = source$;

Tant que $\{nœud \neq destination\}$ *faire*

$n = \text{Randon}(1, S(nœud))$;

$nœud = \text{le } nœud \text{ successeur } n^* = n$;

$P = P \cup \{nœud\}$;

Fin tant que

Return P ;

II.4.5.3. Algorithme de plus long chemin :

L'algorithme de plus long chemin recherche le plus long chemin en termes de longueur sur les liens de la source aux autres nœuds du réseau. Cet algorithme construit un arbre de nœud de coût maximal, les plus longs chemins de la source vers tous les autres nœuds du réseau se retrouvent en parcourant cet arbre. On note S l'ensemble des sommets dont la plus longue distance à la source est connue, et Q les autres.

On note aussi $dist(i)$ la plus longue distance de i à la source quand on passe uniquement par des sommets de S et $pred(i)$ désigne le prédécesseur de i dans un plus long chemin et $succ(i)$ son successeur. L'algorithme du plus long chemin est alors le suivant :

Algorithme 3 Algorithme de la marche aléatoire :

Plus. Long. Chemin (source, destination)

Initialisation ;

Pour tous les sommets i *de graphe* G *faire*

$dist(i) = 0$;

$pred(i) = 0$;

Fin pour

$S = \emptyset$;

$Q = \{0, \dots, N-2\}$; N : nbre des nœuds.

$nœud = source$

Tant que $\{Q \neq \emptyset\}$ *faire*

$s = \max. dist (nœud)$;

$S = S \cup \{s\}$;

$Q = Q \cup \{s\}$;

$pred (s) = nœud$;

$dist (s) = dist (nœud) + l (nœud)$;

$nœud = s$;

Fin tant que

$P = destination$;

$nœud = destination$;

Tant que $\{nœud \neq source\}$ *faire*

$P = P \cup \{pred (nœud)\}$;

$nœud = pred (nœud)$;

Fin tant que

Return P ;

Avec $\max. dist(s, Q)$

Renvoie le nœud le plus loin de $s \in Q \cup succ(s)$.

II.4.6. Affectation de longueurs d'onde :

Les longueurs d'onde représentent une source précieuse, et leur nombre est limité, c'est pour cette raison qu'on cherche à optimiser l'affectation de longueurs d'onde de manière à

minimiser leur nombre. Le problème d'affectation de longueurs d'onde (Wavelegth Assignement, WA), est étroitement lié au problème de routage.

Etant donné la topologie physique du réseau est l'ensemble des chemins établis par le routage, le problème de WA consiste à allouer à chaque chemin une longueur d'onde de manière à ce que deux chemins partageant un même lien n'aient pas la même longueur d'onde.

II.4.6.1. Affectation statique de longueurs d'onde :

Comme il a été dit précédemment, les demandes de connexions sont connues à l'avance et les opérations de routage et d'attribution de longueur d'onde sont exécutées en mode « OFF-LINE » (avant l'arrivée des demandes). Généralement, l'objectif d'un tel problème est de minimiser le nombre de ressources (L.O) nécessaires pour la mise en place d'un ensemble de connexions sur une topologie physique bien définie. Un autre objectif peut être la maximisation de nombres de demandes de connexions acceptées, ainsi les solutions auront tendance à établir des connexions plus courtes traversant un nombre réduit de liens optiques.

Etant donné un ensemble de demandes de connexions, une topologie du réseau physique et un ensemble de longueurs d'onde disponibles. Un chemin est choisi pour chaque demande de connexion, ainsi le nombre de connexions traversant un lien physique définit la congestion sur ce lien. Il est à noter que les longueurs d'onde doivent être attribuées de telle façon que deux connexions qui partagent le même lien physique ne partagent jamais la même longueur d'onde.

II.4.6.2. Affectation dynamique de longueurs d'onde :

II.4.6.2.1. Algorithme Random Fit :

Cet algorithme recherche d'abord l'espace des longueurs d'onde pour déterminer l'ensemble de toutes les longueurs d'onde qui sont disponibles sur l'itinéraire exigé. Parmi les longueurs d'onde disponibles, une est choisie aléatoirement (habituellement avec une probabilité uniforme).

II.4.6.2.2. Algorithme First-Fit :

Dans cet algorithme, on affecte un poids pour chaque longueur d'onde. En recherchant des longueurs d'onde disponibles, la longueur d'onde possédant le poids le plus faible, est affectée avant les autres longueurs d'onde. La première longueur d'onde disponible est alors choisie. Cet arrangement n'exige aucune information globale sur l'état du réseau. Comparé à l'attribution aléatoire de longueurs d'onde, le coût de calcul de cet algorithme est inférieur parce qu'il n'y a aucun besoin de rechercher l'espace entier de longueurs d'onde pour chaque itinéraire. L'idée de cet arrangement est d'utiliser toutes les longueurs d'onde ayant un poids

faible dans l'espace de longueurs d'onde de sorte que les plus longues voies d'accès aient les longueurs d'ondes de poids le plus élevé. Cet arrangement est bien favori en termes de probabilité de blocage, et est préféré dans la pratique en raison de son petit temps de calcul et sa simplicité.

II.4.6.2.3. Algorithme Least-Used :

Avec l'algorithme Least Used l'affectation de longueur d'onde pour un chemin se fait selon le degré d'utilisation de cette longueur d'onde. Les longueurs d'onde les moins utilisées ont la priorité d'être affectées. Ceci implique la connaissance de l'état global du réseau et de l'ensemble des chemins établis et de leurs longueurs d'onde correspondantes, ce qui augmente la complexité de l'algorithme. D'autre part, il n'apporte pas vraiment des améliorations en termes de probabilité de blocage par rapport au First Fit et c'est pour ces raisons qu'il est rarement utilisé dans la pratique.

II.4.6.2.4. Algorithme Most-Used :

Cette solution est le dual de l'algorithme Least Used. Comme dans l'approche précédente, on commence à rechercher les longueurs d'onde déjà utilisées dans le réseau. Sauf que dans ce cas la longueur d'onde la plus utilisée est affectée. En effet, on cherche à réutiliser au maximum les longueurs d'onde déjà utilisées. Les performances de cette approche sont comparables avec celles du First Fit, alors que son coût en termes de complexité et de temps de calcul est énorme, par ce qu'elle nécessite, tout comme pour le Least Used, une connaissance de l'état global du réseau.

II.4.6.2.5. Algorithme Min-Product :

Cette approche est similaire à celle du First Fit mais la différence réside dans la nature du réseau d'application : MP est utilisé dans les réseaux multifibres tandis que FF est utilisé dans les réseaux à fibre unique.

II.4.6.2.6. Algorithme Max-Sum :

Proposé pour les réseaux multifibres mais peut être appliqué aux réseaux mono-fibre. MS considère tous les chemins possibles (les connexions avec leurs chemins présélectionnés) sur le réseau et essaye de maximiser la capacité restante sur le chemin après l'établissement d'une connexion. Cette heuristique assume que la matrice du trafic est connue à l'avance, et que la route pour chaque connexion est présélectionnée.

II.4.6.2.7. Algorithme Relative Capacity Loss : (Meilleure performance /Implémentation couteuse).

Basé sur le MS (MS peut être vu comme une approche permettant la minimisation de la capacité perdue sur les chemins optiques), RCL est lancé à l'observation que la minimisation de la capacité totale perdue ne mène pas au meilleur choix, ainsi cette approche calcule la capacité relative pour chaque chemin sur chaque longueur d'onde disponible et choisit alors la longueur d'onde qui minimise la somme des pertes de capacité sur tous les chemins.

Toutes les heuristiques présentées précédemment ont généralement pour objectif de minimiser le taux de rejet de connexions. Cependant, en considérant que les connexions nécessitant de longs chemins ont une plus grande probabilité de rejet alors d'autres schémas ont été proposés pour essayer de protéger les chemins assez longs. Ces approches sont :

- **Wavelength Reservation.**
- **Protecting Threshold.**

Contrairement aux autres approches, ces 2 schémas :

- ✓ Ne spécifient pas la longueur d'onde à choisir, mais spécifient si une demande de connexion peut avoir une longueur d'onde ou non en se basant sur l'instance courante de l'utilisation des longueurs d'onde sur le réseau.
- ✓ Ne peuvent pas fonctionner seules et elles doivent être combinées avec d'autres approches d'attribution de longueurs d'onde.
- ✓ Leur objectif primordial est de protéger seulement les connexions traversant un nombre assez grand de liens (des chemins longs).

II.5. Optimisation des réseaux optiques WDM k-fibres :

Les réseaux optiques sont sujet d'un grand nombre d'études dont certaines se sont penchées principalement sur des aspects techniques. Cependant, dès que, motivées par l'important coût d'installation de ces réseaux, des questions de dimensionnement se sont posées, une modélisation en termes de graphes a été nécessaire. De nombreux résultats existent, qu'il s'agisse de l'étude du routage dans des réseaux particuliers, ou d'instances structurées, ou encore d'ordonnancement de communications.

Cependant, la réalité technologique ne correspond pas à ce modèle simplifié où, entre deux nœuds physiquement connectés, on considère qu'il n'y a qu'une seule fibre, mais capable de guider un nombre quelconque de longueurs d'ondes. En effet, le coût prépondérant de l'installation d'un réseau optique est dû à la pose de câble. Dès lors, les opérateurs préfèrent poser des faisceaux de plusieurs fibres. De plus, la technologie actuelle fournit des

fibres capables d'acheminer un nombre fixe de longueurs d'onde. Il est donc essentiel de faire évoluer le modèle et de considérer des réseaux multi-fibres.

Le problème des réseaux multi-fibres est, lui, étudié depuis peu. Il a été montré que l'augmentation du nombre de fibres par lien simplifie parfois considérablement le routage optique : $\forall k, m$, il existe un réseau et une requête de connexion dont la réalisation nécessite m longueurs d'ondes (que nous appellerons couleur dans la suite) avec k fibre par lien, mais n'en prend plus qu'une seule avec $k+1$ fibre. De même, le routage optique d'une étoile non orientée est NP-difficile lorsqu'il n'y a qu'une fibre mais est polynomial lorsqu'il y en a deux. Toutefois il est faux que l'augmentation du nombre de fibres sur chaque lien du réseau diminue toujours le nombre de couleurs (longueurs d'onde) nécessaires.

II.5.1. Réseaux WDM k -fibres et hypergraphes :

Soit \mathcal{R} un réseau k -fibres. Une instance de communication I sur \mathcal{R} est une famille de couples de nœuds de \mathcal{R} qui doivent être connectés par un chemin. Un routage $R(I)$ est une famille de chemins dans \mathcal{R} réalisant I : pour tout couple (a, b) dans I , il y a un chemin allant de a vers b .

On définit le graphe des conflits de chemins dans un réseau mono-fibre comme le graphe qui a un sommet par chemin dans le réseau et un lien entre deux sommets si les chemins correspondants sont en conflits sur une fibre du réseau. Une coloration de ses sommets donne de manière équivalente une coloration des chemins dans le réseau respectant la contrainte WDM : deux chemins utilisant la même fibre doivent avoir deux couleurs différentes.

Dans le contexte des réseaux multi-fibres, ce graphe n'a pas de sens puisqu'il ne modélise que des conflits deux à deux et que la liberté apportée par la multiplicité des fibres rend sans apport cette notion. Il faut donc utiliser un outil plus puissant que les graphes pour modéliser les conflits sur un réseau multi-fibres : l'hypergraphe des conflits.

L'hypergraphe des conflits, $H_c(\mathcal{R}, R(I))$, des chemins $R(I)$ dans \mathcal{R} se définit de la sorte :

II.5.1.1. Hypergraphe des conflits de $R(I)$ dans \mathcal{R} :

$H_c = (V_c, E_c)$ est l'hypergraphe où il y a un sommet v par chemin p dans $R(I)$ et une hyperarête e pour chaque arc de \mathcal{R} de charge supérieure ou égale à 2 contenant les sommets correspondant aux chemins en conflits sur cet arc.

Les quatre principaux paramètres d'un hypergraphe peuvent donc se déduire de \mathcal{R} et $R(I)$:

- ✓ Le nombre de sommets, $n = |V_e| = |R(I)|$.
- ✓ Le nombre d'hyperarêtes, $m = |E_e| \leq |E|$, le nombre de liens de \mathcal{R} .
- ✓ Le rang (i.e. la taille maximum d'une hyperarête), $t = \max_{e \in E_e} |e|$ = charge de routage.
- ✓ Le degré, $\Delta = \max_{v \in V} |\{e \in E : v \in e\}| \leq \max_{p \in R(I)} \text{longueur}(p)$ = diamètre du routage.

Une affectation de couleurs aux chemins de $R(I)$ est k-valide s'il n'existe aucun arc de \mathcal{R} par lequel transite strictement plus de k chemins ayant la même couleur. Ainsi, une coloration de l'hypergraphe des conflits correspond à une affectation valide de couleurs aux chemins si aucune hyperarête ne contient plus de k sommets de la même couleur. Nous appellerons une telle coloration une coloration k-tolérante.

II.5.1.2. Coloration k-tolérante :

Soit $H = (V, E)$ un hypergraphe. Soit C une coloration (i.e. un ensemble d'ensemble de sommets). C est k-tolérante si et seulement si :

- ✓ Tout sommet a une et une seule couleur : $\forall v \in V, \exists ! c \in C, v \in c$.
- ✓ Il n'existe pas d'hyperarête ayant plus de k sommets de la même couleur : $\forall e \in E, \forall c \in C, |e \cap c| \leq k$.

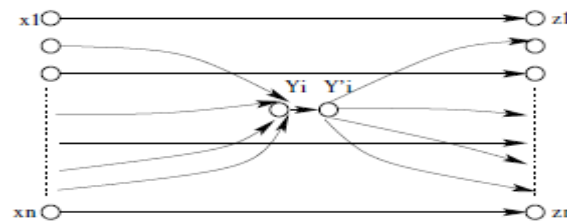
Par définition une coloration k-tolérante de l'hypergraphe des conflits d'un ensemble de chemins $R(I)$ dans un réseau \mathcal{R} donne une coloration k-valide de ces chemins. La coloration k-tolérante est donc au moins aussi difficile que le WAP (wavelength assignment problem) sur les réseaux k-fibres.

On va prouver que tout hypergraphe est l'hypergraphe des conflits du routage $R(I)$ d'une instance de communication I sur un réseau \mathcal{R} .

Soit $H = ((v_1, \dots, v_n), \{e_1, \dots, e_m\})$ un hypergraphe :

$$\forall i, r_i = |e_i|, \forall i, e_i = \{v_{j_1^i}, \dots, v_{j_{r_i}^i}\}.$$

Pour toute hyperarête e_i , soit le réseau à étage décrit ci-dessous :



Avec :

- n sommets $x_j^i, j=1, \dots, n$.
- 2 sommets Y_i et Y_i' .
- n sommets $z_j^i, j = 1 \dots n$.
- un arc $Y_i \rightarrow Y_i'$.
- $\forall j \in \{j_1^i, \dots, j_{r_i}^i\}$, un arc $x_j^i \rightarrow Y_i$ et un arc $Y_i' \rightarrow z_j^i$.
- $\forall j \notin \{j_1^i, \dots, j_{r_i}^i\}$, un arc $x_j^i \rightarrow z_j^i$.

H est bien l'hypergraphe des conflits du réseau \mathcal{R} , composé des réseaux \mathcal{R}_i et des arcs $z_j^i \rightarrow x_j^{i+1}, \forall i = 1 \dots n - 1$ sur lequel on route l'instance de communication $\{(x_j^1, z_j^n), \forall j\}$.

II.5.2. Dimensionnement d'un réseau multi-fibres :

Soit \mathcal{R} un réseau multi-fibres, I une instance de communication sur \mathcal{R} , $R(I)$ un routage de I et $H = (V, E)$ l'hypergraphe des conflits associé.

Le dimensionnement de \mathcal{R} peut être vu sous deux angles différents. Soit k , le nombre de fibres, est fixe et l'on cherche à trouver une coloration k -tolérante optimale en nombre de couleurs, soit le nombre de couleurs disponible est fixe et l'on cherche le plus petit k tel qu'il soit possible de router $R(I)$ sur le réseau, c'est-à-dire tel qu'il existe une coloration k -tolérante. Le point de vue dépend de la situation de l'opérateur cherchant à optimiser son réseau.

Dans le premier cas, les fibres sont déjà en place et on veut diminuer le coût des équipements à installer dans les nœuds du réseau. Cela sous entend que les fibres installées sont capables de faire transiter n'importe qu'elles longueurs d'onde et d'accepter n'importe qu'il équipement à ses extrémités, ce qui est faux d'un point de vue technologique mais peut être une première approximation de la réalité. Dans le deuxième cas, l'opérateur a à sa disposition une technologie limitée et veut optimiser son réseau en fonction de ces limites. Cette approche est beaucoup moins éloignée de la réalité puisque les fibres actuellement sur le marché ne sont capables de guider qu'un certain nombre de longueurs d'ondes.

Il paraît donc plus adapté de chercher le nombre optimal de fibres pour réaliser le WAP de $R(I)$ avec un certain nombre c de couleurs.

La réduction du WAP de $R(I)$ à la coloration k -tolérante de H nous permet de dériver des relations entre les différentes grandeurs de \mathcal{R} , notamment k , c .

La coloration k -tolérante est un programme linéaire en nombre entier avec minimisation (MIP pour minmax integer program). Dans un premier temps, cette formulation est exploitée grâce à une technique d'arrondi aléatoire. Ensuite une approximation aléatoire de la coloration k -tolérante permet d'obtenir une borne supérieure sur le dimensionnement de \mathcal{R} et ce, de manière effective.

Si l'on se donne c couleurs et k fibres par lien, vérifier que le WAP de $R(I)$ est réalisable, c'est-à-dire vérifier qu'il existe une coloration k -tolérante de H , revient à trouver une solution au programme suivant :

Soit une numérotation des sommets de V de 1 à n .

1. $\forall i \in \{1, \dots, n\}$, on se donne c variables $x_{i,1}, \dots, x_{i,c} \in \{0,1\} : \forall i, j, x_{i,j} = 1 \Rightarrow v_i$ à la couleur j .
2. Tout sommet doit avoir une et une seule couleur : $\forall i \in \{1, \dots, n\}, \sum_{j=1}^c x_{i,j} = 1$.
3. Toute hyperarête doit contenir au plus k sommets de la même couleur : $\forall j \in \{1, \dots, c\}, \forall e \in E, \sum_{i/v_i \in e} x_{i,j} \leq k$.

Dans ces conditions, dimensionner le nombre de fibres de \mathcal{R} pour un nombre de couleur donné est exactement minimiser la fonction de coût k dans le programme précédent qui est donc un MIP.

Il faut noter que classiquement le problème de routage optique se formule comme un problème de multiflot. Par conséquent, nous étudions les problèmes liés au flot.

II.6. Problème de flot et multiflot :

Le problème de multiflot est utile dans un grand nombre d'applications, notamment lorsqu'il est question de calculer des routes pour des entités qui sont en concurrence pour certaines ressources, ressources qui sont modélisées par des capacités sur les arcs du graphe support des routages possibles.

De manière formelle, un réseau de flot est un graphe $G = (V, E)$ avec des capacités $c \in \mathbf{R}^+$ sur ses arcs, les arcs seront les supports de flot, les sommets seront des points intermédiaires ou bien des sources et des destinations de flot.

Un flot f de s à t est une pondération des arcs de G respectant des contraintes de conservation de flot, c'est-à-dire que la somme de flot entrant en un sommet est égale à celle sortante (Ford et Fulkerson 1962). Par analogie avec les théories physiques d'électrocinétique et de la mécanique des fluides, ces contraintes s'appellent aussi lois de Kirchhoff. L'intensité du flot est la quantité de flot injectée à la source s , qui, du fait de conservation du flot, est égale à celle extraite à la destination t .

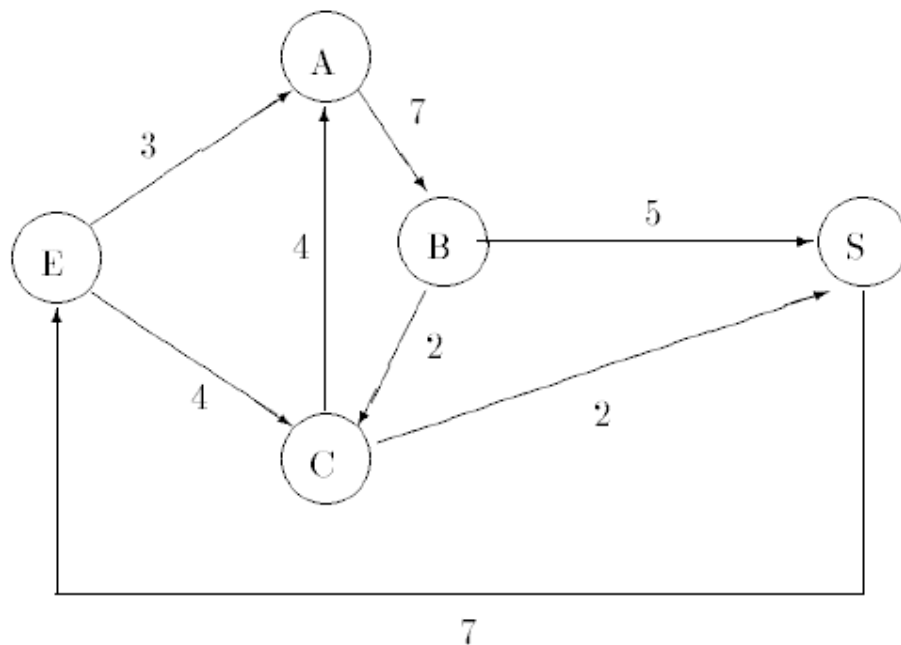


Figure. IV.3. Exemple de flot.

Un multiflot consiste à faire cohabiter plusieurs flots sur le réseau de sorte que la somme des flots passant sur un arc soit inférieure à la capacité de l'arc.

II.6.1. Programme linéaire sommet-arc : taille polynomiale :

On se donne un multi ensemble de commodités $C = \{(s_i, t_i), s_i, t_i \in V, i = 1, \dots, k\}$. Un multiflot de C est une réunion de flots pour chaque commodité respectant les capacités de G . Il s'agit donc d'un ensemble de pondération de E , respectant chacune les contraintes de conservation de flot de sorte que :

$$\forall e \in E, \sum_i f_i(e) \leq c(e).$$

Dans ce contexte, le problème de multiflot maximum cherche à minimiser la somme des intensités de chaque commodité qu'il est possible de router dans G en respectant les capacités. Ce problème s'écrit comme le programme linéaire 1.

De plus, nous modélisons l'ensemble des successeurs et respectivement des prédécesseurs d'un sommet s comme l'ensemble des arcs sortant de s , respectivement entrant dans s . l'ensemble des successeurs de s est noté $\Gamma^+(s)$ et l'ensemble des prédécesseurs de s est noté $\Gamma^-(s)$.

➤ **Programme linéaire 1. (multiflot maximum) :**

Maximiser $\sum_i d_i$

Tel que :

- ✓ Contrainte de capacité :

$$\sum_i f_i(e) \leq c(e). \forall e \text{ un arc.}$$

- ✓ Contrainte de conservation :

$$\sum_{e \in \Gamma^+(u)} f_i(e) - \sum_{e \in \Gamma^-(u)} f_i(e) = 0 \quad \forall i, \forall u \neq s_i, t_i$$

- ✓ Respect de la demande :

$$\sum_{e \in \Gamma^+(s_i)} f_i(e) - \sum_{e \in \Gamma^-(s_i)} f_i(e) = d_i \quad \forall i$$

$$\sum_{e \in \Gamma^+(t_i)} f_i(e) - \sum_{e \in \Gamma^-(t_i)} f_i(e) = d_i \quad \forall i$$

- ✓ Un flot positif ou nul :

$$f_i(e) \geq 0 \quad \forall i, \forall e.$$

La formulation en programme linéaire de multiflot ci-dessus est dite sommet-arc. Cette écriture de problème utilise un nombre polynomial de variables et de contraintes, ce qui montre que la résolution de ce problème est polynomiale pour le flot fractionnaire, mais devient NP -complet pour le multiflot entier ($\forall i, f_i : E \in \mathbb{N}, d_i \in \mathbb{N}, c : E \in \mathbb{N}$).

Cette formulation utilise notamment une variable par arc et par commodité qui indique la quantité de flot de la commodité qui passe sur l'arc.

Plusieurs variantes de problème de multiflot existent. Notamment, on associe à chaque commodité i une demande d_i , le problème de multiflot concurrent maximum cherche à trouver le z maximum tel qu'il soit possible de faire un flot d'intensité zd_i pour chaque commodité tout en respectant les capacités maximales d'un arc ou la somme des capacités de sorte qu'il soit possible de router exactement d_i unités de flots pour chaque commodité i .

II.6.2. Programme linéaire arc-chemin : dual combinatoire :

Les contraintes de conservation de flot de la formulation sommet-arc assurent le fait qu'une unité de flot suit un trajet qui peut être décrit par un chemin. En fait, on peut considérer le flot d'une commodité comme un ensemble de chemin transportant chacun une certaine quantité de flot. Cette idée permet d'écrire le flot et le multiflot comme un problème de packaging de chemins contraints par les capacités des arcs du réseau du flot.

Soit $G = (V, E)$, un réseau de flot, $C = \{(s_i, t_i), s_i, t_i \in V, i = 1, \dots, k\}$, l'ensemble des commodités, P_i l'ensemble des chemins de s_i à t_i dans G et $P = \cup_i P_i$. Un flot de s_i à t_i s'exprime comme une pondération f des chemins de P_i et le flot de la commodité i est :

$$\sum_{p \in P_i} f(p).$$

Le fait que le flot soit porté par des chemins contient intrinsèquement la notion de conservation. Il reste à contraindre le flot au respect des capacités et, pour cela, il suffit de remarquer que la quantité de flot passant sur l'arc e est la somme des quantités de flots passant sur tous les chemins contenant e :

$$\sum_{p \in P, e \in p} f(p) \leq c(e).$$

Le problème linéaire du multiflot maximum devient le suivant, logiquement qualifié d'arc-chemin :

Programme linéaire 2 :(multiflot arc-chemin) :

Maximiser $\sum_{p \in P} f(p)$;

Tel que :

✓ Contrainte de capacité :

$$\sum_{p \in P, e \in p} f(p) \leq c(e) \quad \forall e \text{ un arc}$$

✓ Respect de la demande :

$$\sum_{p \in P_i} f(p) \leq d_i \quad \forall i \text{ Une requête}$$

✓ Un flot positif ou nul :

$$f(p) \geq 0 \quad \forall p \in P.$$

Le problème principal de cette formulation est que le nombre de variable, c'est-à-dire le nombre de chemins, est généralement exponentiel en la taille de graphe.

III. la protection de l'instance de communication dans les réseaux WDM :

Dans le dimensionnement des réseaux WDM, on cherche à prévoir une capacité de rechange pour se prémunir contre les failles et les défaillances qui peuvent toucher le réseau. On distingue une large panoplie de défaillances incluant : une défaillance du nœud, une défaillance de port, une défaillance touchant le conduit dans lequel se trouvent les fibres, une coupure de fibre.....etc. lorsqu'une défaillance survient au niveau d'un lien, les nœuds concernés doivent être capables de détecter la défaillance et de la notifier vers tout le voisinage. La capacité de rechange prévue est utilisée par la connexion lorsqu'une défaillance est détectée.

En générale, on distingue deux grands mécanisme de pour gérer les défaillances dans les réseaux optiques. La restauration et la protection.

Dans le mécanisme de protection, la capacité de rechange est calculée à l'avance au moment du dimensionnement du réseau. En revanche, à la restauration, la capacité de secours est calculée dynamiquement, juste à l'instant de la détection de la défaillance. Dans notre modèle, on se limitera qu'au mécanisme de protection. Trois schémas différents sont imaginés pour gérer la protection des connexions.

III.1. la protection (1+1 ou 1 :1) :

Les protections 1+1 et 1 :1 consiste à prévoir une ressource de secours (route, ensemble de longueurs d'onde à utiliser sur cette route) totalement dédiée à la connexion. Ces ressources ne doivent en aucun cas être partagées. Les modalités de recherche de ressources secondaires (les ressources de secours) sont identiques à celles des ressources primaires (les ressources qu'utiliserait la connexion lors d'un fonctionnement normal).

III.2. la protection M : N :

Une liaison unitaire d'un nœud X vers un nœud Y dans un réseau WDM correspond à l'établissement d'un chemin de X à Y et à la réservation d'une ressource (longueur d'onde) sur chaque chemin emprunté.

La protection 1 :1 est une méthode simple et automatique pour la protection d'une liaison optique, toutefois lorsque N et M sont supérieurs à 1, il faudra trouver ressource (longueur d'onde et chemin) de protection pour N chemin de travail. Lorsque M=1 un seul chemin de protection pour N chemin de travail.

Conclusion :

Le problème de routage et d'affectation de longueur d'onde ou RWA (routing and wavelength assignment en anglais) consiste à affecter pour chaque chemin requis par une demande de connexion une route à travers le réseau. Le problème d'affectation de longueur d'onde doit répondre à une forte contrainte : deux chemins utilisant la même fibre ne doivent pas utiliser la même longueur d'onde. Dans le cas où on n'autorise pas de conversion de longueur d'ondes au niveau des nœuds intermédiaires, une contrainte de continuité optique est alors imposée. Nous avons illustré les différents types de réseaux WDM, les modèles de trafic qui peuvent exister et les différents types de routage. Par la suite, des algorithmes heuristiques de routage et d'affectation de longueurs d'onde ont été détaillés et qui peuvent fournir des résultats assez proches du cas optimal.

Introduction :

En théorie des graphes, l'algorithme de **DIJKSTRA** (prononcer [algɔritmdəɛjkstra]) sert à résoudre le problème de plus court chemin. Il permet, par exemple, de déterminer le plus court chemin pour se rendre d'un nœud à un autre en connaissant le réseau de connexion. Il s'applique à un graphe connexe dont le poids lié aux arêtes est positif ou nul.

L'algorithme porte le nom de son inventeur, l'informaticien néerlandais Edsger Dijkstra et a été publié en 1959.

I. Application :

L'algorithme de Dijkstra trouve son utilité dans le calcul des chemins les plus courts. Le poids des arcs pouvant être la distance (pour le trajet le plus court), le temps (pour le trajet le plus rapide). Une application des plus courantes de l'algorithme de Dijkstra est le protocole open shortest path first qui permet un routage internet très efficace des informations en cherchant le parcours le plus efficace.

Les routeurs IS-IS utilisent également l'algorithme.

II. Principe de l'algorithme de Dijkstra :

Il s'agit de construire progressivement, à partir des données initiales, un sous-graphe dans lequel sont classés les différents sommets par ordre croissant minimale au sommet de départ. La distance correspond à la somme des poids des arêtes empruntées.

La première étape consiste à mettre de côté le sommet de départ et à repérer la distance du sommet de départ aux autres sommets du graphe. Cette distance est infinie si aucun arc ne relie le sommet au sommet de départ, elle est de n s'il existe un arc reliant ce sommet au sommet de départ et que le poids le plus faible (s'il existe plusieurs arcs) est de n .

La seconde étape consiste à repérer le sommet qui possède la plus courte distance au sommet de départ et à le mettre de côté. Pour tous les sommets restant, on compare alors la distance trouvée précédemment à celle que l'on obtiendrait via le sommet que l'on vient de mettre de cote et on ne conserve que la petite des valeurs, et on continue ainsi jusqu'à épuisement des sommets ou jusqu'à sélection du sommet d'arrivée.

II.1. Distance entre le nœud (1) et le nœud (10) :

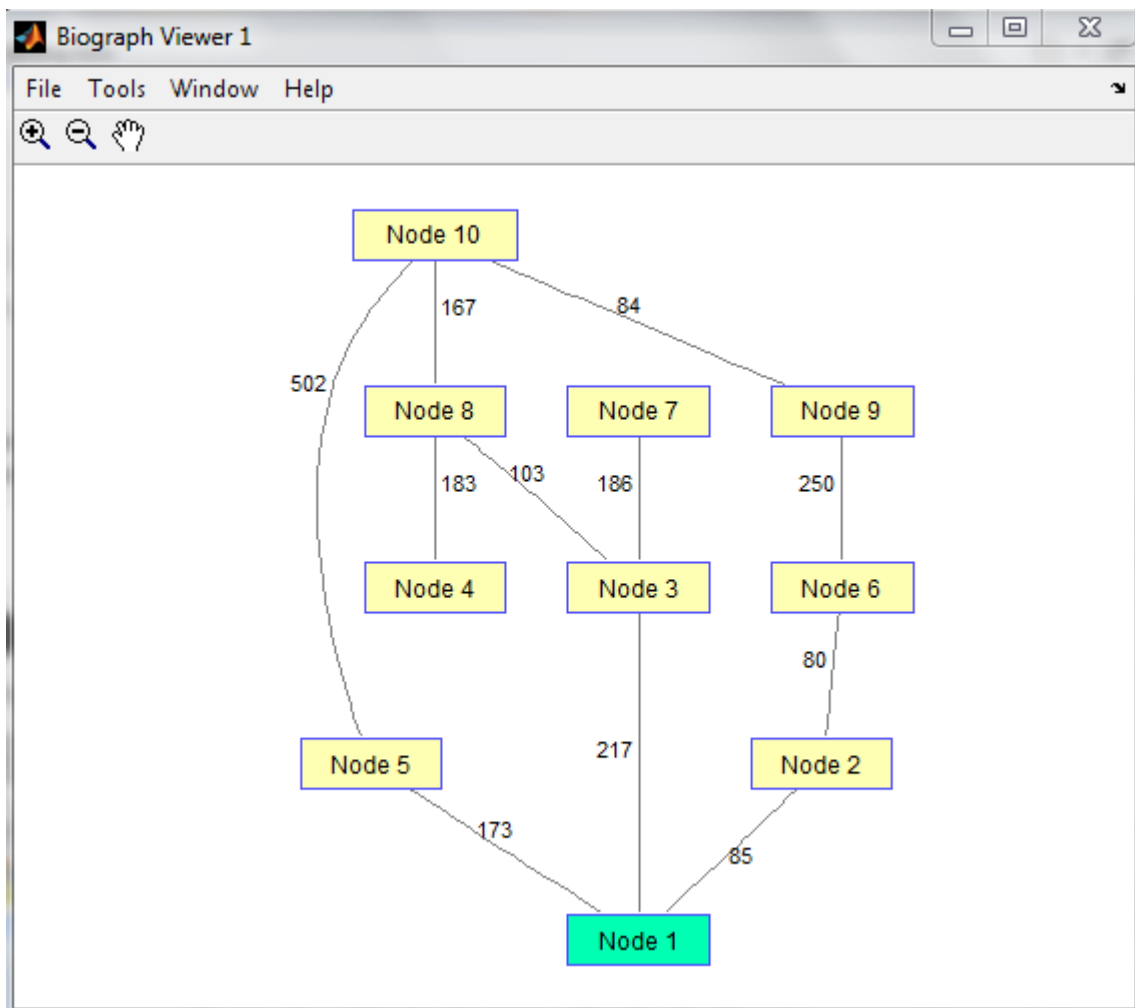
L'exemple suivant montre les étapes successives dans la résolution du chemin le plus court dans un graphe. Les nœuds sont identifiés par des chiffres et les arêtes indiquent la distance entre ces nœuds. On recherche à déterminer le plus court chemin pour aller de nœuds (1) au nœud (10).

Pour visualiser le graphe dans MATLAB, on va introduire ces instructions dans l'éditeur de MATLAB.

```
W = [85 80 250 84 167 183 103 186 217 173 502];
DG = sparse([1 2 6 9 10 8 8 3 1 5 10],[2 6 9 10 8 4 3 7 3 1 5],W)
UG = tril(DG + DG')
h = view(biograph(UG,[],'ShowArrows','off','ShowWeights','on'))
```

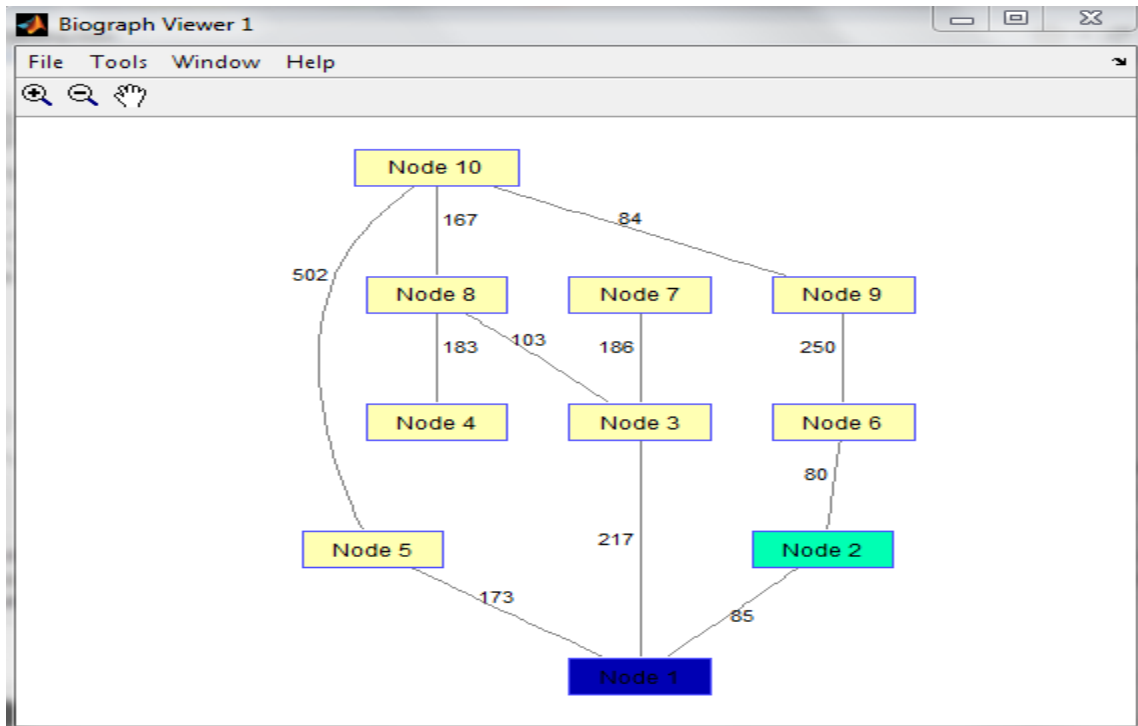
On aura le graphe suivant :

✓ **Etape 1 :**



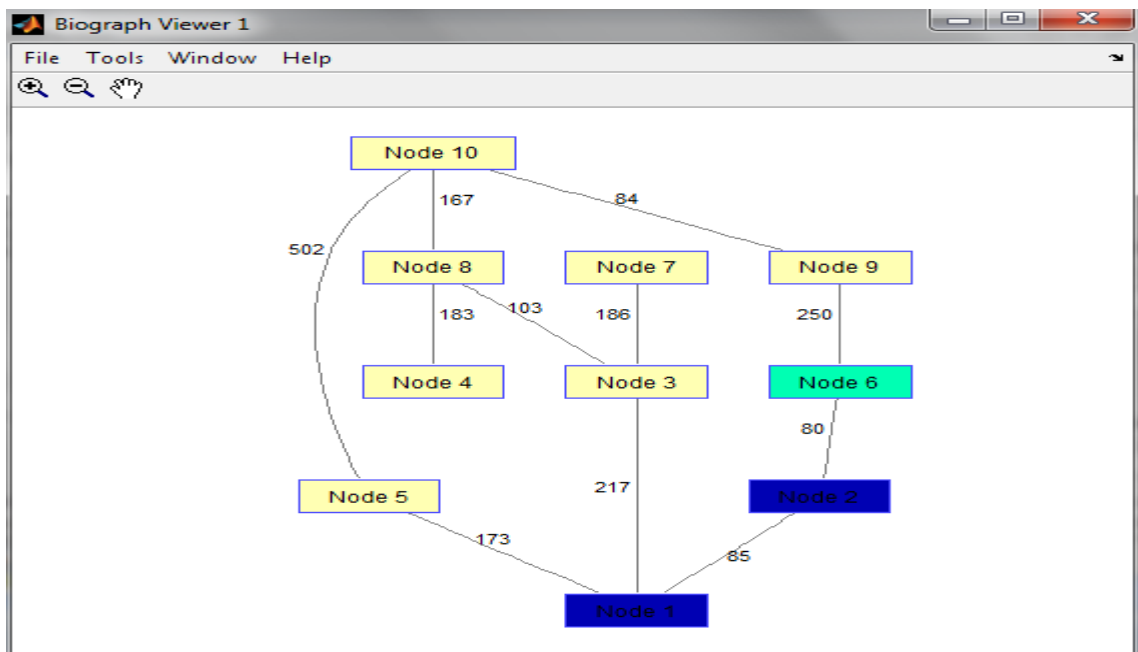
A partir de nœud (1), 3 nœuds sont accessibles, (2), (3) et (5) qui se voient donc affectés des poids respectifs de 85, 217 et 173 tandis que les autres nœuds sont affectés d'une distance infinie.

✓ **Etape 2 :**



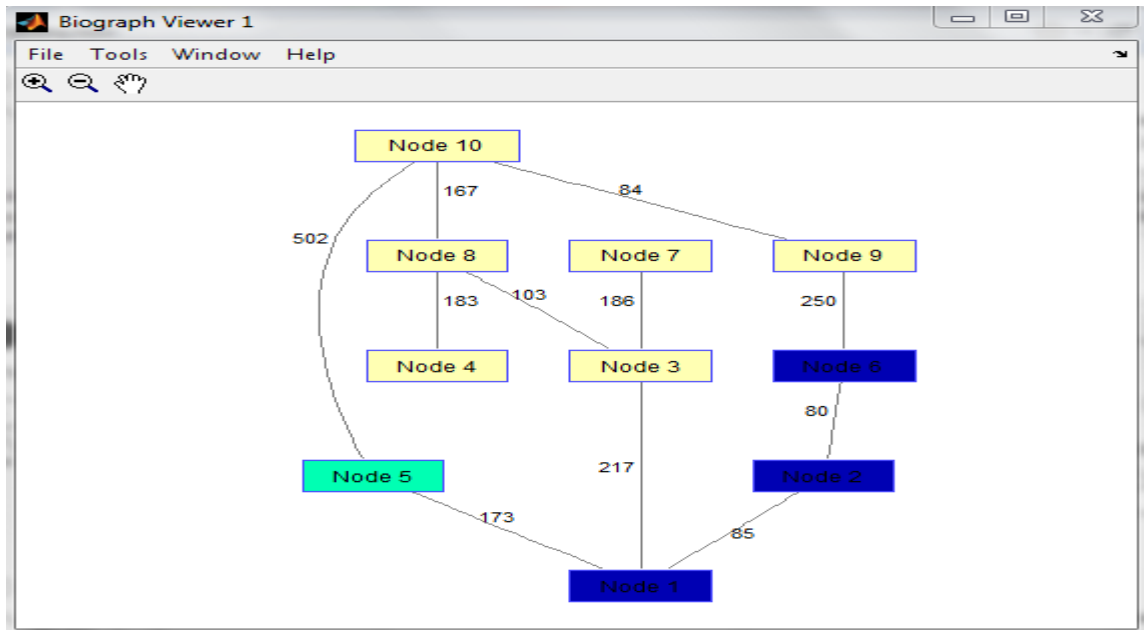
La distance la plus courte est celle menant au nœud (2). Le passage par le nœud (2) ouvre la voie au nœud (6) ($85+80=165$ Km).

✓ **Etape 3 :**



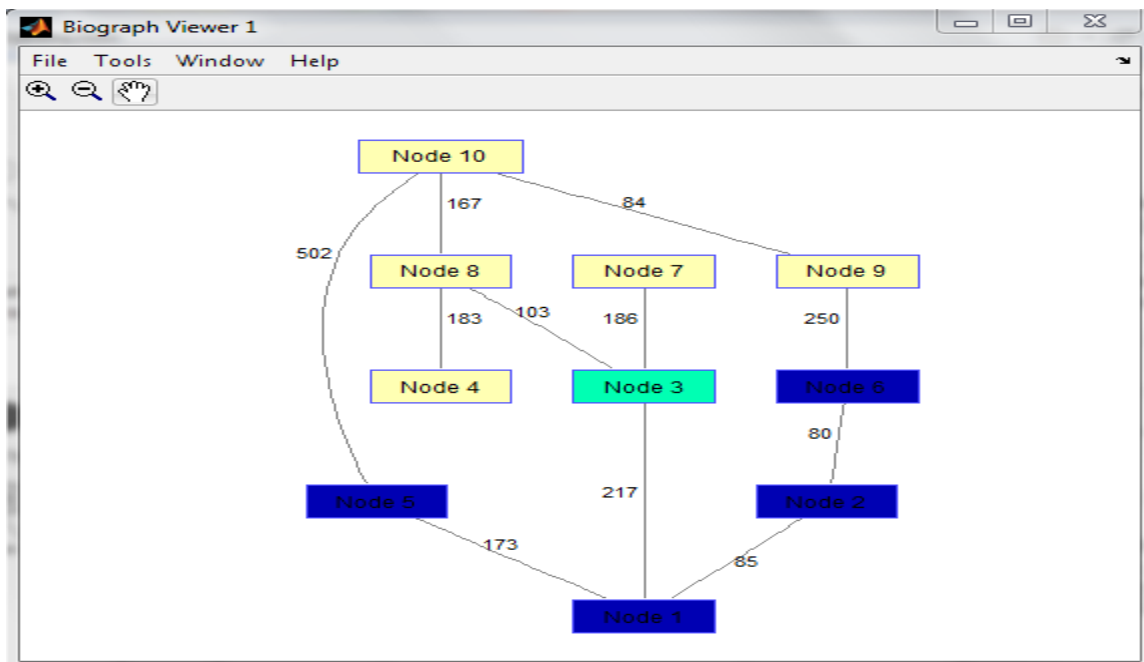
La distance la plus courte suivante est celle menant au nœud (6). Le passage par le nœud (6) ouvre une voie vers le nœud (9) (415 Km).

✓ **Etape 4 :**



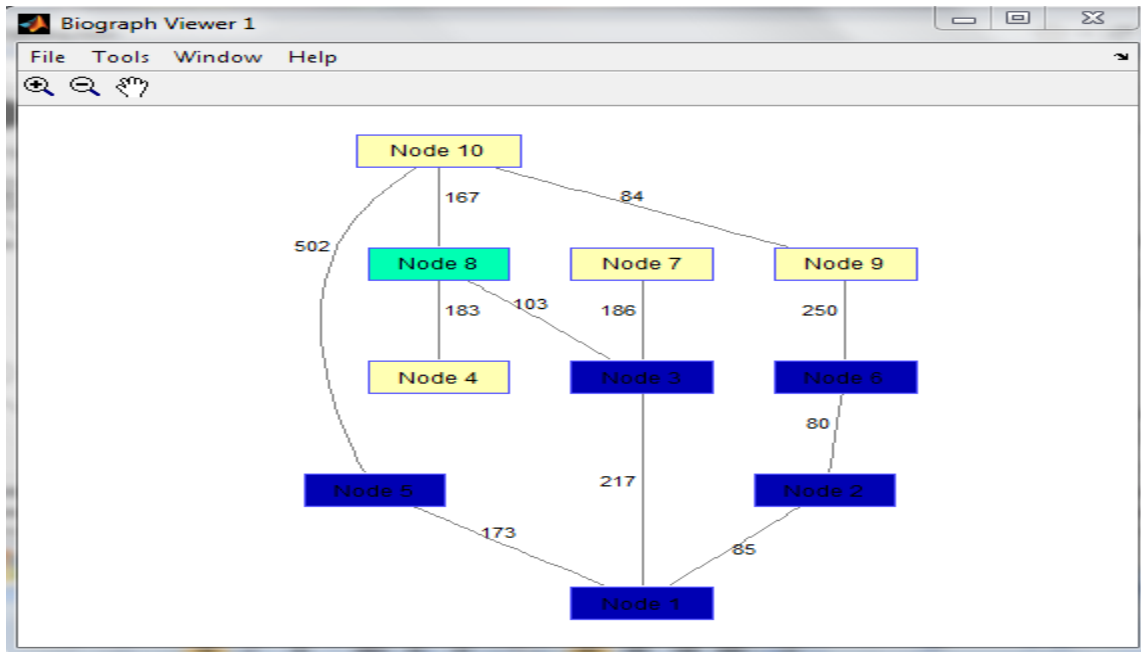
La distance la plus courte suivante est alors celle menant au nœud (5). Le passage par le nœud (5) ouvre une voie vers le nœud (10) (675 Km).

✓ **Etape 5 :**



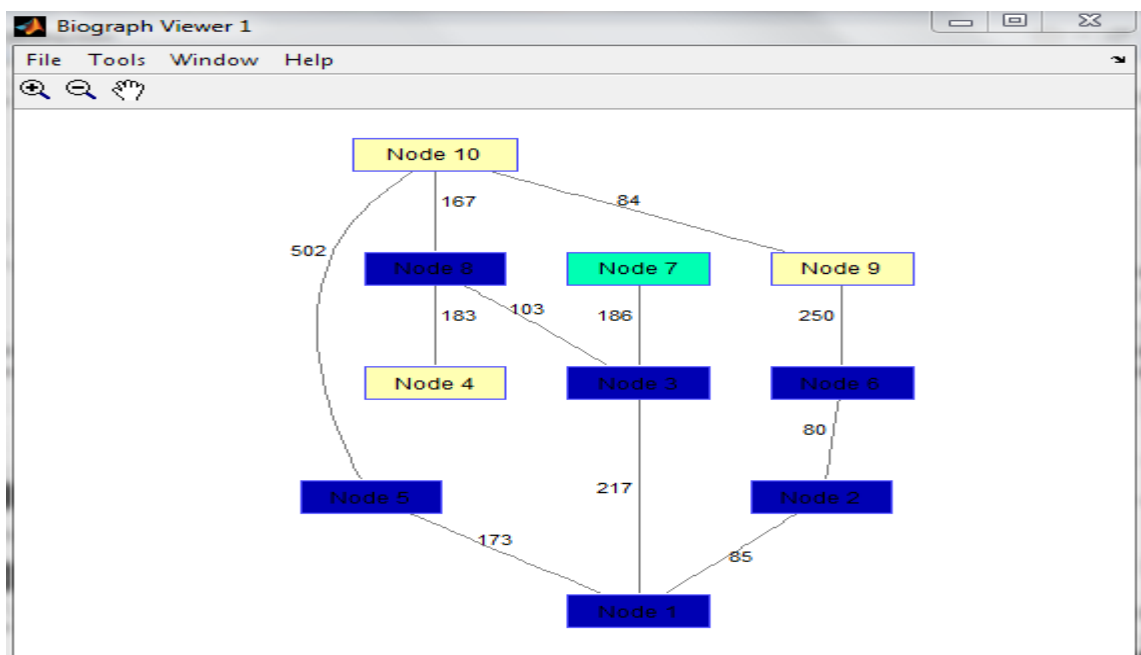
La distance la plus courte suivante mène alors au nœud (3). Le passage par le nœud (3) ouvre une voie vers le nœud (7) (403 Km) et le nœud (8) (320 Km).

✓ **Etape 6 :**



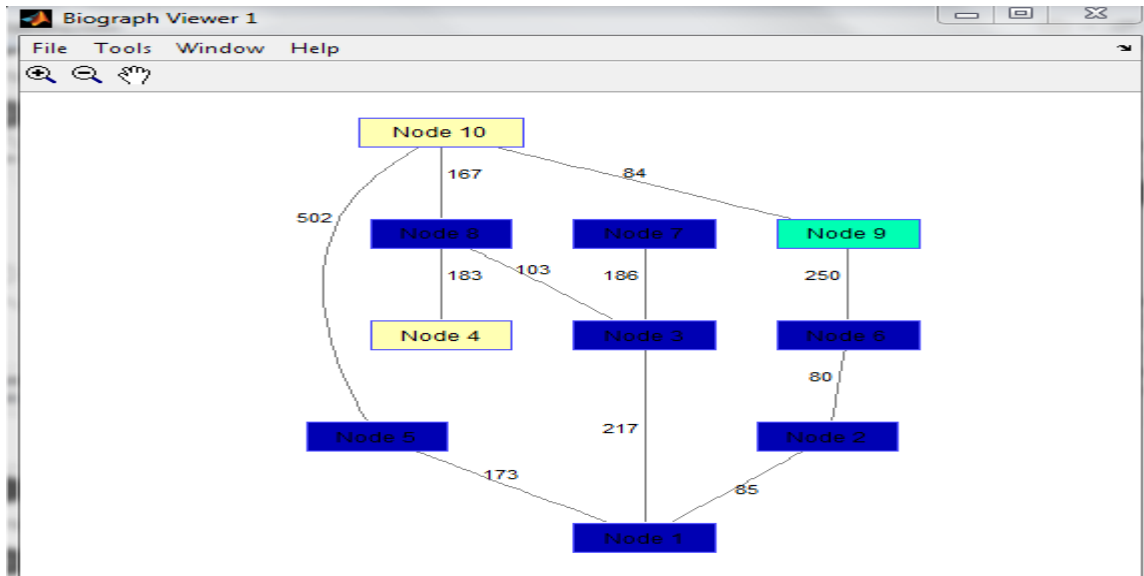
La distance la plus courte suivante mène au nœud (8) (320 Km). Le passage par le nœud (8) ouvre une voie vers le nœud (4) et un raccourci vers le nœud (10) (487 <675).

✓ **Etape 7 :**



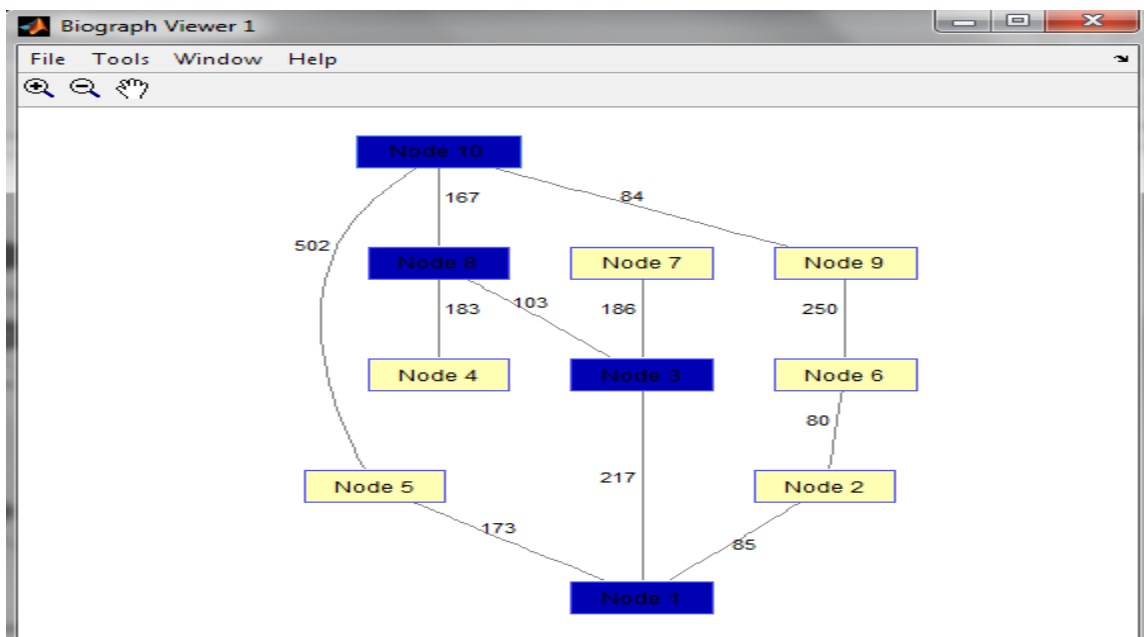
La distance la plus courte suivante mène au nœud (7) et ne change aucune autre distance.

✓ **Etape 8 :**



La distance la plus courte suivante mène au nœud (9). Le passage par le nœud (9) ouvre un chemin vers le nœud (10) qui n'est pas intéressant ($415+84 > 487$).

✓ **Etape 9 :**



La distance la plus courte suivante mène au nœud (10).

Pour trouver la distance la plus courte reliant les deux nœuds (1) et (10), on doit écrire l'instruction suivante dans l'éditeur de MATLAB :

```
[dist,path,pred] = graphshortestpath(UG,1,10,'directed',false)
```

Alors, on aura la réponse suivante:

Biograph object with 10 nodes and 11 edges.

dist =

487

path =

1 3 8 10

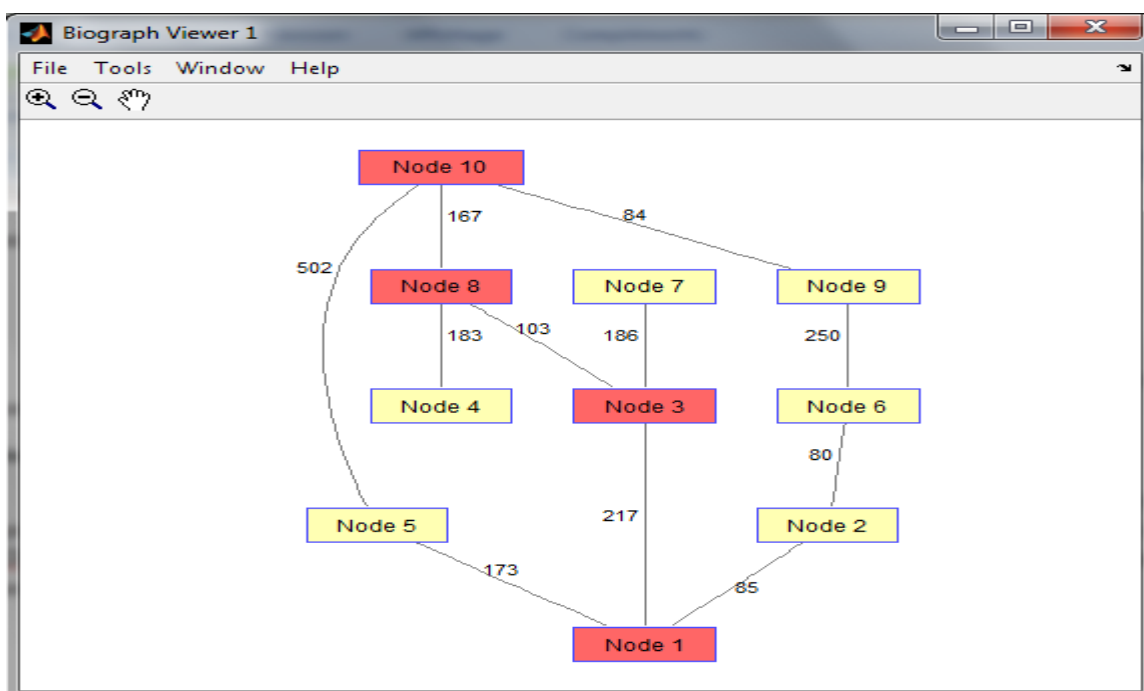
pred =

0 1 1 8 1 2 3 3 6 8

Et pour voir le graphe, l'instruction est :

```
set(h.Nodes(path),'Color',[1 0.4 0.4])
```

Alors, on aura le graphe suivant :



On connaît ainsi le chemin le plus court menant de nœud (1) au nœud (10), il passe par le nœud (3) et le nœud (8) et mesure 487 Km.

II.2. Présentation sous forme de tableau :

L'illustration par une série de graphes peut se révéler un peu longue. Il est d'autre part un peu plus difficile de repérer le chemin le plus court à l'issue du dessin. Ainsi l'algorithme de Dijkstra est souvent réalisé à l'aide d'un tableau dans lequel chaque étape correspond à une ligne.

A partir de la matrice des arcs orientés reliant les différents nœuds :

Matrice des arcs orientés.

	à 1	à 2	à 3	à 4	à 5	à 6	à 7	à 8	à 9	à 10
De 1	0	85	217		173					
De 2	85	0				80				
De 3	217		0				186	103		
De 4				0				183		
De 5	173				0					502
De 6		80				0			250	
De 7			186				0			
De 8			103	183				0		167
De 9						250			0	84
De 10					502			167	84	0

On construit un tableau dans lequel les distances d'un sommet au sommet de départ sont regroupées dans une même colonne. Les sommets sélectionnés sont soulignés. Les distances des voies ouvertes par la sélection d'un nouveau sommet sont barrées si elles sont supérieures à des distances déjà calculées. Quand un sommet est sélectionné, c'est que l'on a découvert sa distance minimale au sommet, il est alors inutile de chercher d'autres distances de ce sommet au point de départ.

Algorithme de Dijkstra :

	à 2	à 3	à 4	à 5	à 6	à 7	à 8	à 9	à 10
1	<u>85</u>	217		173					
2 (85₁)		217		173	<u>165</u>				
6(165₂)		217		<u>173</u>				415	
5(173₁)		<u>217</u>						415	675
3(217₁)						403	<u>320</u>	415	675
8(320₃)			503			<u>403</u>		415	487
7(403₃)			503					<u>415</u>	487
9 (415₆)			503						<u>487</u>
10(487₈)			<u>503</u>						
4(503₈)									

La construction de ce tableau donne non seulement la distance minimale de nœud (1) au nœud (10) mais aussi le chemin à suivre ((10-8-3-1) ainsi que toutes les distances minimales de nœud (1) aux autres nœuds rangées par ordre croissant.

Conclusion :

L'algorithme de routage Dijkstra est très efficace lorsque le critère d'optimisation de réseau consiste à minimiser le nombre de saut puisqu'il permet de calculer le plus court chemin pour une paire de nœuds demandant une connexion. Toutefois, il a quelques limites dont sa grande probabilité de blocage puisqu'il ne prend pas en considération l'état global de réseau en calculant les chemins pour les paires de nœuds.

Conclusion et perspectives :

Pour conclure ce travail, il serait fort intéressant de mentionner les bénéfices que nous avons acquis tout le long de ce projet de fin d'étude pour lequel nous avons fixé comme objectif la modélisation de problème de routage ainsi que la simulation d'une liaison tout-optique WDM.

Tout d'abord, ce projet m'as permis de renforcer et enrichir mes connaissances théoriques dans le domaine des communications optiques. En effet, comme vous avez pu le constater, la partie théorique de notre rapport occupe une place très importante.

Dans la première partie de notre travail, Nous avons fait une énumération des différents composants intervenant dans la mise en œuvre d'un réseau optique WDM, en décrivant leurs performances et leurs inconvénients. Ensuite, nous avons réalisé une simulation d'une liaison optique WDM à l'aide de logiciel COMSIS.

Dans la deuxième partie da notre travail, nous avons modélisé le problème de routage et d'affectation de longueur d'onde tout en étudiant les différents algorithmes dédiés pour résoudre ce problème.

Les réseaux WDM suscitent de plus en plus d'intérêt. En effet, le passage à un réseau totalement optique permettra de réduire les coûts et d'augmenter le débit

Dans la continuité de ce projet, il est envisagé de développer de nouvelles techniques qui vont permettre à priori de multiplier encore plus les capacités des systèmes optiques. Alors voici quelques études à mener :

- Considérer des fibres optimisées et des techniques de gestion de la dispersion ;
- Considérer des amplificateurs optiques à faible bruit, grande puissance, à large bande ;
- Considérer des transmissions soliton permettant le transport d'impulsions très étroites sur des milliers de kilomètres sans déformation, tout en conservant une bande passante très large ;
- Considérer de nouvelle méthodes pour résoudre le problème de routage et d'affectation de longueur d'onde ;
- Implémentation du nouveaux algorithmes capable de mesurer la qualité de transmission (quality of transmission, Qot).

Ouvrages :

- **IRENE et MICHEL JOINDOT** << fibres optiques pour télécommunication >>, Edition DUNOD, 1996.
- **JEAN PIERE LAUDE** << le multiplexage en longueur d'onde >>, Edition MASSON, 1992.
- **IVAN KAMINOW et TINGYE LI** << optical fiber telecommunications >>.

Thèses :

- **HERVE RIVANO** << Dimensionnement des réseaux optique WDM >>, université de Lyon, Octobre 2002. (thèse de doctorat).
- **KARIM AYARI** << implémentation d'un outil de calcul des imperfections de transmission pour les réseaux WDM tout-optique >>, rapport de fin d'études. Tunis, Juin 2005.
- **MOHAMED ALI EZZAHDI** << Heuristique pour le routage et l'affectation de longueurs d'onde dans un réseau WDM hybride >>, rapport de fin d'étude. Tunis, Juin 2005.
- **HERVE RIVANO et NICOLAS BASKIOTIS et STEPHANE PERENNES** << dimensionnement heuristique des réseaux optiques WDM multifibres par arrondi aléatoire de multiflot >>, INRIA, rapport de recherche, Aout 2003.
- **CLAUDINE MOSSE** << implémentation d'algorithmes pour les réseaux optiques WDM >>, université d'AVIGNON, stage de fin d'étude, Aout 2004.
- **D. PAPADIMITRIOU et D. PENNINGCKX** << *Physical Routing Impairments in Wavelength-switched Optical Networks*>> Global Optical Communications 2002.

Site web :

- [http:// www.wikipedia.fr](http://www.wikipedia.fr).
- [http:// www.unilim.fr/theses](http://www.unilim.fr/theses).

Autres:

- DWDM Network Designs and Engineering Solutions, Cisco. Pages : 24, 100, 116, 126.
- Documentati on COMSIS.

Résumé :

Depuis une vingtaine d'années, et encore actuellement, les opérateurs de réseaux d'infrastructures intercontinentaux, trans-continentaux, voire métropolitains privilégient les systèmes de communications optiques utilisant les technologies de multiplexage en longueurs d'onde (WDM pour Wavelength Division Multiplexing) pour leur bande passante sans équivalent. Portant, du point de vue d'un opérateur les investissements nécessaires sont tels que le déploiement de ce type de réseaux ne se fera pas sans garantie d'efficacité suffisante.

En effet, l'optimisation des réseaux optique WDM est essentielle à son développement ; les couts de déploiement d'un réseau optique d'infrastructure sont gigantesques et les opérateurs sont intéressés par l'optimisation de la taille des liens installés et de la complexité des routeurs présents dans les nœuds du réseau.

Dans ce contexte, l'objectif de ce travaille est, dans un premiers temps : détailler les composants nécessaire pour la mise en œuvre les réseaux optique WDM.

Dans un second temps, le présent travaille permet de comparer différentes techniques algorithmiques pour les problématiques issues de la modélisation du dimensionnement des réseaux d'infrastructures.

Donc, ce travaille s'articule autour de deux axes ;

- ✓ Les réseaux optiques et la technologie WDM ;
- ✓ La présentation des différents algorithmes de routage et d'affectation de longueurs d'ondes.

Mots clés :

Réseaux optiques, réseaux WDM, multiplexage en longueurs d'onde WDM, routage optique, algorithme de routage et d'affectation de longueurs d'onde.