

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université MOULOUD MAMMARI DE TIZI OUZOU

Faculté de Génie Electrique et d'Informatique

Département d'Electronique.



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES



En Vue de l'Obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat
en Electronique.

Option : Communication.

THEME

*Simulation d'une liaison haut debit
par fibre optique sur logiciel
COMSIS*

Présenté par :

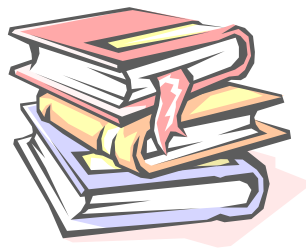
Melle. BELAID KATIA.

Melle. DOUMER GHANIA.

Encadré par :

Mr. AIT BACHIR.

Promotion 2012



Remerciements

A travers ce modeste travail, nous tenons à remercier vivement notre promoteur Mr –AIT BACHIR YUCEF pour son soutien et ses conseils avisés. J'en profite également pour saluer sa compétence et son sérieux, et notre encadreur d'Algérie Telecom Mr-Izri Kamel pour l'intéressante documentation qu'il a mise à notre disposition et pour le temps qu'il nous a consacré au dépend de son travail, Mr-BOUDARENE Khelifa pour son soutiens.

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

Nous exprimons également notre gratitude à tous les professeurs et enseignants qui ont collaboré à notre formation depuis notre premier cycle d'étude jusqu'à la fin de notre cycle universitaire. Sans omettre bien sur de remercier profondément tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à réalisation du présent travail.



Dédicace

À la mémoire de mon père

À ma très chère mère ;

À mes sœurs :

SAMIA et son époux ABDELLEAH ses

filles : AZIZA, LISA, NADINE ;

DJAMILA et son époux KARIM et ses

enfants : MARIA, LISA, ELYES ;

MONIA et son époux AHMED ;

À mes frères : SAMIR et MADJID ;

À toute la famille BELAID

*À tous mes amis et ceux qui m'ont aidée durant ma vie
universitaire.*

Katia



Dédicace

Je dédie ce modeste travail,

À mon très cher père ;

À ma chère mère ;

À mes sœurs, FARIDA et LINDA ;

À mes frères :

MOURAD et son épouse HEDJILA et leur petite princesse

MAYA

YOUCEF et MALIK ;

À ma tante DAHBIA et son époux MOHAMED et ces

enfants SABRINA, KOCEILA et MHAMED ;

À toute la famille DRIFEL ;

À tous mes amis et ceux qui m'ont aidée durant ma vie

universitaire.

Ghania

Sommaire

| | |
|---|----------|
| Introduction générale..... | 1 |
| Chapitre I : Généralités sur la fibre optique..... | |
| Introduction..... | 3 |
| I.1.Les supports libres | 3 |
| I.1.1.Les faisceaux hertziens | 4 |
| I.1.2.Liaison par satellite..... | 5 |
| I.2.Les supports guidées | 5 |
| I.2.1.La ligne bifilaire parallèle | 6 |
| I.2.2.Paire torsadée..... | 6 |
| I.2.3.Le câble coaxiale | 7 |
| I.2.4.Les guides d'ondes | 8 |
| I.3.Les supports optiques | 8 |
| I.3.1.La liaison optique à l'air libre | 8 |
| I.3.2.La fibre optique | 8 |
| I.3.2.1.Description | 8 |
| I.3.2.2.Le guidage du signal optique dans une fibre optique | 9 |
| I.3.2.3.La réflexion totale..... | 10 |
| I.3.2.4.Caractéristique de la fibre..... | 11 |
| a. L'atténuation | 11 |
| b. Dispersion | 12 |
| ✓ Dispersion chromatique | 12 |
| ✓ Dispersion modale | 13 |
| ✓ Effets de la dispersion modale et chromatique | 13 |
| ✓ Dispersion de polarisation | 14 |
| c. Bande passante | 14 |
| Bande modale | 15 |
| Bande chromatique | 15 |
| I.3.2.5. Les différents types de fibre optique. | 15 |
| a-Fibre multimode..... | 16 |
| Fibre multimode à saut d'indice | 16 |
| Fibre multimode à gradient d'indice | 16 |
| b-Fibre monomode..... | 18 |
| I.4.3.Fibre en télécom | 18 |
| A.Utilisation de différente fibre optique..... | 18 |
| B.Les applications de la fibre monomode..... | 18 |
| C. Avantages et inconvénients de la fibre optique..... | 19 |
| C.1. Avantage | 19 |
| C.2. Inconvénient | 19 |
| Conclusion | 21 |
| Chapitre II : Technique de codage | |

| | |
|---|----|
| Introduction..... | 22 |
| II.1.Numérisations des signaux téléphoniques | 22 |
| II.1.1.Principe de la modulation MIC | 23 |
| L'échantillonnage | 23 |
| La quantification | 23 |
| Le codage | 24 |
| La compression | 24 |
| II.2.Codage binaire du signal | 26 |
| II.2.1.Quelques exemples de code en ligne | 26 |
| II.2.2.Représentation des signaux codés | 26 |
| a)Codage NRZ (No Return to Zero) | 26 |
| b) Codage HDBn (Haute Densité Binaire d'ordre n)..... | 27 |
| c)Codage NRZI(No Return to Zero Inverted) | 28 |
| d) Codage Manchester | 28 |
| II.3.Les modulations de base | 29 |
| II.3.1.Modulation de fréquence ou FSK | 29 |
| II.3.2.Modulation de phase ou PSK..... | 29 |
| II.3.3.Modulation d'amplitude ou ASK..... | 30 |
| II.4.Type de transmission..... | 30 |
| II.4.1.Transmission asynchrone | 30 |
| II.4.2.Transmission synchrone..... | 31 |

Chapitre III : Les systèmes de transmission à haut débit

| | |
|--|----|
| Introduction..... | 32 |
| III.1.La hiérarchie plesiochrone PDH..... | 32 |
| III.2.Les inconvénients de la PDH..... | 33 |
| III.3.Evolution de la PDH vers la SDH | 33 |
| III.4.Définition de la SDH | 34 |
| III.4.1.La technologie SDH..... | 34 |
| III.4.2.La trame SDH | 35 |
| III.4.2.1.L'en-tête de section régénération(RSOH) | 36 |
| III.4.2.2.L'en-tête de section de multiplexage(MSOH)..... | 37 |
| III.4.2.3.Le pointeur(PTR) | 39 |
| III.4.3.Les entités traitées par le réseau SDH..... | 39 |
| III.4.3.1.La notion de conteneur « C-n » | 39 |
| III.4.3.2.Le conteneur virtuel VC-n | 40 |
| III.4.3.3.L'unité tributaire | 40 |
| III.4.3.4.Le groupe d'unité d'affluent « TUG-n » | 41 |
| III.4.3.5.L'unité administrative « AU-n »..... | 41 |
| III.4.3.6.Le groupe d'unités administratives..... | 41 |
| III.5.Multiplexage TDM (Time Division Multiplexing)..... | 42 |
| III.6.Multiplexage FDM (Frequency Division Multiplexing) | 43 |
| III.7. Principe de WDM | 44 |
| III.7.1.Fonctionnement général du WDM | 46 |

| | |
|---|----|
| III.7.2.Les différentes technologies du WDM | 47 |
| III.7.3.La liaison point a point optique | 48 |
| III.7.3.1.Les composants d'émission | 49 |
| III.7.3.1.1.Sources optique | 49 |
| A) Les sources à large spectre | 49 |
| B) Les sources à spectre réduit | 49 |
| Les diodes électroluminescentes(DEL) | 50 |
| Les diodes laser(DL)..... | 51 |
| III.7.3.1.2.La différence DEL/DL..... | 53 |
| III.7.3.1.3.La modulation | 54 |
| a)Modulation directe..... | 54 |
| b) Modulation externe..... | 55 |
| III.7.3.2.Composants de réception | 56 |
| III.7.3.2.1.Photodétecteurs | 56 |
| a)Effet photoélectrique..... | 57 |
| b) Différents types de photodétecteurs | 57 |
| c)Caractéristique d'un photodétecteur | 58 |
| d) Comparaison PIN/APD | 59 |
| III.7.3.3.Composants du canal de transmission | 60 |
| III.7.3.3.1.Fibre optique | 60 |
| III.7.4.L'exploitation des fibres optiques dans les liaisons DWDM | 60 |
| III.7.5.Caractéristiques de transmission..... | 61 |
| III.7.6.Raccordement des fibres optiques | 61 |
| III.7.7.Type de raccordement..... | 62 |
| III.7.7.1.Les raccordements fixes..... | 62 |
| a)La soudure | 62 |
| b) Le collage | 62 |
| c)Le sertissage..... | 62 |
| III.7.7.2.Les raccordements semi-fixes..... | 63 |
| III.7.7.3.Les raccordements démontables | 63 |
| III.8.L'avenir du WDM | 63 |
| Conclusion | 64 |

Chapitre IV : Composants optoélectroniques

| | |
|--|----|
| Introduction..... | 65 |
| IV. Amplificateur optique | 65 |
| IV.1.Généralités sur l'amplification optique | 66 |
| IV.2.Les amplificateurs à semi -conducteur(AOSC)..... | 66 |
| IV.3.Les amplificateurs à fibre dopée(EDFA)..... | 67 |
| IV.4.Comparaison des amplificateurs..... | 68 |
| IV.5.Utilisation de l'amplificateur optique..... | 68 |
| IV.6.Les atténuateurs, isolateurs et compensateurs de dispersion | 70 |
| IV.7.Les coupleurs | 70 |

| | |
|--------------------------------|----|
| IV.8.Les filtres optiques..... | 72 |
| Conclusion | 72 |

Chapitre V : Simulation d'une liaison haut débit avec COMSIS

| | |
|--|-----------|
| Introduction..... | 73 |
| V.1.Présentation du logiciel..... | 73 |
| V.1.1.L'éditeur de schéma- bloc..... | 73 |
| V.1.2.La bibliothèque | 74 |
| V.1.3.La simulation | 75 |
| V.2.Définition des paramètres | 78 |
| V.2.1.L'émetteur..... | 78 |
| V.2.2.La ligne de transmission | 81 |
| V.2.3.Le récepteur | 81 |
| V.3.Interprétation des résultats | 83 |
| V.4.Simulation I : Liaison point à point à haut débit à 10Gbit/s et 40Gbit/s codé par NRZ-I..... | 83 |
| A.1) Sans compensation | 83 |
| A.2) Avec compensation..... | 86 |
| V.5.Simulation II : Liaison point à point à haut débit à 10Gbit/s et à 40Gbit/s codé par HDB3 | 89 |
| B.1) Sans compensation..... | 89 |
| B.2) Avec compensation..... | 91 |
| conclusion | 95 |
| Conclusion générale..... | 96 |

Bibliographie

Introduction générale

Introduction générale

Il n'y a pas si longtemps, lorsque les systèmes numériques les plus rapides transmettaient l'information à quelques Mbits/s, le câble coaxial remplit parfaitement son rôle de support de transmission. Mais avec l'apparition des nouveaux services de communications, un besoin d'un débit de transmission d'informations plus élevé est apparu, et une alternative au câble coaxial était à trouver : perte très élevées, courtes distances de propagation, performances limitées. La fibre optique remplit très bien ce rôle de support de transmission le mieux adapté à la demande en bande passante. Son utilisation est désormais courante dans les réseaux de télécommunication, en effet, la fibre optique est une innovation relativement récente qui a rapidement pris un rôle prépondérant dans le monde des télécommunications pour sa capacité à véhiculer un grand nombre d'information sur une longue distance.

Les fibres optiques ont pour rôle principal de propager la lumière avec un affaiblissement aussi faible que possible d'un module émetteur à un module récepteur. La principale limitation des systèmes de transmission par fibre optique est aujourd'hui l'atténuation et la dispersion du signal occasionné par la propagation dans la fibre optique, et pour remédier à ça les concepteurs ont mis en considération des combinaisons variées de composants optoélectroniques (Amplificateur optique et compensateur de dispersion DCM.....) afin d'obtenir les performances souhaitées pour la liaison.

Le premier réseau de transmission numérique était basé sur la hiérarchie numérique plésiochrone (PDH). Cependant cette hiérarchie était peu flexible et s'est retrouvée incapable de satisfaire les exigences croissantes des réseaux de transmission modernes. D'où la nécessité de normaliser une nouvelle hiérarchie numérique synchrone (SDH). La SDH élargit les principes de la hiérarchie PDH en définissant de nouveaux niveaux administratifs qui découlent de l'entrelacement direct des octets pour un traitement plus souple des voies de transmission et pour une gestion plus élaborée.

L'évolution de SDH permet aujourd'hui d'atteindre des records en termes de débit. Mais elle fait face à une réalité économique qui est l'apparition d'une nouvelle technologie permettant la mise en place de réseaux tout optique de type WDM à $N \times 10 \text{ Gbit/s}$ de débit. Ce dernier permet de transporter plusieurs signaux sur une seule fibre optique en leur affectant une longueur d'onde différente. Mais surtout, il présente l'avantage d'exploiter les fibres

Introduction générale

existantes sans modifier l'infrastructure physique. Dès lors, la course au record en termes de capacité fut lancée pour atteindre de nos jours la barrière du Térabit/s.

Les systèmes optiques font appelle a une technologie souvent très complexe et pointue. Il s'avère nécessaire de pouvoir prédire les performances et choisir les composants avant de la réalisation d'un système. Des études de cas sont effectuées à l'aide du logiciel de simulation (COMSIS).

Cette étude se compose de deux sous ensembles.

Dans un premier temps, nous avons étudié la caractéristique d'une liaison optique point à point.

Dans un second temps, nous avons utilisé le logiciel de simulation COMSIS, outil qui permet de modéliser, simuler, analyser et concevoir tout système complet de communication optique. Les exemples de simulation effectués sur COMSIS traitent la transmission des données on forme binaire codé NRZ-I et HDBn.

Chapitre I :

Généralités sur la fibre optique

Introduction :

La transmission des signaux peut s'effectuer soit à l'aide d'un support (on parle d'onde guidée), soit en espace libre (on parle de propagation radioélectrique ou hertzienne). L'onde guidée, par un support métallique ou par fibre optique, bénéficie d'un indéniable avantage de fiabilité et de sécurité, qui suppose néanmoins des investissements et des délais de mise en œuvre importants. Les supports métalliques sont utilisables pour la transmission jusqu'aux fréquences de l'ordre de 60 MHz. La fibre optique permet maintenant de grandes capacités de débit numérique sur de grandes distances.

L'espace libre permet la propagation des fréquences comprises entre quelques dizaines de kilohertz et plusieurs centaines de gigahertz. Les fréquences radioélectriques sont en quantité limitée, la qualité de transmission demeure fragile et peu sécurisée, mais la mise en œuvre est rapide.

I.1. Les supports libres :

I.1.1. Les faisceaux hertziens :

Les faisceaux hertziens (microwaves ou radiolinks) occupent la gamme des hyperfréquences du spectre de 2 à 40 GHz. Alors que les fréquences plus basses peuvent se propager par ondes de sol ou par réflexion ionosphérique, les faisceaux hertziens utilisent la propagation en espace libre d'ondes en vue directe, ne nécessitant pas de support matériel (en dehors des antennes paraboliques).

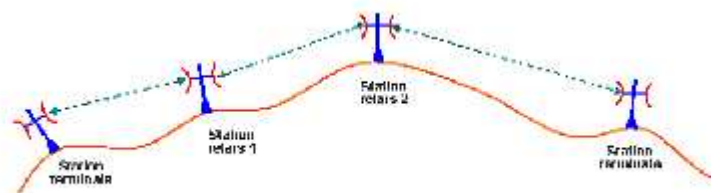


Figure.I.1. la liaison hertzienne

Chapitre I : Généralité sur la fibre optique

I.1.2.Liaison par satellite :

Les satellites de télécommunications ont pour vocation de constituer des liaisons très longues (intercontinentales ou nationales, point à point ou point à multipoint) ou des liaisons d'applications spécifiques, là où l'investissement en câbles s'avérerait peu réaliste financièrement ou techniquement.

La propagation des ondes pour les satellites obéit aux mêmes lois que celles des faisceaux hertziens. La différence porte sur la faible épaisseur de la couche atmosphérique traversée, ce qui fait que les satellites souffrent très peu des dégradations dues au fading (mot anglais indiquant un évanouissement progressif et temporaire du signal utile). Cependant, les liaisons satellites peuvent être perturbées, comme les faisceaux hertziens, par les ondes électromagnétiques générées par les éruptions solaires ou bien affaiblies par les pluies, notamment en bande 12-14GHz, ou par le givre. Enfin, aux équinoxes, lorsque le soleil se trouve dans l'axe de l'antenne, les antennes de réceptions sont aveuglées par le soleil pendant 5 à 20 minutes selon latitude.

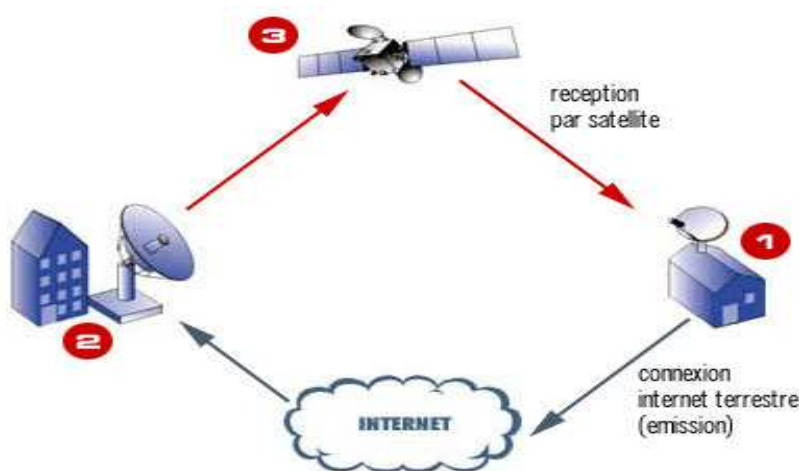


Figure.I.2. liaison satellitaire

On peut distinguer quatre principaux types de satellites : les satellites à orbite basse de défilement, les satellites héliosynchrones, les aéronefs stratosphériques et les satellites géostationnaires comme Le montre tableau suivant :

Chapitre I : Généralité sur la fibre optique

| | GEOs | MEOs | LEOs |
|------------------|---|--|---|
| Altitude | 36000km | 13000km | 640 à 600km |
| Temps de transit | 0,25 à 0,50 s | 0,10 s | 0,05 s |
| Application | Diffusion radio et TV VSAT,connexions point à point | Téléphonie mobile Donnée faible débit | Téléphonie mobile Données à faible et à haut débit |
| Débit binaire | Jusqu'à 155Mbit/s | De 9,6 à 38,4Kbit/s | Petits LEOs : 2,4 à 300 Kbit/s Gros LEOs : 2,4 à 9,6 Kbit/s LEOs : large bande : De 16Kbit/s à 155Mbit/s |

Tableau. I.1. Différents types de satellites de télécommunications.

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 du diélectrique entre les deux conducteurs est faible, la ligne bifilaire a des pertes nettement moins élevées que le câble coaxiale, 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 locale très élevées (intensité importante); c'est pour cela qu'elle est utilisée pour l'alimentation d'antennes à impédance élevée.

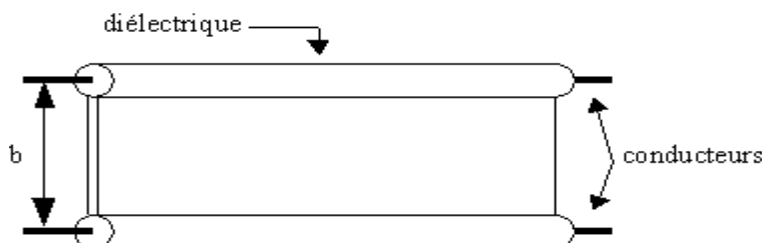


Figure .I .3. La ligne bifilaire parallèle

I.2.2.Paire torsadée :

Les lignes téléphoniques-ou paires torsadées sont les supports de transmission les plus connus et les plus répandus. Elles servent à raccorder directement l'abonné au réseau téléphonique au central le plus proche ou bien à l'autocommutateur local, Les liaisons de quatre fils, les doubles paires torsadées, permettent de relier l'autocommutateur local aux autocommutateurs à autonomie d'acheminement.

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

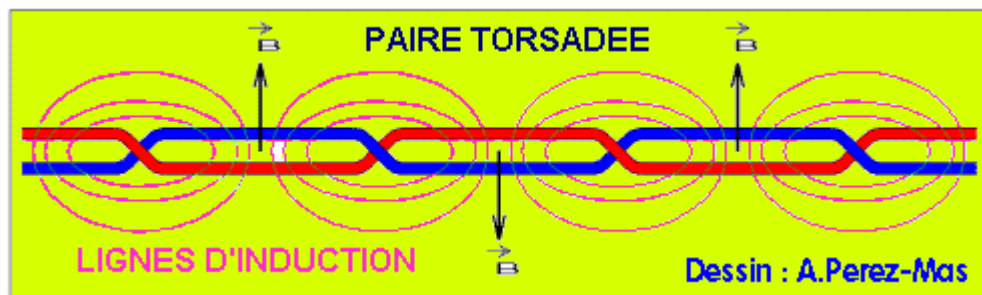


Figure. I.4. Paire torsadée

Les vecteurs inductions créés par des torsades successives sont opposées donc s'annulent, provoquant ainsi 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, séparé par un isolant de qualité (Téflon, polythène, polypropylène, air...). 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 télédiffusion.

Il est constitué de deux conducteurs : le cœur (l'âme), fil de cuivre entouré d'une gaine isolante elle même entourée par une tresse de cuivre (conducteur extérieur), le tout est recouvert d'une gaine isolante. Sa bande passante est de 150 MHz, il est caractérisé par un

Chapitre I : Généralité sur la fibre optique

encombrement supérieur à celui de la paire torsadée. Ces performances n'atteignent pas celles de la fibre optique. Il a tendance à disparaître des plans de câblage.

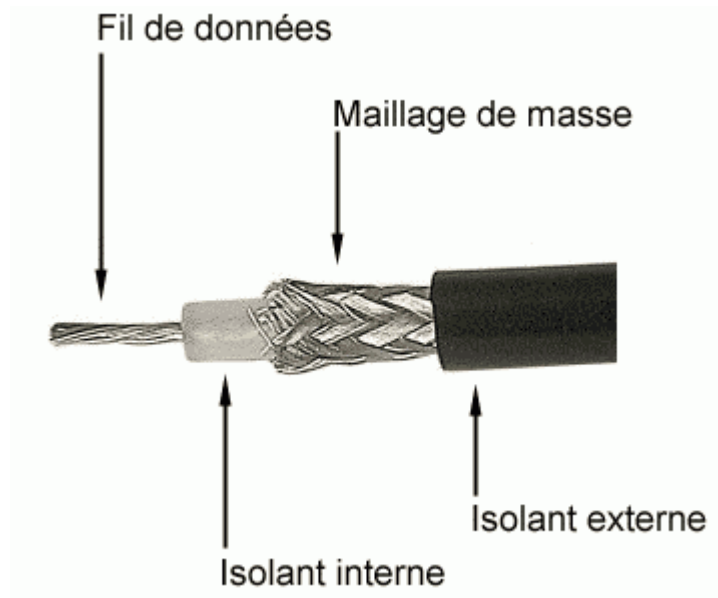


Figure. I.5. Câble coaxial

I.2.4. Les guides d'ondes :

Représentent pratiquement sous forme de tuyaux métalliques creux, diélectriques ; les guides d'ondes servent comme des 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 laquelle, les ondes peuvent être transmises dans un guide.
- Énergie électromagnétique : c'est l'énergie transportée à l'intérieur d'un guide d'onde.

I.3. Les supports optiques : [1] ,[3] ,[5],[7]

I.3.1. 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 photodétecteur.

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 grandes distances. Cette technologie est appelée Wi-Op (Wireless Optical Broadband). Les signaux sont émis par un laser et reçu par un photorécepteur pouvant être à une distance d'un kilomètre. Chaque antenne étant constituée d'un couple émetteur/récepteur, les Communications sont bidirectionnelles (full duplex).

I.3.2. La fibre optique :

I.3.2.1 Description :

Une fibre est constituée par deux couches de matériaux transparents à base de silice appelées le cœur, et la gaine optique qui entoure le cœur, (Figure I.6).

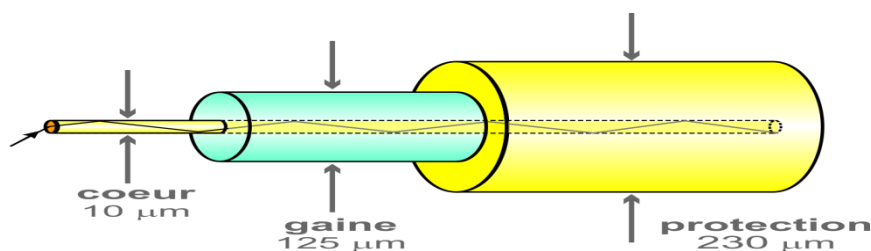


Figure I.6. Description de la fibre optique

Une fibre a des dimensions de l'ordre de la centaine de micromètre. Le diamètre de la gaine est en général de 125 µm mais peut aussi être de 140 µm (cas de certaines fibres multimodes). Le rayon du cœur, quant à lui varie entre est de 10 à 100 µm.

Chapitre I : Généralité sur la fibre optique

I.3.2.2. Le guidage de signal optique dans une fibre :

Dans une fibre optique standard, la différence d'indice entre le cœur et la gaine est souvent faible, de l'ordre de quelques 10^{-3} . On réalise alors l'approximation en guidage faible

Lorsque :

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

Avec Δ , différence relative d'indice.

Le guidage du signal optique est basé sur la loi de Descartes. La lumière se propage le long de la fibre par réflexions successives entre le cœur et la gaine (figure. I.7). Cela n'est possible que si le cœur et la gaine sont constitués de matériaux transparents et que l'indice de la gaine est inférieur à celui de cœur (une différence de quelques % est suffisante).

La seconde condition est d'envoyer le signal lumineux dans la fibre avec un angle, par rapport à l'axe, inférieur à l'ouverture numérique. L'ouverture numérique (O.N) représente l'ouverture angulaire limite avant une transmission et non une réflexion totale sur le dioptré cœur gaine de la fibre.

$$ON = \sin(\theta_{OL}) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad [$$

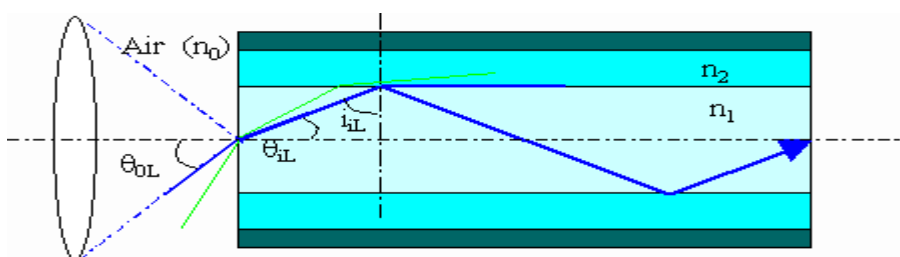


Figure .I.7. Ouverture numérique d'une fibre optique

Afin de faciliter l'injection de la lumière dans la fibre à l'entrée, on a intérêt à avoir l'angle limite θ_{OL} le plus grand possible. Ceci s'obtient pratiquement en choisissant des indices n_1 et n_2 très proches.

I.3.2.3 La réflexion totale interne :

Le principe de la réflexion totale interne est à la base de la propagation des ondes lumineuses dans la fibre optique. D'après ce principe, lorsqu'un rayon lumineux passe d'un milieu à un autre dont l'indice de réfraction est plus faible, il peut être réfléchi. De plus, lorsque l'angle d'incidence du rayon lumineux est plus grand que l'angle critique, la lumière est réfléchie en totalité et il n'y a aucune perte de lumière (figure I.8).

La réflexion totale interne est régie par deux facteurs : les indices de réfraction des deux milieux et l'angle critique. Ces facteurs sont reliés par l'équation suivante :

$$\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

En connaissant les indices de réfraction des deux matériaux de l'interface, l'angle critique peut facilement être calculé.

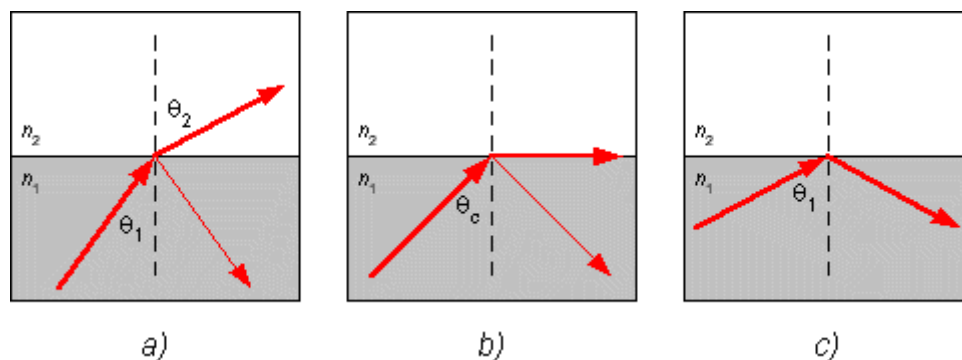


Figure .I.8.La réflexion total interne

a) Réfraction d'un rayon lumineux pour $\theta_1 < \theta_c$, le rayon incident est aussi partiellement réfléchi dans le premier milieu.

b) rayon critique lorsque $\theta_1 = \theta_c$.

c) réflexion totale interne pour $\theta_1 > \theta_c$.

Chapitre I : Généralité sur la fibre optique

Physiquement, l'indice de réfraction d'une substance est le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide (c) et sa vitesse dans le matériau (v).

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

La lumière voyage donc plus rapidement dans un matériau avec un indice de réfraction plus petit. Il est à noter que l'indice de réfraction du vide est de 1. On dit aussi que l'indice de l'air est égal à 1 puisque la vitesse de la lumière dans l'air est à peu près égale à celle dans le vide. En comparaison, l'indice de réfraction de l'eau est de 1,33. Notez bien que l'indice de réfraction est une quantité qui n'a pas d'unité, puisqu'il s'agit d'un rapport entre deux vitesses, et qu'il est toujours plus grand ou égal à 1.

I.3.2.4. Caractérisation de la fibre :

Les principales caractéristiques des fibres optiques sont l'atténuation, la dispersion et la bande passante que nous allons présenter :

a. L'atténuation :

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

- ❖ Pertes intrinsèque : dépendent de la nature physico chimique de la fibre optique.
- ❖ Pertes par absorption moléculaire : elles sont causées par l'absorption des rayons optiques par la silice et les impuretés contenus dans celle-ci.
- ❖ Les irrégularités involontaires de structure provoquent des pertes par diffusion (diffusion Rayleigh).
- ❖ Pertes extrinsèques : dépendent du couplage fibre-fibre ou fibre-composants.
- ❖ Les pertes dues aux conditions d'utilisation des fibres. Toute courbure trop serrée crée des pertes par rayonnement.
- ❖ Les microcourbures 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 finie, raccordés entre eux. Chaque jonction peut provoquer une perte de raccordement.

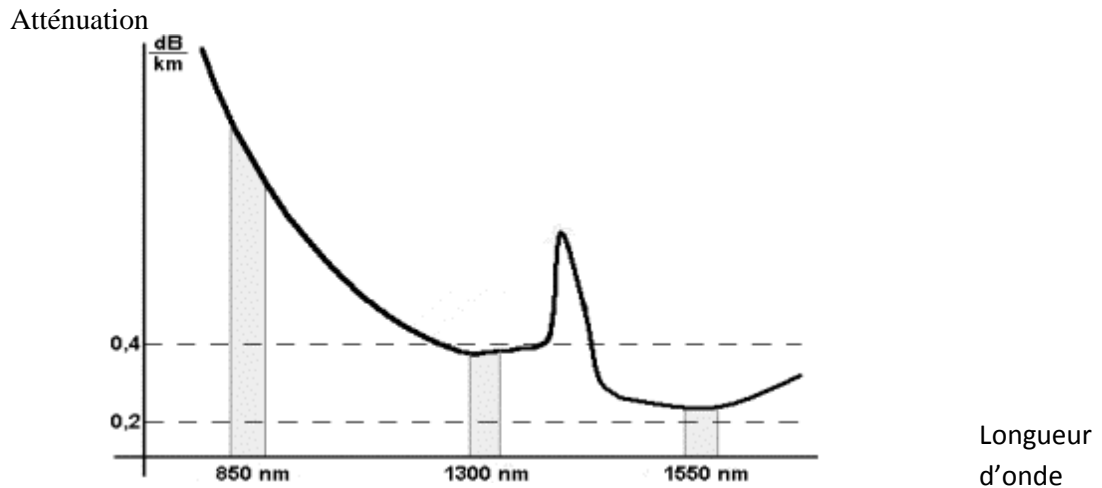


Figure. I.9. l'atténuation spectrale d'une fibre en silice.

L'atténuation minimale de 0,22 dB/km n'est pas très loin du minimum théorique pour la silice. La différence s'explique par le fait que l'on ne peut pas utiliser de la silice pure. On doit doper soit le cœur, soit la gaine et cela augmente les fluctuations de composition et donc les pertes par absorption.

b.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 deux types de dispersion :

❖ Dispersion chromatique (intramodale) :

La dispersion chromatique est la combinaison de deux types de dispersion : la dispersion du matériau et la dispersion du guide d'onde.

- ✓ La dispersion du matériau est causée par la dépendance de l'indice de réfraction de la longueur d'onde.

En effet la dispersion du matériau est très petite à par rapport à la longueur d'onde d'environ 1300nm, cette dispersion existe dans toute les fibres optique qu'elle soit monomode ou multimode.

Chapitre I : Généralité sur la fibre optique

- ✓ La dispersion du guide d'onde est particulièrement importante pour les fibres monomodes. Elle est causée par le fait que la répartition de la lumière du mode fondamental sur le cœur et la gaine dépend de la longueur d'onde.

La dispersion totale est la somme des dispersions due au matériau et la dispersion du guide d'onde.

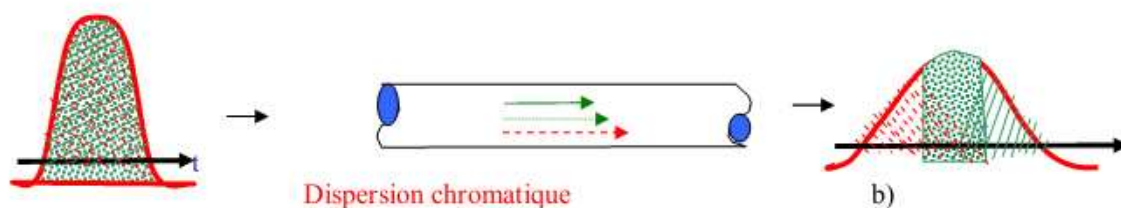
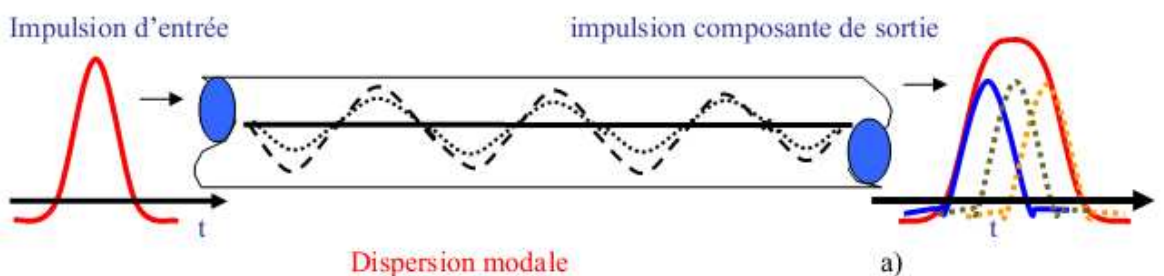
- ❖ **Dispersion modale (ou intermodale) :** Dans une fibre optique multimode se propagent plusieurs modes, chacun suivant une trajectoire différente.

L'énergie lumineuse transmise dans la fibre se répartie entre les différents modes qui se propage dans le cœur.

L'ensemble des retards entre les différents rayons composant le signal lumineux détermine en réception une distorsion du signal électrique obtenu par le convertisseur optique - électrique ; cette distorsion est la Dispersion Modale.

- **Effets de la dispersion modale et chromatique :**

Les effets de la dispersion modale et chromatique sur la propagation de l'impulsion optique le long de la fibre, illustrée par la figure et mettant en évidence, comment les différents comportements des composantes de l'impulsion déterminent la distorsion de celle-ci en réception.



Chapitre I : Généralité sur la fibre optique

- a) L'impulsion en réception est la somme des impulsions composantes qui se propagent en temps différents (parcours différents)
- b) propagation avec des vitesses différentes, des différentes composantes du signal de longueurs d'ondes diverses.

Il existe aussi un autre type de dispersion :

❖ Dispersion de polarisation :

Cette dispersion due à la biréfringence de la fibre, provoque une déformation des impulsions lumineuses par le fait que les deux principaux états de polarisation ont des constantes de propagation légèrement différentes.

Il en résulte que les états de polarisation des bords et du centre des impulsions différentes de plus en plus au cours de la propagation, d'où leur déformation.

Pour pouvoir compenser avec précision la dispersion de polarisation de la fibre installée, il est nécessaire de l'avoir préalablement mesurée. Les recherches effectuées dans ce domaine ont surtout pour objectif de comparer la précision de différents procédés de mesure.

c. 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 :

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

B_m : bande résultante de la dispersion modale

B_c : bande dérivante de la dispersion chromatique

Chapitre I : Généralité sur la fibre optique

Dans la fibre multimodes la bande totale dépend uniquement de la bande modale.

Fibre multimode $B_T = B_m$

Dans la fibre monomode la bande totale est déterminée uniquement par la bande chromatique.

Fibre monomode $B_T = B_c$

- bande modale : B_m

La valeur de la bande modale normalement référencée à 1000 m de longueur notée B_{m_0} est donnée par le constructeur. Pour calculer la bande modale (B_m) d'une liaison en fibre optique on doit appliquer la relation :

$$B_m = \frac{B_{m_0}}{L^\gamma}$$

B_{m_0} : Bande modale par unité de longueur.

L : Longueur de la liaison fibre optique.

γ : Facteur de concaténation des modes renseigne sur le degré de couplage.

- bande chromatique : B_c

La dispersion chromatique est d'autant plus importante que la largeur du spectre lumineux de la source est plus large. Pour cela on doit tenir compte dans le calcul de la bande chromatique B_c .

$$B_c = \frac{0.44 \cdot 10^{-6}}{\mu \Delta \lambda L}$$

$\Delta \lambda$: Largeur spectrale de la source à mi amplitude.

L : longueur de la liaison FO

μ : Coefficient de dispersion chromatique.

I.3.2.5 Les différents types de fibre optique :

Il existe deux types de fibre monomode et multimode. Les fibres multimodes, à leur tour, peuvent être divisées en :

a- Fibre multimode :

- **Fibre multimode à saut d'indice :**

Le cœur et la gaine présentent des indices de réfraction différents et constants. Le passage d'un milieu vers l'autre est caractérisé par un saut d'indice. Le faisceau lumineux injecté à l'entrée de la fibre va atteindre la sortie en empruntant des chemins optiques différents ce qui se traduit par des temps de propagation différents et donc un étalement du signal transmis. (fig.I.10)

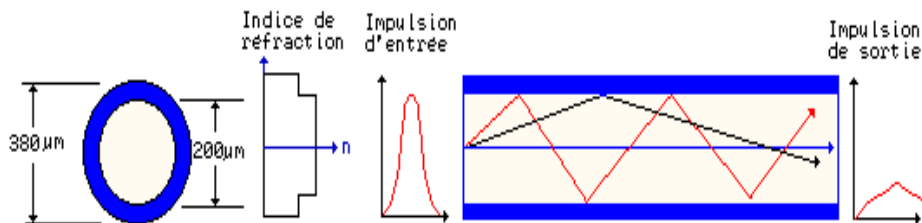
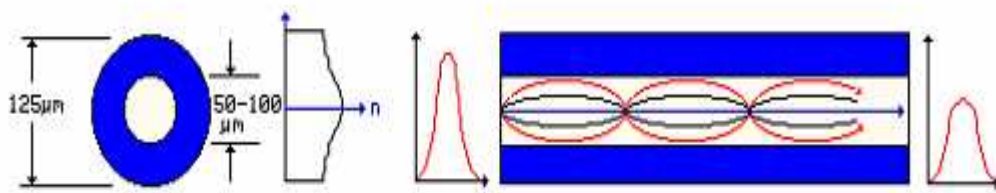


Figure I.10. La fibre multimode à saut d'indice

Les différents rayons empruntent des trajectoires différentes leurs chemins optiques et leurs temps de propagation sont différents. Il en résulte donc une dispersion intermodale. Pour diminuer cet effet, le profil d'indice de cœur peut être modifié de telle sorte à créer un « gradient d'indice ».

- **Fibre multimode à gradient d'indice :**

Le cœur se caractérise par un indice variable qui augmente progressivement de n_1 à l'interface gaine-cœur jusqu'à n_2 au centre de la fibre. Là aussi les rayons lumineux vont emprunter des chemins différents, mais un choix judicieux du profil d'indice du cœur permet de tendre vers des temps de parcours voisins et donc réduire l'étalement du signal (fig. I.11).



b- Figure I.11 .La fibre multimode à gradient d'indice.

Dans une fibre monomode, on obtient un seul mode grâce à la très faible dimension du cœur (diamètre de 10 μm et moins). Ainsi le chemin de la lumière est imposé, c'est le mode TEM₀₀. Le nombre de modes se propageant dans une fibre optique est donné par la relation suivante :

$$m = \frac{2d}{\lambda} \cdot ON$$

Avec : d : le diamètre du cœur de la fibre,

λ : La longueur d'onde de la lumière utilisée,

ON : l'ouverture numérique de la fibre.

En choisissant **d** suffisamment faible, il est possible d'avoir un seul mode de propagation ($m=1 \Leftrightarrow$ fibre monomode). Le chemin de propagation est ainsi unique et parallèle à l'axe de la fibre (fig. I.12). Théoriquement le signal injecté en entrée va atteindre la sortie sans aucune déformation. C'est ce type de fibre qui présente les plus grandes performances mais son coût est relativement élevé par rapport aux fibres multimodes.

b. Fibre monomode :

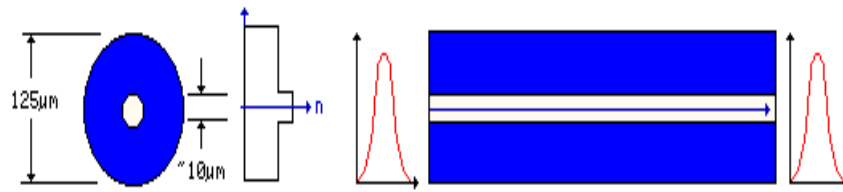


Figure. I.12. Fibre monomode

La fibre monomode dont le cœur est si fin que le chemin de propagation des différents modes est pratiquement directe. La dispersion modale devient quasiment nulle. La bande passante transmise est presque infinie (>10 GHz/Km). Cette fibre est utilisée essentiellement pour les communications à grande distance.

Le petit diamètre du cœur (10 μm) nécessite une grande puissance d'émission, donc des diodes au laser qui sont relativement onéreuses.

I.4.3. Fibre en télécom :

A. Utilisation de différente fibre optique :

| <u>Fibre monomode</u> | <u>Fibre multimode</u> |
|--|-------------------------------|
| Faible dispersion | Forte dispersion |
| Connexion délicate | Connexion facile |
| Faible atténuation | Forte atténuation |
| Hauts débits, longues distances | Réseaux locaux |

B. Les applications de la fibre monomode :

Les applications de la fibre optique monomode sont nombreuses, les plus connues concernent :

- ❖ les télécommunications, pour la réalisation des réseaux hauts débit à grande distance en technologie WDM, SDH, ATM.
- ❖ l'audiovisuel, pour la réalisation des réseaux câblés de télévision en association avec le câble coaxial utilisé pour le raccordement de l'abonné.
- ❖ La médecine, où la fibre optique est notamment utilisée.

Chapitre I : Généralité sur la fibre optique

- ❖ En chirurgie, pour transporter le faisceau laser jusqu'au tissu à traiter.
- ❖ En endoscopie, pour éclairer l'intérieur du corps et transmettre les images jusqu'au médecin.
- ❖ L'éclairage (muséographique, architectural, espaces d'agrément publics ou domestiques).
- ❖ La décoration/illumination de piscines, bassins, fontaines,
- ❖ La signalétique d'orientation de l'information (panneaux de signalisation et enseignes).
- ❖ La signalisation routière (rond points, séparation de voies de circulation).

C .Avantages et inconvénients des fibres optiques :

C.1. avantages :

Ils sont nombreux, on peut les classer comme suit :

- ❖ performances de transmission : très faible atténuation, très grande bande passante, multiplexage possible de plusieurs signaux ; elles permettent aux systèmes d'avoir une portée et une capacité très supérieures à celles des câbles conducteurs.
- ❖ Avantage de mise en œuvre : très petite taille, grande souplesse, faible poids, appréciables aussi bien en télécommunications que pour le câblage en informatique, aéronautiques, applications industrielles.
- ❖ Sécurité électrique : isolation totale entre terminaux, utilisation possible en ambiance explosive ou sous forte tension.
- ❖ Sécurité électromagnétique : la fibre optique n'est pas sensible aux parasites et n'en crée pas elle-même.
- ❖ Avantage économique : contrairement à l'idée encore répandue, le coût global d'un système sur fibre optique et de plus en plus souvent inférieur à celui d'un système sur cuivre.

C.2. inconvénients :

- ❖ la fibre optique ne permet pas le transport d'énergie.
- ❖ Les répéteurs doivent être alimentés séparément, soit localement, soit par second câble électrique, soit par un câble mixte optique et électrique.

Chapitre I : Généralité sur la fibre optique

- ❖ les techniciens des installations doivent protéger les yeux. Il est indispensable de porter des verres de protection infrarouge pour travailler de près sur un dispositif en fonctionnement.
- ❖ perte de raccordement entre différents composants optiques du système.
- ❖ Parmi les pertes de raccordement on trouve :
 - pertes de couplage à la source : une partie seulement de la puissance émise par le laser sera captée par la fibre à cause de la désadaptation entre eux.
 - pertes d'épissure : elle est due à cause d'une discontinuité des rayons, une erreur d'espacement, une erreur d'excentrement, une erreur d'alignement angulaire.

Conclusion :

Les fibres optiques possèdent de nombreuses qualités pour transmettre une grande quantité d'informations sur de longues distances. Plusieurs de leurs défauts ont été énumérés (par exemple la dispersion chromatique) et des solutions sont proposées pour les corriger (fibres de compensation), ces solutions sont apparus sur le marché depuis quelques années (des amplificateurs optiques pour remédier à l'atténuation du signal dans les fibres).

Chapitre II :

Technique de codage

Chapitre II : Technique de codage

Introduction :

Transmettre un signal numérique consiste à reconstituer, à la réception, le signal original et à en extraire l'horloge (phase et fréquence). Cette horloge est utilisée aussi bien pour des opérations de décision que pendant les opérations de conversion (numérique analogique) et éventuellement lors du multiplexage.

Au cours de sa propagation, le signal numérique subit une détérioration (élargissement de l'impulsion) due au caractère dispersif de la fibre. Cet élargissement se traduit par le phénomène d'interférences intersymboles.

La qualité d'une liaison numérique est caractérisée par le taux d'erreur qui est donné par :

$$TEB = \frac{\text{Nombre de bits erronés}}{\text{Nombre de bits reçus}}$$

Un système de transmission pour objectif d'acheminer à partir d'une source. Ou émetteur, une information vers un destinataire, ou récepteur. Nous allons donc commencer par décrire brièvement qui doit être transmise.

II .1 Numérisations des signaux téléphoniques :

Pour transmettre un signal $f(t)$ d'un émetteur à un récepteur, il n'est pas nécessaire de transmettre ce signal de manière continue. Il est parfois utile de ne transmettre que des éléments discrets du signal analogique continu prélevés à des instants de temps réguliers. L'intérêt de la modulation par impulsion et codage réside dans la représentation numérique d'informations analogiques. Elle permet de remplacer la transmission d'informations analogiques telles que la parole et la musique par une transmission de type « télégraphique » de symboles discrets de nombre fini (l'information numérique).

Malgré la conversion analogique/numérique nécessaire pour la transmission numérique des informations d'une source analogique vers un destinataire qui exige le retour à une forme analogique, la modulation PCM (Pulse Code Modulation) présente un intérêt croissant.

Chapitre II : Technique de codage

*II.1.1.Principe de la modulation MIC:[M.2]

Pour passer d'un signal à variation continue, porteur d'informations analogiques, à une suite de symboles discrets, choisis parmi un ensemble déterminé de symboles possibles, la modulation MIC procède en quatre étapes fondamentales, à savoir l'échantillonnage, la quantification, la compression et le codage.

- **L'échantillonnage :**

L'échantillonnage consiste à prélever périodiquement de brefs échantillons de fréquence (F_e) sur un signal $S_1(t)$ pour obtenir un nouveau signal $S_2(t)$ identique à $S_1(t)$ pendant de brefs instants de durée t et nul entre $T_e - t$ selon le théorème de SHANNON.

Cette opération revient donc à multiplier le signal $S_1(t)$ par un train d'impulsions rectangulaire $U_p(t)$ d'amplitude égale à l'unité.

Théorème de SHANNON

Un signal qui ne contient aucune composante de fréquence supérieure à une fréquence maximale F_{\max} (spectre borné) est entièrement déterminé par des échantillons équidistants prélevés avec une fréquence F_e telle que $F_e \geq 2 F_{\max}$.

- **La quantification :**

Elle consiste à donner à chaque échantillon une valeur prise dans une échelle de valeur. L'erreur effectuée dans l'approximation est appelée bruit de quantification .

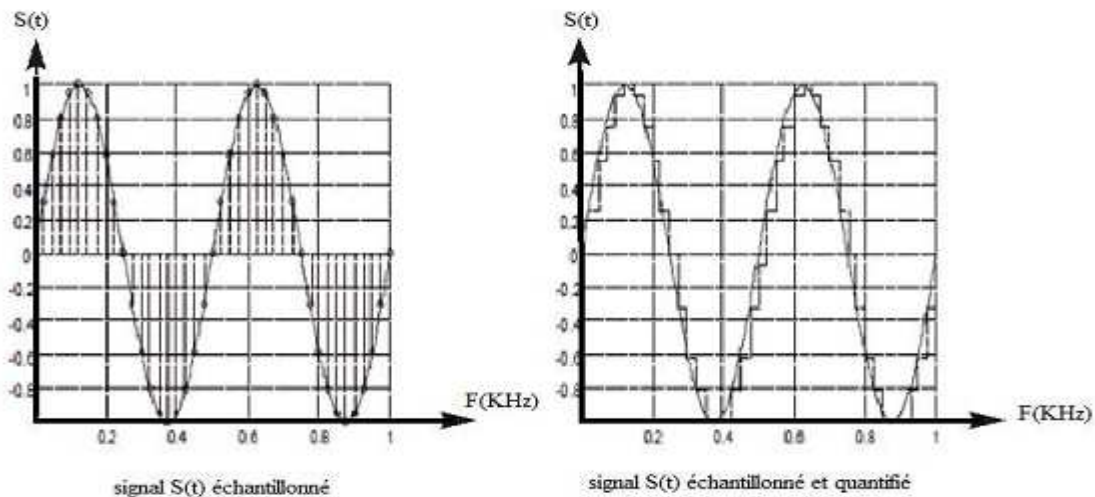


Figure .II.1. L'échantillonnage et la quantification d'un signal analogique $S(t)$.

- **Le codage :**

Attribution d'un symbole binaire à chacun des q niveaux de quantification sans influence sur la qualité de la modulation, mais peut influencer les propriétés de transmission.

Chaque échantillon sera codé sur un ensemble de bits. Pour permettre le codage des différentes valeurs, huit bits seront nécessaires. Ainsi, pour le signal téléphonique (4KHz), nous avons 8000 échantillons/S codés sur 8 bits / échantillon

- **La compression :**

C'est une opération purement logique qui consiste à confondre certaines plages obtenues par une quantification linéaire pour obtenir un mot de 8 éléments binaires. Pour coder les échantillons compris entre 0 et 1, on trouvera 32 échelons sur la loi linéaire qui va falloir compresser en 16 échelons.

Enfin il faut diminuer la taille des échelons pour les niveaux faibles, ceci a pour but d'augmenter la valeur du rapport signal/bruit (S/B).

Il existe deux lois de compression définies par l'Union International des Télécommunications (UIT):

Chapitre II : Technique de codage

- La loi américaine dite la loi μ .
- La loi européenne dite la loi A.

La loi μ

La loi μ est une loi logarithmique continue, elle a pour équation :

$$Y = \frac{\ln(1 + \mu x)}{\ln(1 + \mu)} \text{ avec } \mu = 100 \text{ ou } \mu = 225.$$

La loi A :

Cette loi normalisée par l'UIT est donc celle que nous trouvons désormais sur tout le matériel numérique. A cette loi sont associés 28 échelons pour l'échelle de quantification.

Les équations qui définissent cette loi sont :

Pour la partie linéaire : $Y = Ax / (1 + \ln A)$.

Pour la partie logarithmique : $Y = [1 + \ln(Ax)] / (1 + \ln A)$. Avec $A = 87.6$.

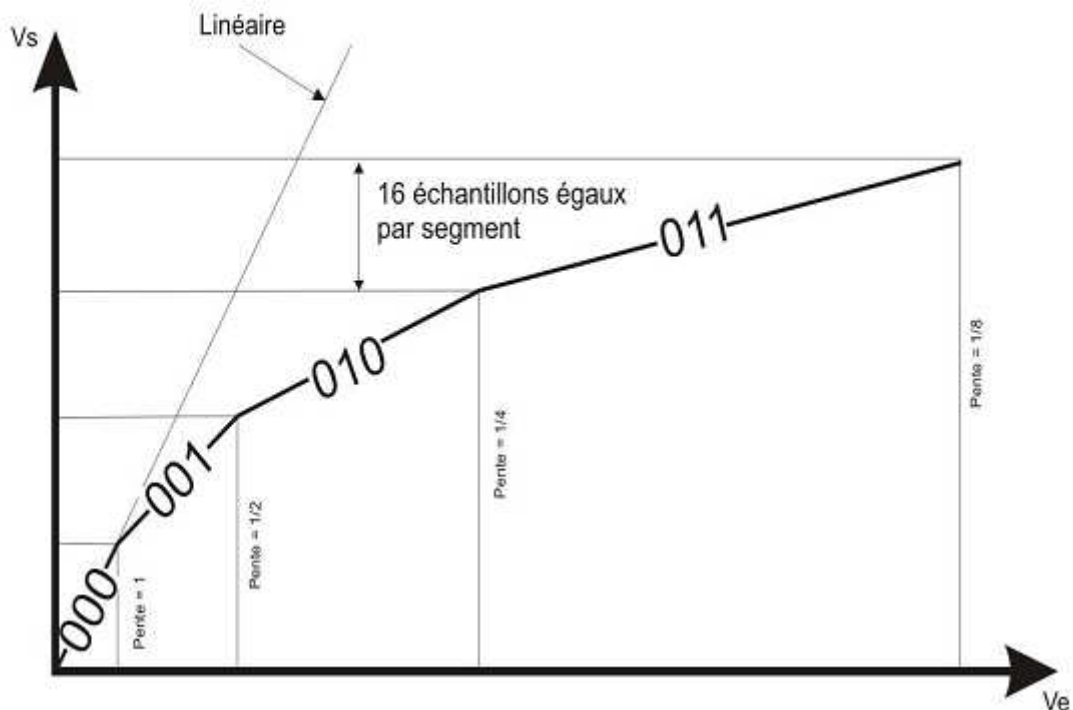


Figure.II.2. Compression du signal avec la loi A

II.2 Codage binaire du signal :[L.1] ,[L.7]

L'information que nous venons de définir est une grandeur abstraite et immatérielle, dans le cas numérique c'est simplement une suite de nombres. Pour la transmettre il faut "imprimer" sur des signaux physiques, en générale électriques ou électromagnétiques. C'est cette opération que l'on appelle "codage binaire du signal".

II.2.1 Quelques exemples de codes en ligne :

Il existe une grande variété en ligne développés depuis le début de la transmission numérique. Le choix est dicté en particulier par la densité spectrale de puissance de signal aléatoire.

II.2.2. Représentation des signaux codés :

Parmi les codes les plus utilisés nous citerons les codes NRZ et HDBn :

Pour l'ensemble des différents codes décrits, nous prendrons la même suite binaire afin de permettre la comparaison : 1 0 0 0 0 1 0 1 1 1 1

a) Codage NRZ (Non Return to Zero):

Principe : très proche du codage binaire de base, il code un 1 par +V, un 0 par -V

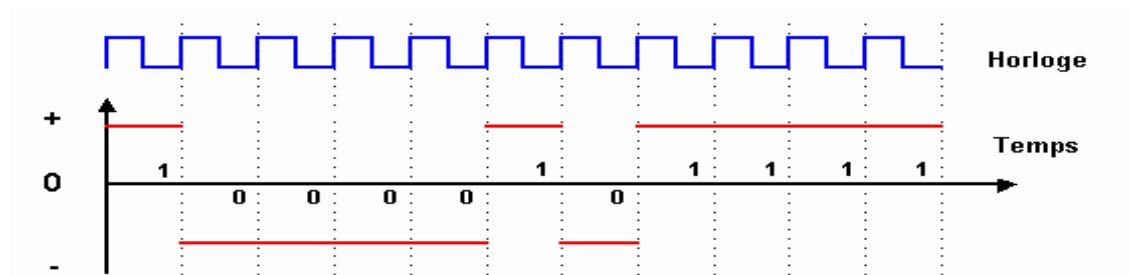


Figure II.3.Codage NRZ

Le codage NRZ améliore légèrement le codage binaire de base en augmentant la différence d'amplitude du signal entre les 0 et les 1. Toutefois les longues séries de bits identiques (0 ou 1) provoquent un signal sans transition pendant une longue période de temps, ce qui peut engendrer une perte de synchronisation.

Chapitre II : Technique de codage

Le débit maximum théorique est le double de la fréquence utilisée pour le signal : on transmet deux bits pour un hertz.

Particularités de code NRZ:

- Possède une composante spectrale non nulle.
- Plusieurs séquences de zéros ne contiennent aucune information sur le rythme. Pour éviter de longues séquences de zéros (de un) on utilise un brouilleur à l'émission et un débrouilleur à la réception. Le brouillage est une opération qui consiste à émettre avec le signal, une séquence pseudo-aléatoire que l'on élimine à la réception à l'aide du débrouilleur.
- Grande facilité de mise en œuvre.

b) Codage HDBn (Haute Densité Binaire d'ordre n) : Utilisation : HDB3

Principe : le principe de base est le même que pour le codage bipolaire, mais pour éviter une trop longue série de 0, on introduit un bit supplémentaire au signal pour terminer une série de n 0 consécutifs. Ce bit supplémentaire est de même phase que le dernier 1 transmis pour pouvoir l'identifier, afin qu'il ne soit pas pris en compte dans l'information transmise.

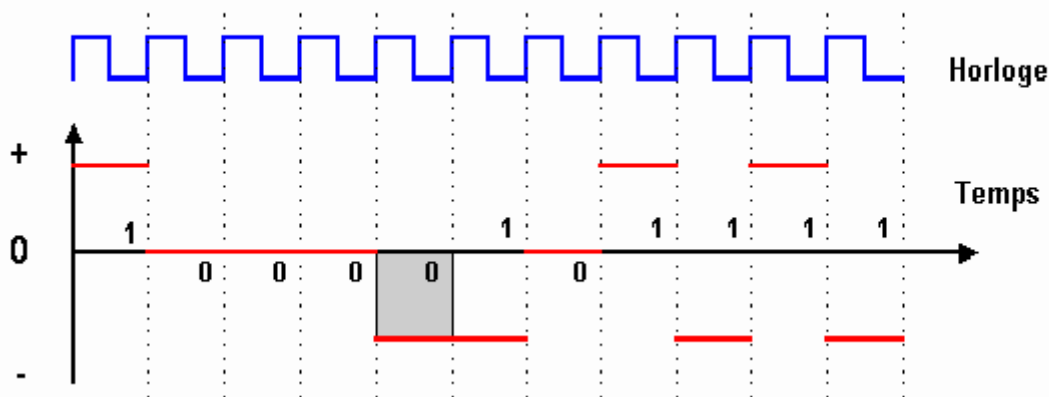


Figure .II.4. code HDBn

c) Codage NRZI (Non Return to Zero Inverted)

Principe : on produit une transition du signal Spour chaque 1, pas de transition pour les 0.

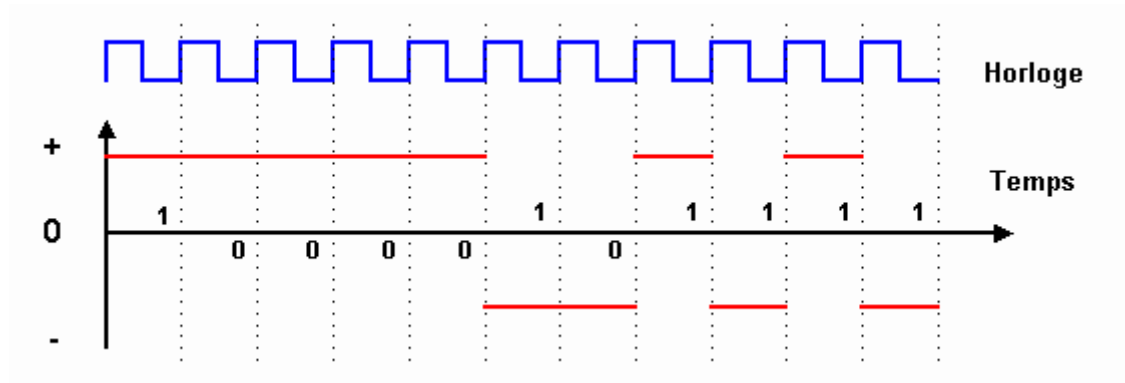


Figure II.5. Code NRZIS

Avec le codage NRZI, on voit que la transmission de longues séries de 0 provoque un signal sans transition sur une longue période. Le débit binaire est le double de la fréquence maximale du signal : on transmet deux bits pour un hertz.

d) Codage Manchester :

S Principe : dans le codage Manchester, l'idée de base est de provoquer une transition du signal pour chaque bit transmis. Un 1 est représenté par le passage de +V à -V, un 0 est représenté par le passage de -V à +V.

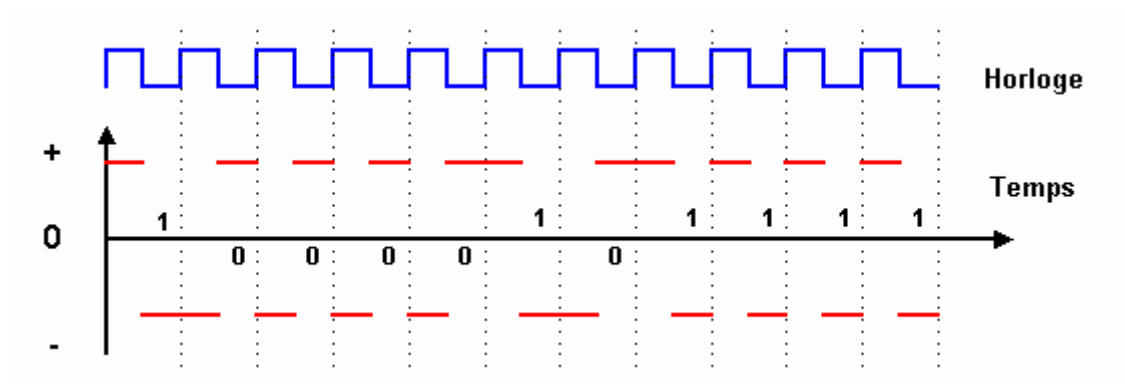


Figure II.6. Code Manchester

Chapitre II : Technique de codage

La synchronisation des échanges entre émetteur et récepteur est toujours assurée, même lors de l'envoi de longues séries de 0 ou de 1. Par ailleurs, un bit 0 ou 1 étant caractérisé par une transition du signal et non par un état comme dans les autres codages, il est très peu sensible aux erreurs de transmission.

La présence de parasites peut endommager le signal et le rendre incompréhensible par le récepteur, mais ne peut pas transformer accidentellement un 0 en 1 ou inversement.

II .3. Les modulations de base :

II 3.1 Modulation de fréquence ou FSK (Frequency Shift Keying) :

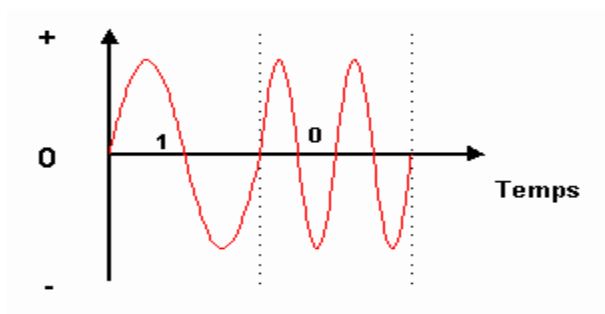


Figure II.7.Modulation FSK

En modulation de fréquence, les niveaux logiques sont représentés par la variation de la fréquence de la porteuse. Par exemple :

La modulation FSK est utilisée pour des transmissions à faible débit sur le réseau téléphonique commuté.

II.3.2. Modulation de phase ou PSK (Phase Shift Keying):

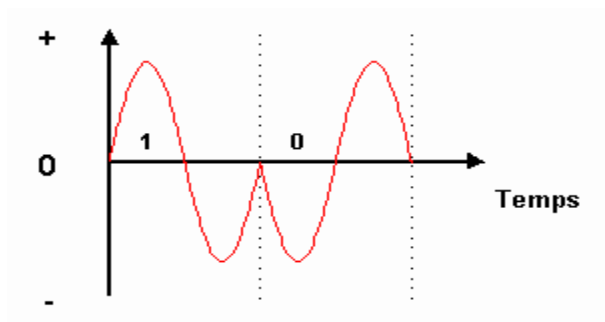


Figure. II.8.Modulation PSK

Chapitre II : Technique de codage

La modulation de phase associe à un code binaire une valeur de la phase de la porteuse. La vitesse peut être facilement augmentée en utilisant un code binaire sur 2, 3 bits ou plus sans augmentation de la fréquence de la porteuse.

II.3.3 Modulation d'amplitude ou ASK (Amplitude Shift Keying) :

La modulation d'amplitude s'applique en faisant varier l'amplitude du signal en fonction des bits à coder. Par exemple :

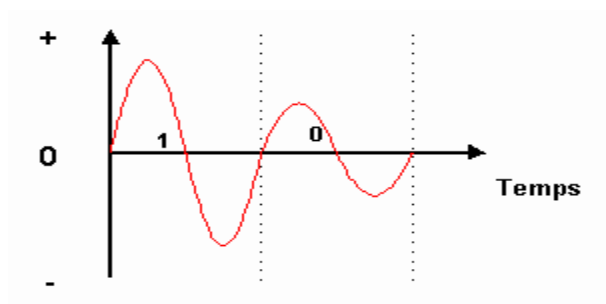


Figure. II.9.Modulation ASK

A noter que la modulation d'amplitude est la seule utilisable sur fibre optique, car les équipements utilisés actuellement ne sont pas en mesure d'appliquer une autre modulation sur les ondes lumineuses. Dans ce cas, la modulation s'effectue par tout ou rien.

Par contre, elle est peu employée sur d'autres supports, car elle provoque une détérioration du rapport signal sur bruit.

II .4 .Type de transmission :[M.2]

II .4.1 Transmission asynchrone :

- ❖ Les transmissions asynchrones se réalisent pour des systèmes de transmission possédant chacun une horloge différente
- ❖ En transmission asynchrone, La transmission n'est donc pas continue mais par paquets séparés par des "silences"

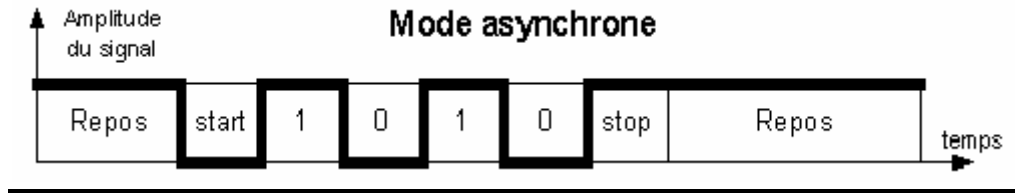


Figure II.12. Transmission asynchrone

II.4.2 Transmission synchrone

Pour s'affranchir des erreurs de bits répétées ou ratées, l'émetteur et le récepteur doivent avoir rigoureusement la même horloge.

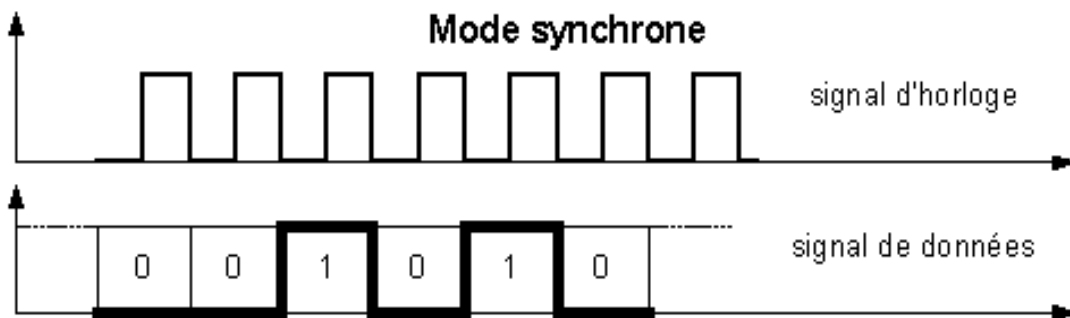


Figure II.13. Transmission synchrone

Chapitre III :

Les systèmes de transmission à haut débit

Introduction :

Avec les autoroutes de l'information ces larges voies de transmission qui permettent de transporter simultanément les sons, les données, les images - les échanges informatiques s'enrichissent d'images, l'audiovisuel devient interactif, le multimédia se développe. Les télécoms, devenus un outil stratégique pour les entreprises intéressent désormais toute organisation de services. Il s'agit donc de monter en puissance d'actuelles infrastructures en fibre optique. Conçue pour les hauts débits, hautement normalisée au plan international, les techniques de multiplexages offre aujourd'hui des solutions de transport totalement maîtrisées, sécurisées et compétitivité.

III.1. La hiérarchie plesiochrone PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy) :

La hiérarchie PDH est apparue avec la numérisation de la voix et la nécessité de transporter simultanément plusieurs canaux téléphonique sur un même support (multiplexage temporel). Le multiplexage de base est constituer du regroupement de plusieurs canaux téléphoniques de 64Kbits/s.ces regroupements sont différents en Europe, au japon et en Amérique du nord, ce qui conduit à la définition de différentes hiérarchies plesiochrones illustrées parla figure II.1 . Le Japon, l'Amérique du Nord et l'Europe ont défini des standards différents en termes de multiplexage temporel. Les français multiplexent 30 lignes à 64 Kbps alors que les deux autres n'en multiplexent que 24. Ces différences vont générer des standards différents dans chacun des trois pays à chaque niveau de multiplexage. En effet, les voies déjà multiplexées sont à nouveau multiplexées. D l'information est rajoutée à chaque niveau pour gérer ce multiplexage, c'est pour cela que le débit n'est pas exactement le multiple de ce qui rentre mais légèrement plus. C'est cela qui l'a qualifié de plésiochrone (en grec, plésio = presque, plésiochrone = presque synchrone).

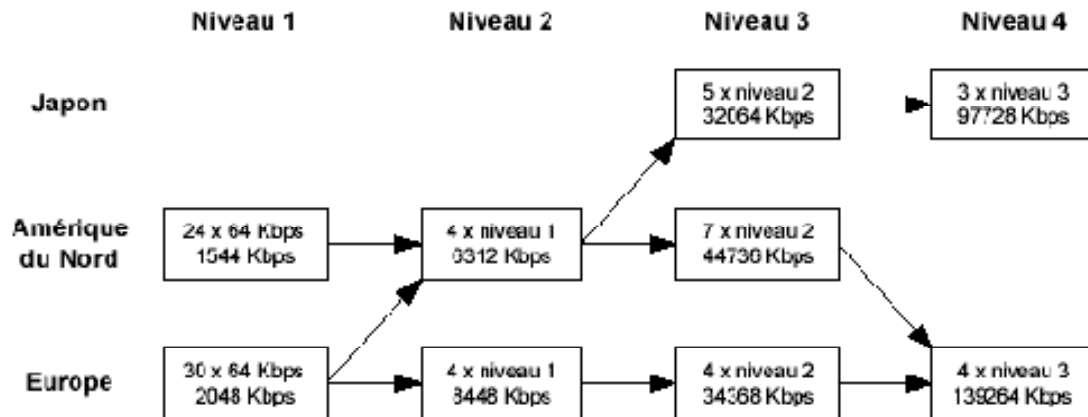


Figure III.1 . les différents regroupements en hiérarchie PDH.

III.2. Les inconvénients de la PDH :

- L'inconvénient de ce mode de transmission est le multiplexage bit par bit de la trame numérique plésiochrone, ce qui ne permet pas l'accès au niveau inférieur sans démultiplexage.
- l'absence de la normalisation au niveau de L'UIT-T(C.C.I.T.T), ce qui veut dire qu'on ne peut pas interconnecter deux hiérarchies différentes (USA, EUROPE).
- La technique de multiplexage est complexe en raison du plésiochronisme des sources.
- La trame PDH ne contient pas d'octets réservés à l'exploitation.
- Pas d'interopérabilité à hauts débits entre les continents puisque les débits sont différents.
- La technique PDH est une technique de point à point et non une technique de réseau organisé en anneau permettant d'obtenir une disponibilité importante de services.
- La technique PDH ne prévoit pas l'existence de canaux de gestion et ne permet pas une centralisation de l'exploitation d'un réseau national.
- L'inexistence de standardisation en termes de gestion et d'interface optique.

III.3. Evolution du PDH vers le SDH :

L'inconvénient majeur du système plésiochrone est la nécessité de démultiplexer tous les débits pour accéder à un 64kbit/s spécifique. Dans les années 1987 à 1989 apparaît une nouvelle hiérarchie numérique internationale de transmission : la Hiérarchie numérique synchrone ; cette hiérarchie numérique synchrone est

Chapitre III : Les systèmes de transmission à haute débit

basée sur un débit STM1 (Mode de Transfert Synchrone de niveau 1).

III.4.Définition de la SDH :

La SDH (Synchronous Digital Hiérarchie) est une technologie de transmission synchrone qui utilise principalement la fibre optique vu ses nombreux avantages en termes du débit, de fiabilité, de sécurisation et de supervision à distance du réseau.

La SDH est issu des concepts SONET proposé par BELLCORE (BELL Communication Research). Les premières normes SDH ont été approuvées par le CCITT (Comité Consultatif International de Téléphone et Télégraphe) à MELBOURNE en Novembre 1988 (G.707, G.708, G.709). Elles définissent les débits, la trame et les procédés de multiplexage.

Cette technologie offre la possibilité de transmettre dans une même trame des services de types et de débits différents.

III.4.1.La technologie SDH :[10],[11],[8]

la demande croissante de la part des opérateurs pour de nouveaux services de telecom à large bande a été à l'origine des travaux sur les réseaux optiques synchrones dès 1984. Les premiers résultats concernant les réseaux optiques synchrones (SONET :Synchronous Optical Network) ont été publiés aux Etats-Unis fin 1986, à l'initiative de BELLCORE (BELL Communication Research) .

Toute la difficulté de la normalisation a été de trouver un compromis entre les intérêts américains, européens et japonais afin de garantir l'interconnexion des différents réseaux des opérateurs.

C'est finalement un débit de 51,84 Mb /s qui a été retenu pour former le premier niveau :STS-1 (Synchronous Transport Signal , level 1 . Les niveaux au-dessus du niveau 1 (STS-n) sont des multiples du niveau de base.

C'est en février 1988, à Séoul en Corée, que des accords internationaux ont abouti à une nouvelle série de recommandations :

- G .707(Synchronous digital bit rate),
- G .708(Network Node Interface for the synchronous digital hierarchy),
- G.709(Synchronous multiplexing structure).

Ces accords sur la SDH furent ratifiés par le CCITT , à Melbourne en novembre 1988.

Chapitre III : Les systèmes de transmission à haute débit

Pour la norme SONET, les niveaux sont classés OC : Optical Container.

Pour la norme SDH, les niveaux sont organisés hiérarchiquement en STM-n (Synchronous Transport Module, niveau n).

La hiérarchie de la norme SDH correspond à celle de SONET pour les interfaces ATM.

Le niveau 1 de SDH (155,52 Mb/s) est le niveau 3 de SONET et le niveau 2 de SDH (622,08 Mb/s) est le niveau 12 de SONET.

| SDH | SONET | Débit |
|---------|--------|-----------|
| STM-1 | OC-3 | 155 Mb /s |
| STM-4 | OC-12 | 622Mb/s |
| STM-16 | OC-48 | 2,5Gb /s |
| STM-64 | OC-192 | 10Gb/s |
| STM-128 | OC-384 | 20Gb/s |
| STM-256 | OC-768 | 40Gb/s |

Tableau III.1. des débits normalisés de la hiérarchie numérique synchrone

III.4.2. La trame SDH :

Il existe différentes trames en SDH. La trame de base est appelée STM-1 (Synchronous Transport Module, niveau 1).

La trame STM-1 a une longueur de 2430 octets. Sa fréquence de transmission est de 125µs ; ce qui nous donne un débit de :

$$2430 \times 8 / 125 = 155,52 \text{ Mbit/s.}$$

Dans cette trame, 9 octets sont réservés à la gestion et à l'adressage, il reste donc une charge utile de 150,336 Mbit/s.

Elle contient 3 blocs:

Chapitre III : Les systèmes de transmission à haute débit

- **SOH** : (section overhead) information de transport
- **PTR** : pointeur
- **Payload**: Information à transmettre

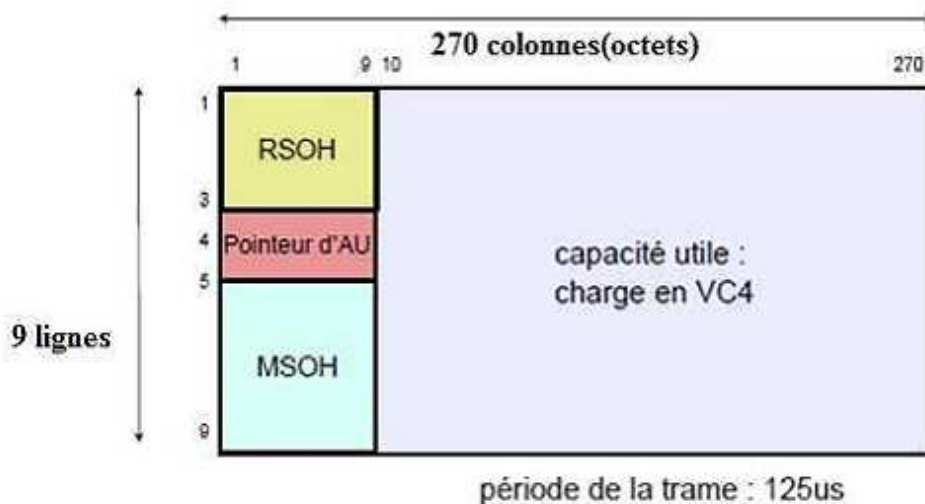


Figure III.2: Structure de la trame STM-1

- La capacité en octets est donc : $9 \times 270 = 2430$ octets
- La capacité en bits est $2430 \times 8 = 19440$ bits
- D'où un débit de $19440 / 125 \mu s = 155,520$ Mbits/s

A partir du multiplex STM-1, on peut construire des multiplex supérieurs STM-n par entrelacement d'octets.

III .4 .2.1. L'en-tête de section régénération (RSOH):

Il est constitué dans les 3 premières rangées et les 9 premières colonnes de la trame STM-1 comme le montre le tableau suivant. Cet en-tête est utilisé pour gérer le transfert d'informations entre les générateurs et les locations qui terminent ou routent le trafic.

| | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|---|---|
| A1 | A1 | A1 | A2 | A2 | A2 | J0 | X | X |
| B1 | ● | ● | E1 | ● | | F1 | X | X |
| D1 | ● | ● | D2 | ● | | D3 | | |

Tableau III.2. Les réseau de section de régénération (RSOH)

La signification des octets du RSOH est la suivante :

□ **A1, A2** : Ces octets sont utilisés pour le verrouillage de trame. Pour une trame STM-1 la structure est A1A1A1A2A2A2,

Où : A1 est 11110110

A2 est 00101000.

□ **J0** : Cet octet est utilisé pour la trace de section de régénération.

□ **B1** : utilisé pour la surveillance d'erreurs pouvant survenir sur le trafic.

□ **E1** : permet une voie de service de 64Kb/s entre deux équipements terminaux de la section de régénération (valide pour STM-1 seulement).

□ **F1** : permet une voie utilisateur à 64 kbit/s.

□ **D1 à D3** : permettent un canal de communication de données (Data Communication Channel ou DCC), à 192 bit/s, affectés à la communication de données d'administration et de contrôle du réseau de la section de régénération.

□ **X** : sont des bits réservés pour une utilisation nationale.

□ **●** : sont des octets dont la valeur dépend du media de transmission (transmission radio, Satellite).

III.4.2.2. L'en-tête de section de multiplexage (MSOH) :

Le sur débit de section de multiplexage est structuré dans les lignes 5 à 9, et des 9 premières Colonnes de la trame STM-1 comme le montre le tableau suivant. Il est utilisé pour gérer le transfert de bout en bout de l'information entre deux locations qui terminent ou routent le trafic (Multiplexeurs). Ces réseaux assurent leur fonction en associant à chaque entité de données de niveau supérieur un en-tête de section de multiplexage (MSOH) :

| | | | | | | | | |
|-----|----|----|-----|--|----|-----|--|--|
| B2 | B2 | B2 | K1 | | | K2 | | |
| D4 | | | D5 | | | D6 | | |
| D7 | | | D8 | | | D9 | | |
| D10 | | | D11 | | | D12 | | |
| S1 | | | | | M1 | E2 | | |

Tableau III.3. Les réseaux de section de régénération (MSOH)

La signification des octets du MSOH est la suivante :

- **B2** : trois octets réservés pour la détection des erreurs
- **K1, K2** : deux octets affectés à la commande de signalisation de protection automatique entre deux équipements terminaux de la section de multiplexage.
- **D4 à D12** : ils représentent un canal de communication de données (DCCM) pour transporter les flux de gestion au niveau de la section de multiplexage. Le DCCM est constitué de 9 canaux à 64Kbit/s, soit un débit de 576Kbit/s.
- **S1 (Status byte)** : marqueur de qualité de la synchronisation.
- **M1** : indication d'erreur distante sur la section de multiplexage.

III.4.2.3. Le pointeur (PTR) :

C'est dans le pointeur que réside le secret de la hiérarchie synchrone. En effet, c'est le pointeur qui assure à lui seul la synchronisation.

pouvoir faire « flotté » les informations utiles dans la trame et ainsi les décalages de phase entre les horloges des équipements. Le principe est simple : SDH utilise des pointeurs et une technique de justification « négative- nulle-positive » pour les sources sont absorbés.

➤ Justification du pointeur :

Bien que le réseau soit synchronisé, il existe toujours un problème d'asynchronisation, comme en PDH, du fait que les horloges locales ne sont jamais exactement synchrones et que la gigue et le dérapage affectent le transport d'une trame synchrone d'un nœud vers un autre à travers le réseau. Pour le résoudre, on utilise le mécanisme des pointeurs mais aussi des **octet de justification** :

Chapitre III : Les systèmes de transmission à haute débit

☐ Justification positive :

Si le débit de l'affluent est inférieur au débit nominal, l'affluent ne pourra être inscrit sur la durée d'une trame. La capacité de la charge utile ne sera plus utilisée en totalité et des octets de bourrage seront insérés.

☐ Justification négative :

Si le débit de l'affluent est supérieur au débit nominal, l'affluent doit pouvoir déborder hors de la capacité utile, des octets sont réservés à cet effet dans le surdébit.

☐ Justification nulle :

Si le débit d'affluent est égal au débit nominal, aucun décalage n'est fait.

III.4.3. Les entités traitées par le réseau SDH :

III.4.3.1. La notion de conteneur « C-n » :

Le Cn est une entité dont la capacité est dimensionnée pour assurer le transport d'un des débits définis par le CCITT .

Le conteneur joue le rôle de régénération du signal plésiochrone du départ, il récupère l'horloge et transforme le code de transfert selon les débits entrants. Le 'n' du cn dépend du débit entrant , par exemple C4 correspond à 139264kbit/s , le C3 pour 44736 ou 34368kbit/s, le C12 pour 2048kbit/s, le C11 pour 1544kbit/s.

Un conteneur est dimensionné pour assurer un des débits définis par le CCITT, et qui sont regroupés dans le tableau suivant :

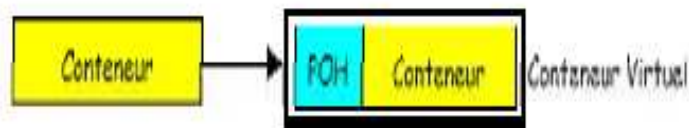
| Affluent (Mb/s) | Conteneur |
|-----------------|-----------|
| 1,5 | C-11 |
| 2 | C-12 |
| 6 | C-2 |
| 34 | C-3 |
| 45 | C-3 |
| 140 | C-4 |

Tableau III.4 . La correspondance affluent conteneur

III.4.3.2. Le conteneur virtuel VC-n :

Le conteneur virtuel VC-n est obtenu à partir du conteneur en lui ajoutant un sur débit de conduit POH (path Over –Head) utilisé pour la gestion du conduit . C'est le conteneur virtuel VC qui est l'entité gérée par le réseau SDH . L'ensemble constitue ce qu'on appelle un **conteneur virtuel VC** (virtuel container) .

$$VC = C + POH$$



Les conteneurs virtuels VC sont les éléments de base transportés par le réseau SDH , ils seront multiplexé pour obtenir des blocs plus grands et ainsi de proche en proche jusqu'à l'obtention d'une trame de base STM-1 constituée de 2430 octets.

III.4.3.3. L'unité tributaire :

L'unité d'affluent **Tun** (Tributary unit) est composée du VCn et d'un pointeur PTR associé.

La valeur de ce pointeur indique l'emplacement du VCn dans la trame de transport utilisée. Ce pointeur est associé au processus de justification du VC dans la trame de transport.

Pour pouvoir localiser un VC dans une trame SDH sans que celui-ci ne soit placé toujours à la même position, on utilise un pointeur qui indique l'adresse relative du VC par rapport au début de la trame . le pointeur associé au VC constitue ce qu'on appelle une unité tributaire (Tributary Unit)



III.4.3.4. Le groupe d'unité d'affluent « TUG-n » :

Le groupe d'Unités tributaires **TUG** (Tributary Unit group) représente une structure virtuelle de la trame résultant dans le multiplexage des unités tributaires et non pas une nouvelle entité physique . Il constitue un regroupement des TU dans un espace réservé d'une entité supérieure (TUG supérieure ou VC4) . On peut considérer que le TUG définit des règles de rangement des TU dans cette entité supérieure , et à travers elle , dans la trame de transport , on peut ainsi avoir :

- ✓ Le TUG 2 regroupant 3 TU12 ou 1TU2
- ✓ Le TUG3 regroupant 7 TUG 2 ou 1TU3

III.4.3.5. L'unité administrative « AU-n » :

L'unité administrative (Administrative Unit), AU4, est composée du VC4 et du pointeur PTR associé .la valeur de ce pointeur indique l'emplacement du début de VC4 dans la trame du transport utilisée. Ce pointeur est associé au processus de justification du VC4 dans la trame.

III.4.3.6. Le groupe d'unités administratives :

Un groupe d'unités administratives n'est pas une nouvelle entité physique, mais seulement une structure virtuelle de la trame STM-n . L'AUG correspond à la place que doit occuper l'AU4 dans la trame de transport ou à la place de 3 unités d'ordre 3 multiplexées.

La trame de transport **STMn** (Synchrone transport module) sont obtenues en multiplexant n AUG (et non n STM1) et en rajoutant un surdébit dit en-tête de section **SOH** (Section over head) :

- ✓ La trame de base STM1 (155,520Mbit /s) contient 1 AUG et son SOH
- ✓ La trame STM4 (622,080Mbit /s) contient 4 AUG et son SOH
- ✓ La trame STM16 (2488,320Mbit/s) contient 16 AUG et son SOH

Chapitre III : Les systèmes de transmission à haute débit

La figure suivante (arbre de multiplexage) résume toutes les étapes de multiplexage SDH :

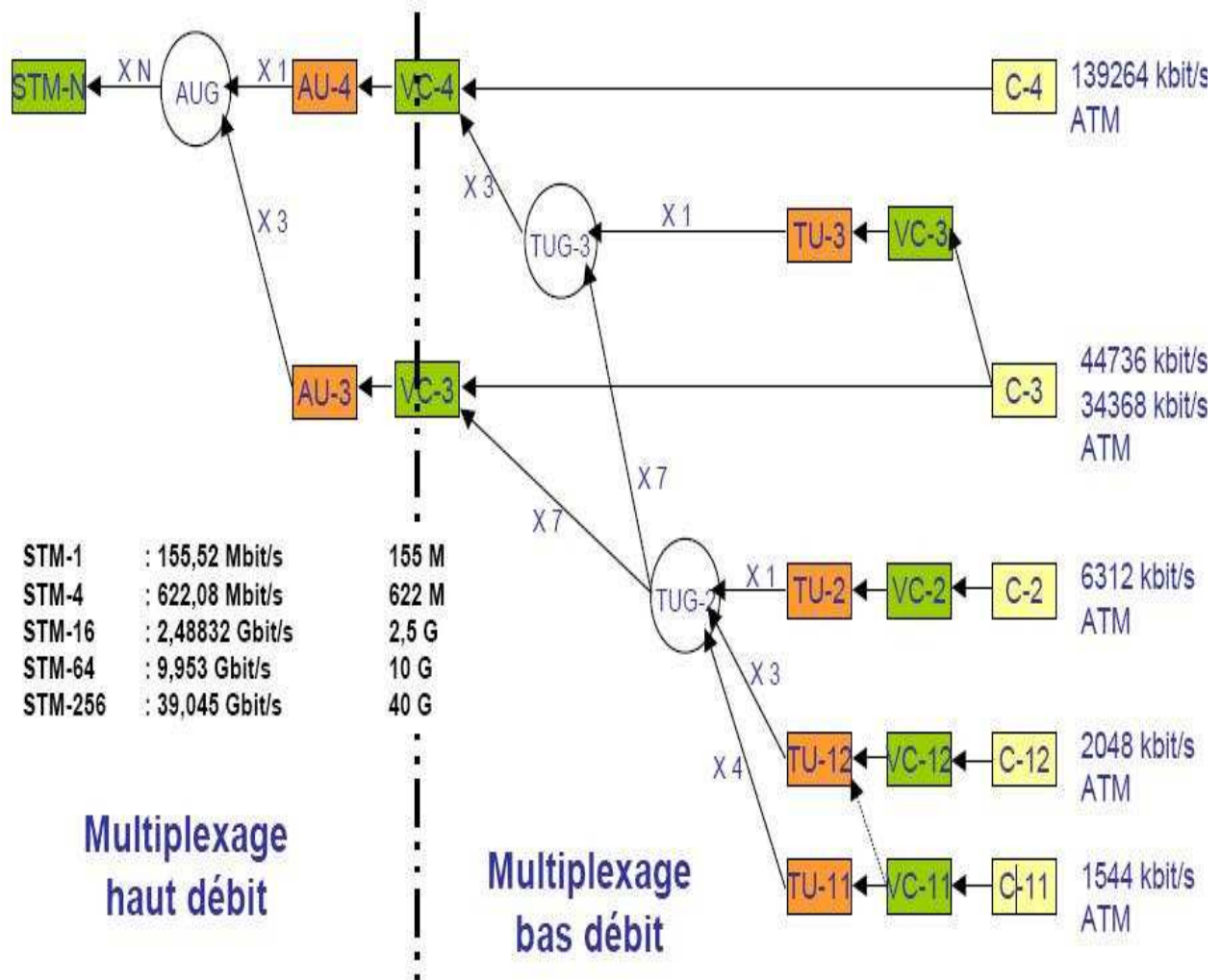


Figure III.3. Structure d'un Multiplexage synchrone

III.5. Multiplexage TDM (Time Division Multiplexing) : [9],[6] , [4]

Le multiplexage TDM ou MRT (Multiplexage à répartition dans le temps) consiste à affecter à un utilisateur unique la totalité de la bande passante pendant un court instant et à tour de rôle pour chaque utilisateur. Le multiplexage TDM permet aussi d'échantillonner les signaux de différentes voies à faibles débits et de les transmettre successivement sur une voie à haut débit en leur allouant la totalité de la bande passante.

Chapitre III : Les systèmes de transmission à haute débit

Le multiplexage TDM permet de regrouper plusieurs canaux de communications à bas débits sur un seul canal à débit plus élevé.

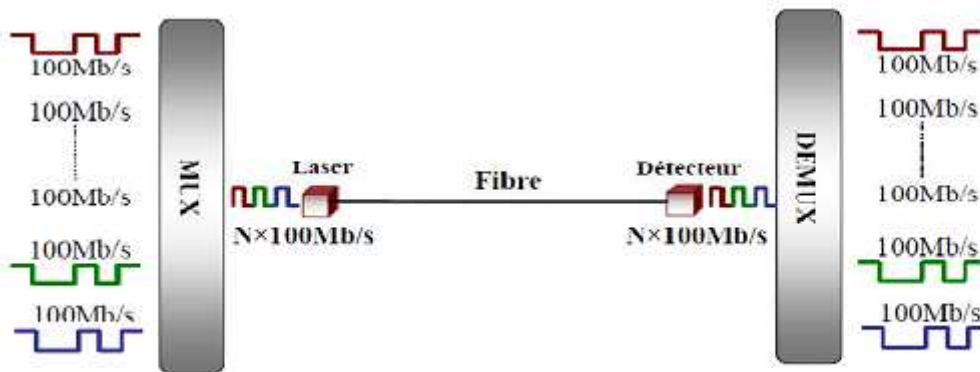


Figure.III.4.Schéma de principe d'un multiplexage à répartition dans le temps.

III.6.Multiplexage FDM (Frequency Division Multiplexing) :

□ ancienne hiérarchie de la téléphonie analogique, la transmission ne s'effectue pas en **Bande de base** mais avec différentes translations de fréquence sur un même support Physique, chaque canal étant associé à une bande de fréquence et une porteuse (10 000 Voies entre 4 et 60 Mhz): défavorable en numérique.

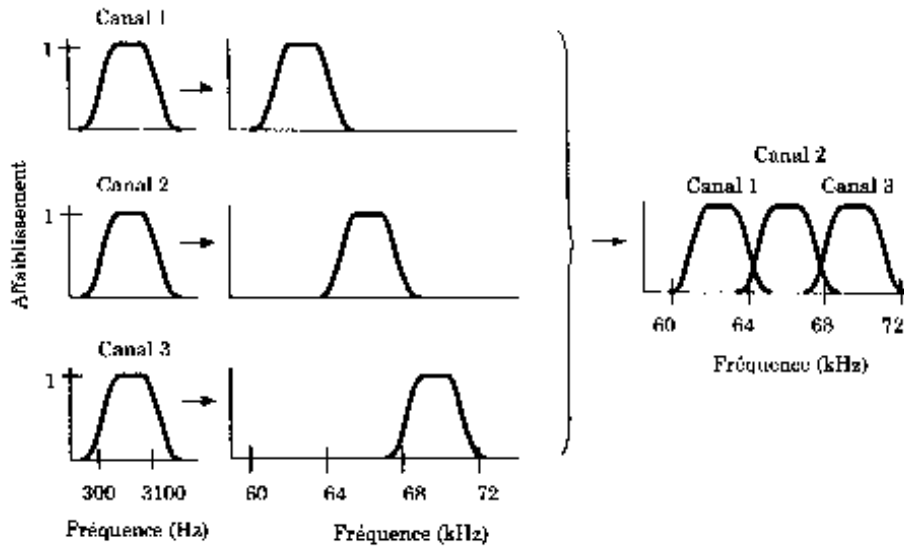


Figure.III.5. Multiplexage fréquentiel FDM.

III.7. Principe de WDM : [12] ,[13] ,[S.1] ,[S.2] ,[6]

Le multiplexage en longueur d'onde (Wavelength Division Multiplexing, WDM), consiste à envoyer dans une seule fibre N porteuses optiques à différentes longueurs d'onde transmettant chacune un débit D_b . 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 (FigureIII- 6). Ainsi plusieurs transmissions peuvent être faites simultanément, chacune sur une bande de fréquences particulières (Figure III-7). 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.

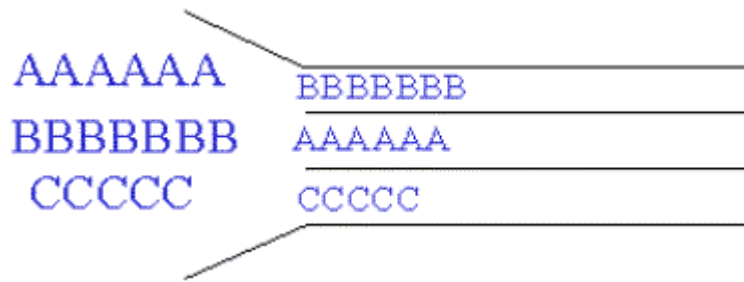


Figure III.6. Répartition des sous-bandes dans le cas d'un multiplexage WDM.

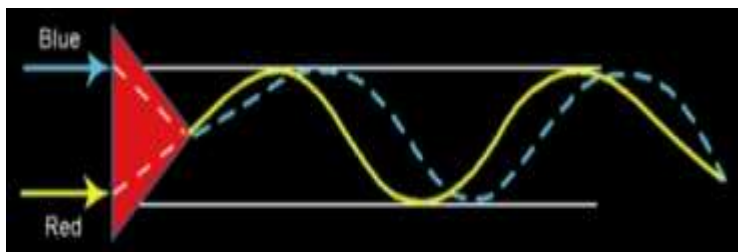


Figure III.7. Transmission de données optiques effectuée avec chacune une fréquence propre

Les systèmes actuels autorisent 4, 8, 16,32 et même 64 canaux optiques différents. Par exemple chacune pouvant supporter 2,5Gbits/s, on obtient alors des débits de 10, 40,80 et même 160Gbits/s.

A partir de différentes sources émettant chacune à une longueur d'onde propre, de regrouper et d'injecter ces canaux dans une seule fibre sans qu'il y ait de mélange entre eux au cours de la propagation.

A l'extrémité de la fibre, il suffit de séparer ces longueurs d'ondes et de les envoyer sur autant de détecteurs différents pour retrouver les signaux électriques initiaux.

Il faut noter qu'il existe des sources émettant simultanément plusieurs longueurs d'onde.

La capacité des système de transmission à WDM a augmenté parallèlement avec l'augmentation du débit par canal en multiplexage temporel (TDM) de 2,5Gbbits/s à 10Gbits/s.

La technologie WDM est dite DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) lorsque l'espacement utilisé est égal ou inférieur à 0,8 nm ou lorsque plus de 16 canaux sont utilisés. Un système à 16 canaux de 2.5Gbits/s, soit 40Gbit/s permet l'acheminement de 500 000

Chapitre III : Les systèmes de transmission à haute débit

conversations téléphoniques. Il faut également s'attendre à un accroissement du débit offert sur chaque canal qui pourrait rapidement atteindre 10Gbit/s.

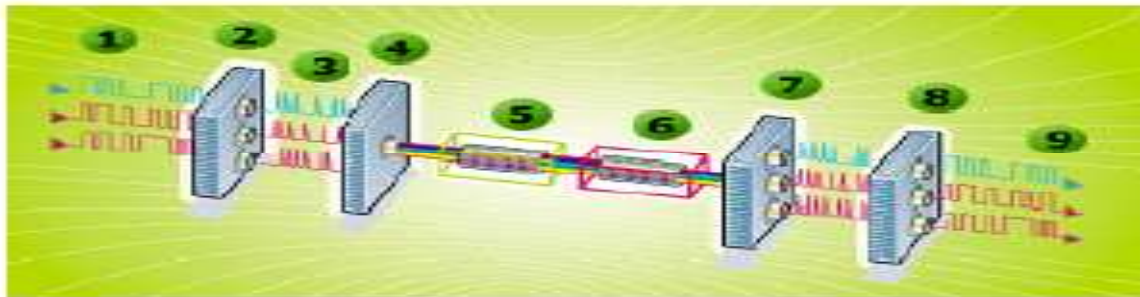


Figure III.8. schéma général de transmission d'onde WDM

- 1 Données entrantes (signaux électriques).
- 2 Sources optiques.
- 3 Signaux optiques (longueurs d'onde).
- 4 Multiplexeur.
- 5 Amplificateur.
- 6 Compensation de dispersion.
- 7 Démultiplexeur.
- 8 Photodétecteur.
- 9 Donnés sortants.

III.7.1.Fonctionnement général du WDM :

- La technologie du WDM est représenté par deux terminaux et un lien optique monomode les reliant. Le premier est un multiplexeur, le second un démultiplexeur.

Le multiplexeur a pour rôle des changer les longueurs d'ondes des signaux entrant et de les multiplexer sur un seul canal. Pour changer les longueurs d'ondes entrantes, il est nécessaire d'utiliser un transpondeur.

Lorsque des signaux arrivent au niveau du multiplexeur, il est possible qu'ils aient la même longueur d'onde, même si l'émetteur est différent. Etant donné qu'il n'est pas possible d'envoyer deux fois la même longueur d'ondes sur un même lien au risque d'erroné

Chapitre III : Les systèmes de transmission à haute débit

l'information des deux signaux, c'est le transpondeur qui va se charger de changer la longueur d'onde d'un des deux signaux.

Ainsi, chaque flux entrant va être codé sur une porteuse par modulation d'amplitude ou de phase. Ce qui permet donc de diffuser des signaux de sources différentes et ayant des longueurs d'ondes identiques sur un même canal.

Arrivé au démultiplexeur, celui-ci va agir comme plusieurs filtres dans des zones de longueurs d'ondes données. Il a donc connaissance des longueurs d'ondes qui circulent dans le lien optique. Le démultiplexeur va donc pouvoir récupérer l'intégralité d'un signal qui avait été multiplexé.

III.7.2. Les différentes technologies du WDM :

Il existe plusieurs technologies WDM, Elles restent identiques par leur principe mais se différencient uniquement par le nombre de canaux exploités dans une fibre.

- La technologie WDM est dite dense (D-WDM) 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-WDM : Ultra - Dense Wavelength Division Multiplexing. Ainsi, des systèmes à 10 GHz permettent d'obtenir 400 canaux optiques.

Les systèmes WDM / DWDM les plus commercialisés aujourd'hui comportent 8, 16, 32, 80 canaux optiques, ce qui permet d'atteindre des capacités de 80, 160, 320, 800 Gb/s en prenant un débit nominal de 10 Gb/s. On peut atteindre une capacité de 4 000 Gb/s (4 Tera b/s) avec 400 canaux optiques à 10 Gb/s, en technologie U-DWDM.

Les bandes de transmission sont classées aujourd'hui par l'UIT-T selon la terminologie suivante :

- Bande O : de 1260 à 1360 nm (original) ;
- Bande E : de 1360 à 1460 nm (extended)- position du " pic d'eau " ;
- Bande S : de 1460 à 1530 nm (short wavelength) ;
- Bande C: de 1530 à 1565 nm (conventional);
- Bande L: de 1565 à 1625 nm (long) ;
- Bande U: de 1625 à 1675 nm (ultra long wavelength).

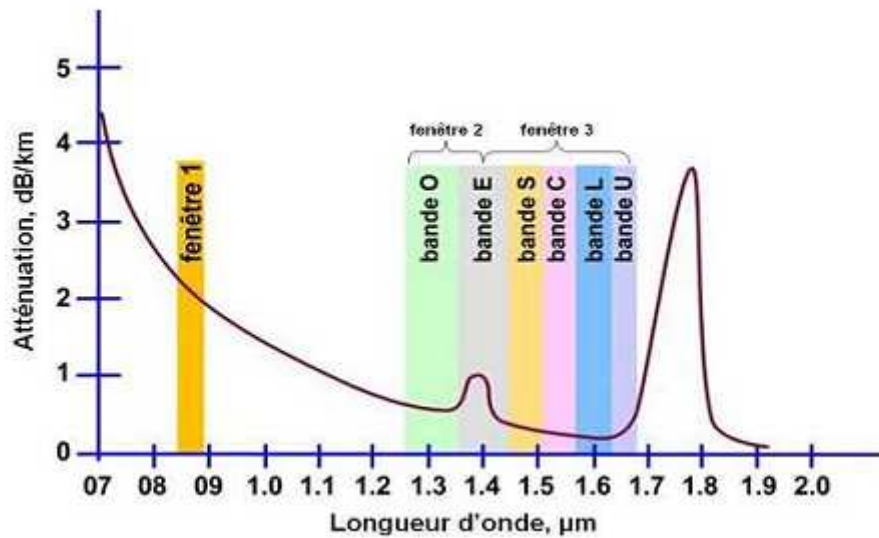


Figure.III.9. Courbe d'atténuation de la silice incluant les fenêtres de transmission.

III.7.3. La liaison point à point optique :

Une liaison point à point optique simple se compose d'un émetteur, d'un multiplexeur/démultiplexeur, d'une ligne de transmission et d'un récepteur. La ligne de transmission est composée par les fibres optiques et les amplificateurs optiques qui substituent les régénérateurs électriques (figure.II.9).

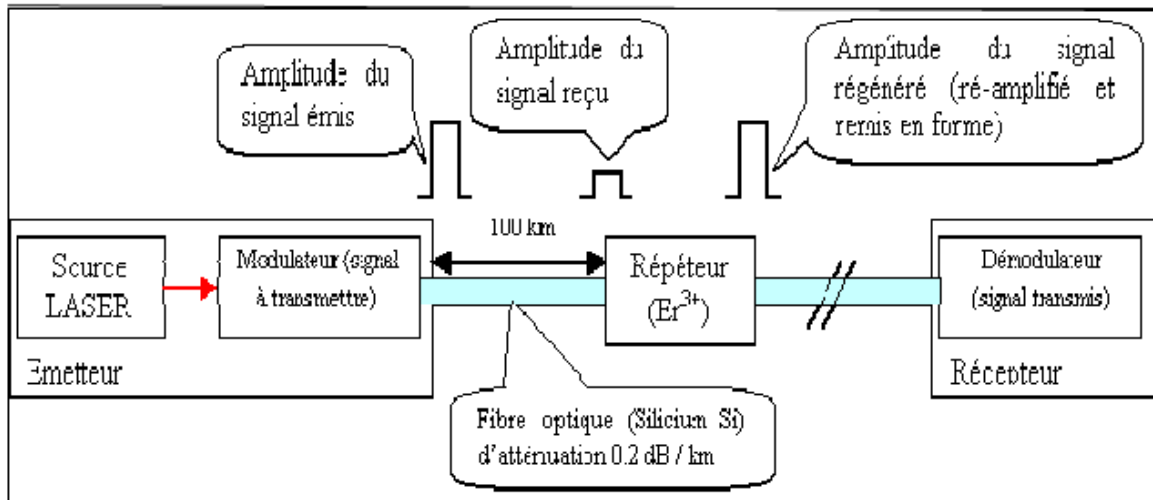


Figure III.10. Liaison point à point optique.

III.7.3.1. Composants d'émission :

III.7.3.1.1. Sources optiques :

A). Les sources à large spectre (lampes incandescentes) :

Introduisent une dispersion chromatique très importante :

- Très faibles bandes passantes
- Diagrammes de rayonnement quasi omni directionnels (très faibles couplages).

B). Les sources à spectre réduit (diodes laser et diodes électroluminescentes) :

En télécommunications optiques, la nécessité d'utiliser des bandes passantes plus larges impose le choix de sources à spectre réduits telles que les diodes laser (DL) et les diodes électroluminescentes (DEL).

- Les sources DL et LED ont été réalisées à partir de jonction PN polarisée en direct. Le principe de l'émission est dû à la recombinaison des paires électron-trou.

La DEL est une source incohérente elle présente un spectre d'émission assez large et un diagramme de rayonnement moins directif, utilisée essentiellement dans les systèmes de

Chapitre III : Les systèmes de transmission à haute débit

transmission qui nécessitent pas de très grandes bandes passantes. La DL est une source cohérente, utilisée dans les systèmes de transmission à très grandes distances (faible largeur spectrale ,bande passante importante).

➤ Les diodes électroluminescentes : DEL

Les diodes sont constituées, suivant le principe de base, d'un cristal semi-conducteur possédant deux couches dopées de manières : une couche P positive possédant des trous (emplacements ou il manque un électron pour que les atomes soient complets) et une couche N négative possédant des électrons libres.

Une diode semi-conductrice qui émet de la lumière par émission spontanée, est appelée diode électroluminescente.

La qualité de conversion du courant électrique en lumière est décrite par le rendement quantique, qui désigne le rapport entre le nombre de photons émis par unité de temps et le nombre de charges transportées à travers la jonction PN de la diode semi-conductrice. Les diodes électroluminescentes de structure simple, ou homojonction, présentent deux inconvénients majeurs : la lumière générée est émise dans toutes les directions d'où pertes importantes et la largeur de signal émis est grande, environ **40nm**. Par contre, leurs avantages sont une grande facilité de " pilotage " et une durée de vie de l'ordre 10^5 à 10^7 heure.

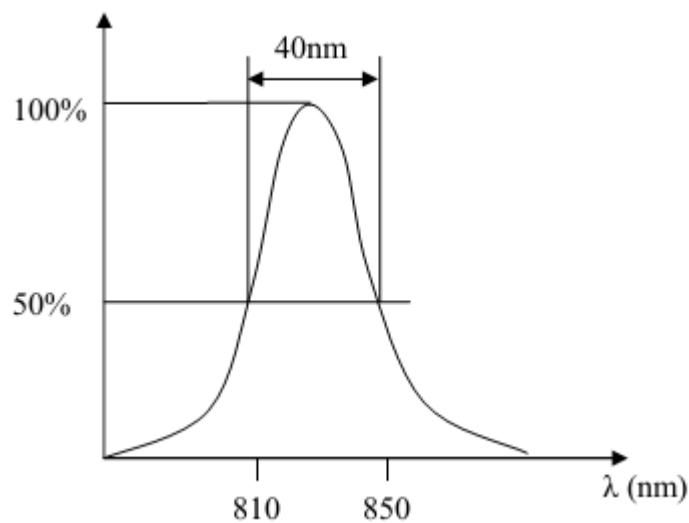


Figure III.11. LED caractéristique spectral

➤ Les diodes laser : DL

Depuis le début des télécommunications par fibre optique, le choix des sources optiques c'est porté sur les émetteurs à semi conducteur à cause de leurs petites dimensions en rapport avec celles du cœur des fibres optiques, de la relative facilité que l'on a à moduler directement la lumière émise en agissant sur le courant, de leur spectre optique relativement étroit et de leur faible consommation énergétique. Ainsi la diode laser est la source la mieux adapter pour les télécommunications optiques car elle permet d'avoir la meilleure efficacité de couplage optique avec la fibre.

LASER est l'abréviation de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation signifie amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement. Contrairement à la diode électroluminescente ou l'émission est spontanée.

Les diodes laser se caractérisent par l'étroitesse de la longueur d'onde qu'elles émettent, le spectre émis se composant de plusieurs raies centrées autour de la longueur d'onde principale (Figure III.12)

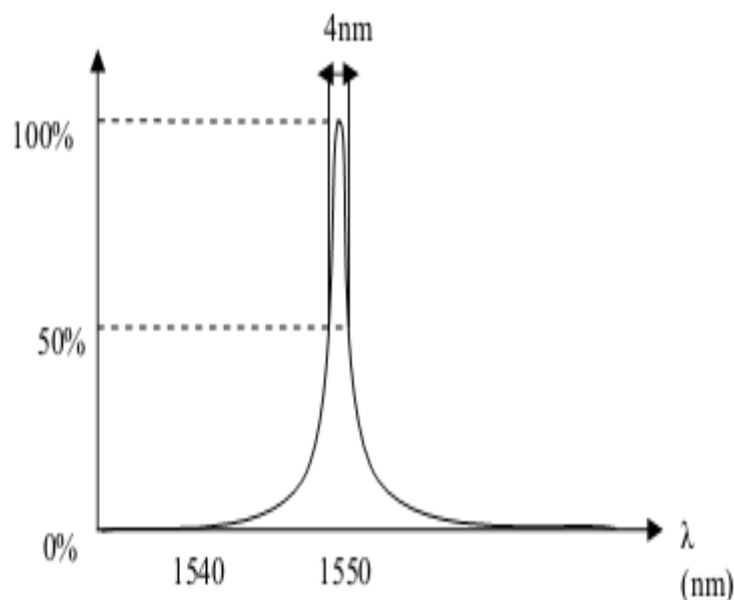


Figure III.12. diode laser, caractéristique

Chapitre III : Les systèmes de transmission à haute débit

L'émission stimulée :

Un laser est un dispositif qui émet de la lumière grâce au phénomène d'émission stimulée. En effet, dans un semi-conducteur, un électron peut passer d'un état à un autre de trois façons (Figure II.5) :

a) L'émission spontanée : De sa propre initiative, l'électron peut tomber dans un état moins énergétique non occupé (il passe d'un état ionisé à un état lié), en émettant un photon spontané.

b) L'absorption : En absorbant un photon, l'électron peut être amené dans un état plus énergétique. Il passe de l'état lié (électron et trou combinés) à l'état ionisé (électron dans la bande de conduction et trou dans la bande de valence).

c) L'émission stimulée : Frappé par un photon, l'électron peut retomber dans l'état le moins énergétique (état lié) en émettant un photon stimulé dont le rayonnement correspond à la même longueur d'onde, la même phase, le même état de polarisation et la même directivité spatiale que le photon incident. On parle alors de lumière cohérente. Avec l'émission stimulée s'introduit la notion de gain ou d'amplification du rayonnement incident puisque, à partir d'un photon, on en obtient deux.

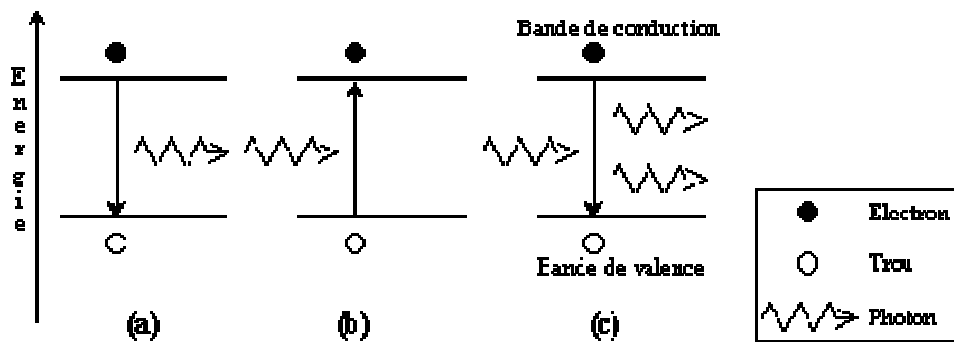


Figure III.13 .Schéma des processus d'émission spontanée (a), d'absorption (b) et d'émission stimulée (c).

Chapitre III : Les systèmes de transmission à haute débit

Statistiquement, à l'état naturel, un photon émis peut de nouveau être absorbé par un électron et globalement, l'émission et l'absorption se compensent. Pour obtenir l'effet laser et donc rendre l'émission stimulée prépondérante, deux conditions doivent être réalisées :

Il faut qu'il y ait suffisamment d'électrons dans l'état d'énergie supérieure. Ceci est réalisé par ce qu'on appelle une inversion de population. Dans un semi-conducteur, cette inversion est réalisée par l'opération de pompage qui consiste à fournir de l'énergie aux électrons afin qu'ils passent dans la bande de conduction.

Il faut qu'il y ait suffisamment de photons excitateurs. Pour cela, on oblige l'énergie lumineuse à s'accumuler sur place en enfermant le semi-conducteur dans une cavité résonante .

Les photons d'émission spontanée amorçant la réaction, lorsque ces deux conditions sont réunies, l'effet laser peut se produire.

III.7 .3.1.2. La différence DEL / DL :

Pour montrer la différence entre une diode électroluminescente et une diode laser, la (figure II.6) illustre les courbes caractéristiques de la puissance lumineuse en fonction du courant.

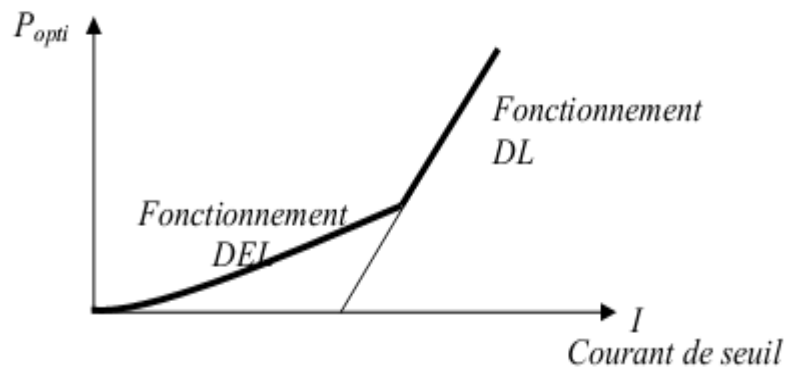


Figure III.14.: Fonction de transfert du LASER

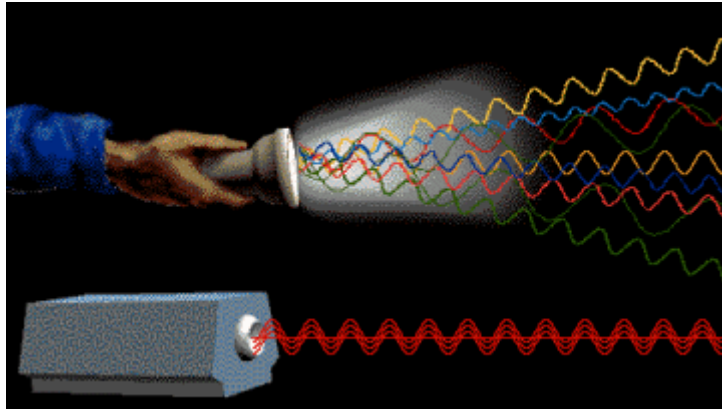


Figure III.15. Comparaison de la lumière émise par émission spontanée (haut) et par émission stimulée (bas).

III.7.3.1.3. La modulation :

Un modulateur, c'est un système capable de modifier les paramètres de la lumière (essentiellement amplitude et ou phase ; mais cela pourrait être : polarisation, direction de propagation, fréquence, répartition de modes, etc.) en fonction d'un signal de commande.

Un modulateur est un système d'interaction. Les interactions entre phénomène physique de nature différente - mécanique (ou élastique), acoustique, magnétique, etc.

On peut moduler ces sources de deux manières différentes.

a) 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.

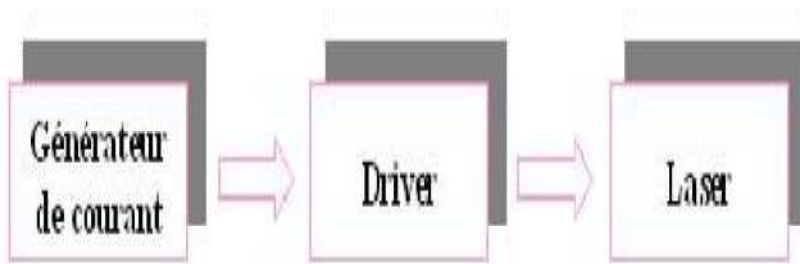


Figure. III.16. Synoptique de la modulation directe.

b) 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 ou d'amplitude. 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 physique utilisé dans ces modulateurs externes est soit la variation de l'indice de réfraction soit la variation de l'absorption (dispositifs à base de semi-conducteurs).

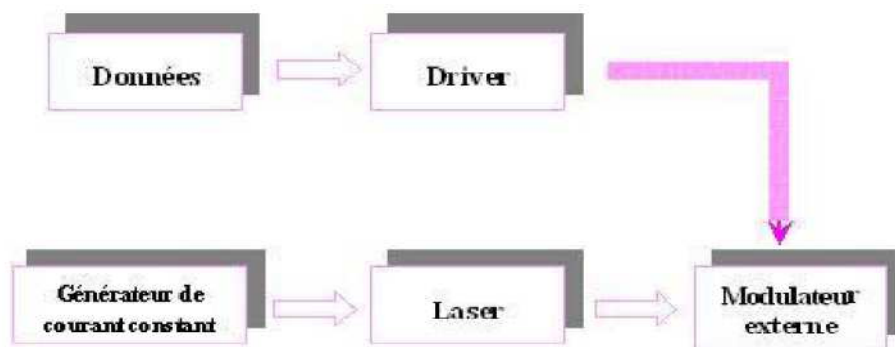


Figure.III.17 Synoptique de la modulation externe.

III.7.3.2. Composants de réception :

De nombreux efforts ont été fournis pour rendre les modules de réception de plus en plus performants. Le rôle du récepteur est de convertir au mieux le signal optique en signal électrique. Ce module est composé de plusieurs blocs fonctionnels.

On y retrouve trois parties (Figure III.18) :

- 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 '**recupération 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.

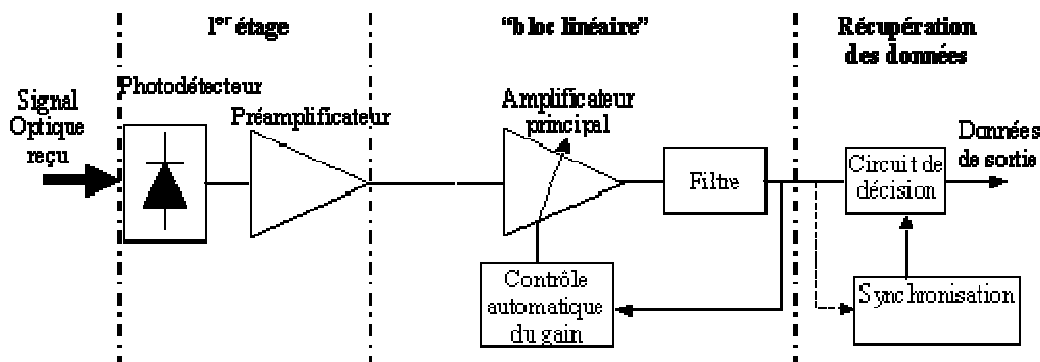


Figure III.18 : Schéma d'un récepteur de données à détection directe

III.7.3.2.1. photodétecteurs : [14] , [1]

Le photodétecteur est un semi-conducteur de jonction PN polarisé en inverse permet la conversion du signal optique reçu (les photons) en signal électrique par l'effet photoélectrique

a) Effet photoélectrique :

Sous l'effet d'un photon d'énergie suffisante, un électron est arraché de la bande de valence et passe dans la bande de conduction, produisant une paire de porteurs libre électron-trou. Ces porteurs sont dissociés par le champ électrique et participent à la création d'un photocourant.

b - Différents types de photodétecteurs :

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 AVALANCHE (APD).

- **PIN**: (Positive Intrinsic Negative Photodiodes). Ce sont également des dispositifs à semi-conducteurs qui possèdent une région intrinsèque (faiblement dopée) prise en sandwich entre une région de type p et une région de type n. Lorsqu'il est polarisé en inverse, ce composant émet un courant proportionnel à la puissance optique incidente.

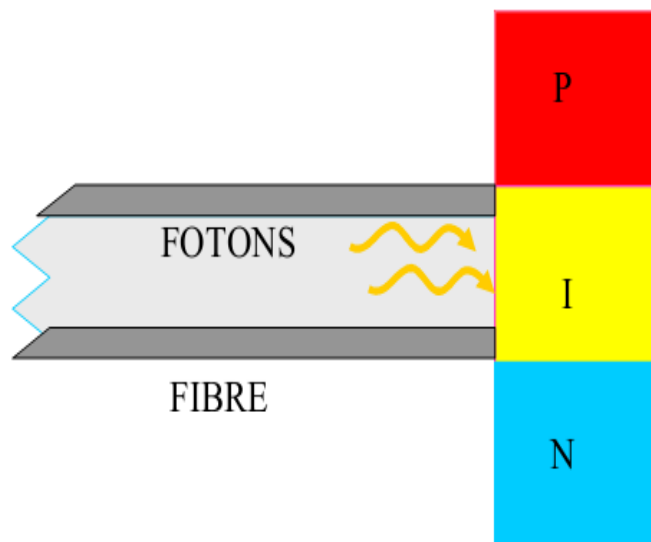


Figure III.19. : photodétecteur PIN.

Chapitre III : Les systèmes de transmission à haute débit

• **APD:** (Avalanche Photo Diode). Ce sont des composants semi-conducteurs qui réagissent à l'intrusion de photon dans la zone de jonction PN par le déclenchement d'une avalanche électronique. Ce phénomène crée un courant électrique conséquent à partir de très peu de photon incident.

Les photodétecteurs de type APD présentent de meilleures performances à 2,5 et 10Gb/s que les types PIN. Leur coût est également plus élevé. Néanmoins, pour les débits élevés à 40 Gb/s, des prototypes de photodiodes de type PIN surpassent les types APD. Les types PIN pourraient alors reprendre du terrain à ces fréquences sur le type APD.

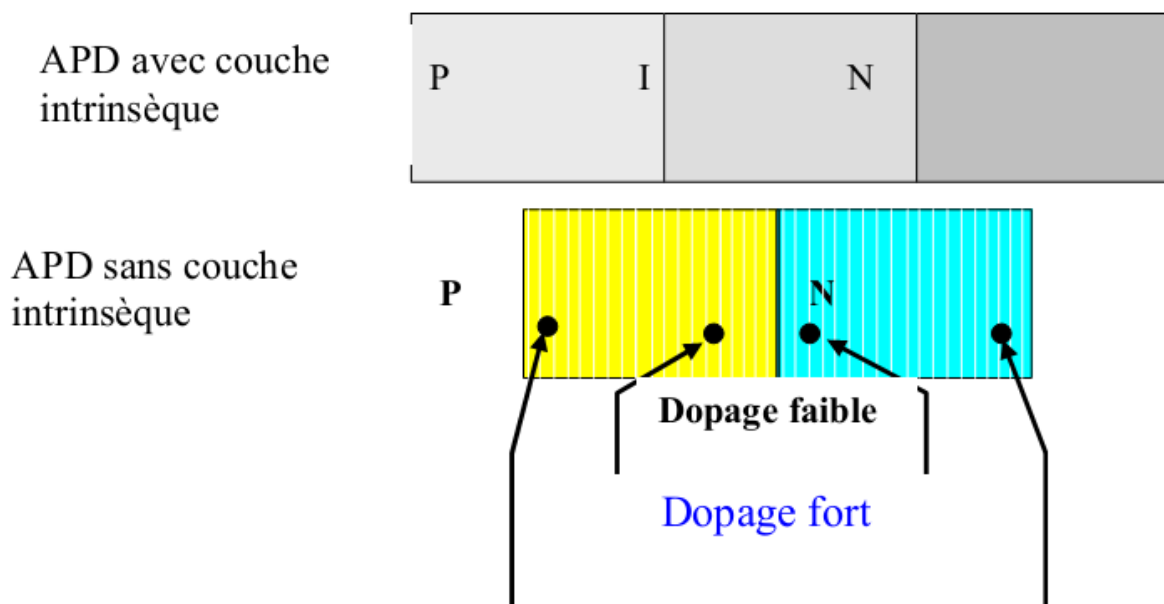


Figure III.20. photodétecteur APD

c- Caractéristique d'un photodétecteur :

Le photodétecteur est caractérisé par :

Chapitre III : Les systèmes de transmission à haute débit

• Rendement quantique :

Il nous renseigne sur le taux de conversion des photons en paires électron-trous. Il est défini comme étant le nombre d'électron créés n_e , et le nombre de photon incident n_p .

$$\eta_q = n_e / n_p$$

• Longueur d'onde de coupure :

Elle correspond à la longueur d'onde maximal λ_c qui peut être absorbé par un matériau donné.

$\lambda \leq \lambda_c \rightarrow$ Photon incident absorbé (création d'une paires électron-trou).

$\lambda > \lambda_c \rightarrow$ Photon incident non absorbé.

• Sensibilité :

Elle caractérise le rendement global de conversion de la puissance lumineuse.

d) Comparaison PIN, APD :

| <u>Caractéristiques</u> | <u>PIN</u> | <u>APD</u> |
|--------------------------|------------|------------------------|
| Technologie | Simple | Complexe |
| Mise en œuvre | Simple | Délicate |
| Gain interne | Nom | Oui (gain d'avalanche) |
| Tension de polarisation | Faible | Elevée |
| Courant d'obscurité | Faible | Moyenne |
| Facteur d'accès de bruit | Non | Oui |

III.7. 3.3.Composants du canal de transmission :

III.7.3.3.1.Fibre optique :

Fibre monomode (9/125) :

Fibre dans laquelle un seul faisceau lumineux circule à la longueur d'onde considérée. Le coeur d'une fibre monomode est de faible diamètre (typiquement 9 μm) (figure II.15).



Figure III.21. Fibre monomode

Coeur : Silice, $\varnothing=9\mu\text{m}$

Gaine optique: Silice, $\varnothing= 125 \mu\text{m}$

Revêtement de protection: Matériau plastique ($\varnothing=250 \mu\text{m}$)

III.7.4.L'exploitation des fibres optiques dans les liaisons DWDM :[S.3],[S.4]

Le réseau DWDM exploite la fibre optique monomode vu sa grande qualité de transmission.

Les deux principaux types de ces fibres et leurs spécifications ITU-T sont :

- Fibre monomode blindée sans dispersion (NDSF, Non-Dispersion-Shifted fiber) : G.652.
- Fibre monomode blindée à dispersion décalée (NZ-DSF, Non-Zero Dispersion- Shifted fiber) : G.655.

Ils existent 4 fenêtres dans le spectre infrarouge qui ont été utilisées pour la transmission par fibre optique. La première fenêtre, près de 850 nm, était utilisée exclusivement pour les transmissions à courtes distances. Les fibres NDSF (G.652) communément appelées fibres monomodes (SM, single Mode fibers), ont été désignées pour fonctionner dans la deuxième fenêtre, près de 1310 nm. Pour optimiser la performance de cette fibre dans cette fenêtre, elle était désignée de telle sorte que la dispersion chromatique soit proche de zéro aux près de la longueur d'onde 1310 nm.

Chapitre III : Les systèmes de transmission à haute débit

Comme l'utilisation de la fibre optique devenait de plus en plus commune et les exigences pour une plus grande bande passante et distance de déploiement augmentaient, la troisième fenêtre près de 1550 nm, était exploitée pour la transmission en monomode. La troisième fenêtre, ou la bande C, offrait deux avantages :

- Elle avait la plus faible atténuation.
- Sa fréquence d'opération était la même que celle des nouveaux amplificateurs à Erbium dopé EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifiers).

Cependant, les caractéristiques de dispersion de cette fibre étaient sévèrement limitant. Ceci a été dépassé dans une certaine mesure par l'utilisation d'une bande de ligne plus étroite et des Lasers à haute puissance.

Le deuxième type des fibres dites NZ-DSF (G.655), sont désignés spécialement pour satisfaire les besoins des applications DWDM. La finalité de sa conception est de diminuer considérablement l'atténuation dans la région 1550 nm mais pas l'annuler. Cette stratégie a effectivement introduit une dispersion à valeur contrôlée, qui s'oppose aux effets non linéaires à l'exemple de FWM qui entrave la performance des systèmes DWDM.

III.7.5. Caractéristiques de transmission :

- _ La fibre monomode est utilisée pour les liaisons à débits importants, pour les longues distances supérieures à 1 km ou pour les réseaux nécessitant peu de points de raccordement.
- _ La fibre monomode est très performante. La bande passante permet de transmettre un très grand nombre d'informations.
- _ L'ouverture numérique faible (0,113 mm) nécessite une source lumineuse cohérente (Laser).
- _ Le coeur d'un diamètre faible nécessite des manipulations relativement délicates ainsi qu'un matériel de haute précision.

III.7.6. Raccordement des fibres optique :

Le raccordement des fibres optiques pour les transmissions à grande distance est indispensable, cela nécessite de les couper à la longueur appropriée à chaque répéteur et de les connecter à d'autres composants.

Lorsque les câbles optiques ont été mis en place, vérifiés par un réflectométrie, pour détecter des dégâts éventuels que la fibre aurait pu subir lors du tirage, il ne reste plus qu'à poser les

Chapitre III : Les systèmes de transmission à haute débit

connectiques appropriés. Soit de type connecteurs ou des épissures, qui permettent de réaliser ce raccordement.

III.7.7. Type de raccordement :

Selon la nature de la liaison à établir, on peut distinguer trois types de raccordements

- les raccordements fixes.
- les raccordements semi-fixes.
- les raccordements démontables.

III.7.7.1. Les raccordements fixes :

Ce sont des raccordement qu'il ne sera plus possible d'ouvrir une fois qu'ils sont posé, leur destination principale et la mise bout à bout de plusieurs câbles optiques a fin de constituer des liaisons à grande portée.

Trois techniques sont utilisées dans ce type de raccordement :

a. la soudure :

La soudure est une technique de raccordement fixe la plus récente, cela consiste à chauffer les deux extrémités de la fibre de manière que la silice atteigne son point de fusion. On obtient ainsi une soudure sans apport le matériau.

Les épissures par fusion présentent des pertes d'insertion très faibles moins de 0.1 dB, pas de réflexion parasite et encombrements très réduits.

b. Le collage :

Le principe est de noyer dans la colle deux fibres positionnées l'une en face de l'autre. Pour cela on utilise un centreur en élastomère translucide dans lequel une rainure est gravée. Ce type de raccordement présente un affaiblissement voisin de 0.1 dB.

c . Le sertissage :

Le sertissage est un moyen d'épissurer deux fibres qui est simple d'utilisation, et qui assure une bonne protection. Il existe différents types de sertissage, suivants les fabricants qui les ont développées, le principe de fonctionnement est toujours le même.

Le sertissage présent l'avantage d'être facile et rapide, la qualité reste tout de même très bonne, les pertes typiques sont de l'ordre de 0.1 dB.

Chapitre III : Les systèmes de transmission à haute débit

III.7.7. 2. Les raccordements semi-fixes :

Ce type de raccordement est un moyen qui permet de mettre les deux fibres bout à bout d'une façon non permanente.

On trouve dans cette catégorie de raccordement :

- Le domaine optique: utilisé pour effectuer des mesures comme la vérification du tirage d'un câble avant la mise en place de la connectique définitive.
- Le borner optique : se présente sous forme d'un raccordement modulaire.
- L'adaptateur pour fibre nue.

III.7.7.3. Les raccordements démontables :

On utilise dans ce type de raccordement, les connecteurs qui réalisent un raccordement avec une bonne résistance mécanique, utilisé en un nombre de manœuvre importantes, il est généralement constitué de deux fiches et d'un raccord ou d'une embase et d'une fiche, les connecteurs sont utilisés aux extrémités de la liaison pour le raccordement aux équipements d'émission et de réception et dans les répartiteurs optiques.

Aujourd'hui les connecteurs pour fibres monomodales ont une perte d'insertion moyenne inférieure à 0.5dB.

III.8. L'avenir du WDM:

La capacité des systèmes de transmission à multiplexage en longueur d'onde (WDM) à récemment augmenté d'une manière spéculaire, 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 10Gbits/s vers 40Gbits/s), rapprocher les canaux et élargir la bande passante optique exploitée.

Aujourd'hui, la technologie DWDM n'a pas encore atteint ses limites. De plus, de nouvelles techniques en cours de développement vont permettre à priori de multiplier encore plus les capacités des systèmes optiques. On peut citer :

- Des amplificateurs optiques à faible bruit, de grande puissance, à large bande.
- Une fibre optique optimisée et des techniques de gestion de la dispersion.
- la transmission soliton permettant le transport d'impulsions très étroites sur des milliers de kilomètres sans déformation, tout en conservant une bande passante très large.

Chapitre III : Les systèmes de transmission à haute débit

- Des composants électroniques et optoélectroniques rapides pour les équipements émetteurs et récepteurs.
- La réduction de la dispersion en polarisation.
- Des modules de compensations de dispersion compatibles avec de larges bandes passantes optiques.
- Une technologie de traitement optique rapide pour la régénération 2R, 3R autorisant une régénération efficace mais peut coûteuse par comparaison avec les équipements d'émission-réception.
- Des équipement à très haut débit binaire mettant en ouvre le multiplexage temporel électronique (ETDM) conjointement avec le multiplexage temporel optique (OTDM).
- Une nouvelle génération de technique de correction d'erreurs directe pour faciliter la transmission en présence de bruit.
- Des filtres optiques à forme d'amplitude et de phase bien définies pour un filtrage très étroit (plus étroit que la bande passante de canal WDM).

Conclusion :

Pour avoir une liaison optique a haut débit, Plus l'utilisation la technologie WDM/DWDM, il est possible de générer des ondes impulsionnelles stables qui ont la propriété de pouvoir se propager sur de grandes distances dans un milieu non linéaire et dispersif sans grande modification et qui sont par conséquent idéales pour la transmission de données par fibres optiques. Ces ondes sont appelées solitons optiques.

Chapitre IV :

Composants optoélectroniques

Introduction :

Le principal élément de la partie transmission est la fibre optique. Elle offre une très grande capacité de transport, plus grande que les convertisseurs optique-électronique et les composants électroniques. D'où l'idée de traiter le plus souvent possible le signal lumineux avant sa conversion électrique. Pour cela, de nombreux progrès ont été réalisés sur les composants optiques. Nous verrons tout d'abord les composants actifs certains de ces composants sont détaillés au troisième chapitre (laser, détecteur et modulateur) on s'intéresse à l'amplification optique et les différents amplificateurs permettant de la réaliser. On abordera également dans ce paragraphe les composants passifs comme les filtres optiques, les isolateurs et les coupleurs.

Aujourd'hui, on ne peut plus parler de systèmes de télécommunications sans ces
Eléments

IV.1. Amplification optique :

L'évolution des systèmes de transmission optique a connu une révolution avec la mise au point et le développement industriel des amplificateurs optiques à la fin des années 80. Trouvant désormais des fibres optiques à dispersion chromatique soit faible, soit opposée (dite fibre à compensation de dispersion dont le sigle anglais est DCF), la principale contrainte de ce support de transmission était devenue l'atténuation des signaux durant la propagation. Or le photodétecteur émettra un courant de qualité, codant correctement l'information à transmettre, seulement si le photocourant n'est pas noyé dans le bruit, et donc si la puissance optique reçue est suffisamment importante. L'amplification optique devient alors une alternative aux complexes répéteurs-régénérateurs optoélectroniques. Elle permet de compenser ces pertes et de contrôler régulièrement la puissance optique des signaux. Il est désormais possible de transmettre le signal optique sans conversion sur une distance beaucoup plus importante.

Avant d'étudier deux exemples d'amplificateurs optiques, l'amplificateur à semi-conducteur et l'amplificateur à fibre dopée à l'erbium, quelques généralités et le principe de l'amplification optique seront traités dans le premier paragraphe.

IV.1.1. Généralités sur l'amplification optique :[14] ,[15]

L'amplification optique repose sur le phénomène d'émission stimulée, déjà présentée dans le paragraphe sur les diodes lasers. 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 (Émission Spontanée Amplifiée).

IV.1.2 .Les amplificateurs à semi-conducteur (AOSC) :

Les premiers travaux sur les AOSC ont démarré au début des années 80, à partir du moment où les lasers à semi-conducteur fonctionnaient en continu avec une fiabilité acceptable. Leur structure de base est peu différente de celle d'une diode laser. 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 IV.1**

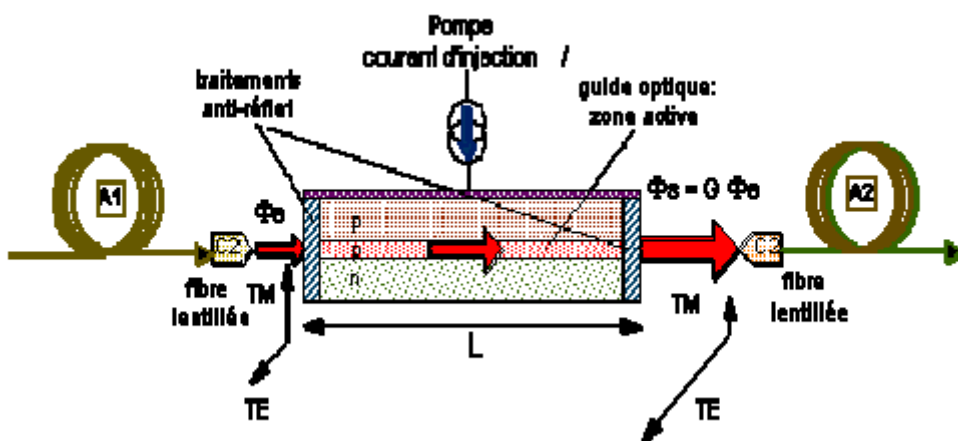


Figure IV.1: Configuration de base d'un amplificateur optique à semi-conducteur

La lumière incidente entre dans le circuit, est amplifiée et sort par l'autre extrémité pour être couplée dans la fibre. Idéalement, il n'y a pas de réflexion du signal dans l'amplificateur.

Les principales caractéristiques des AOSC sont :

- ✓ Un gain élevé (jusqu'à 30 dB) selon le semi-conducteur.
- ✓ Une puissance de saturation en sortie autour de 5 - 10 mW.
- ✓ Une bande passante optique importante, de l'ordre de 5 THz (soit environ 40 nm autour de 1550 nm).
- ✓ Les non-linéarités sont particulièrement importantes dans les conditions de saturation du gain.
- ✓ C'est de loin le dispositif amplificateur le plus compact qui existe, avec un rendement (rapport gain à la consommation électrique) record. De plus, sa technique de fabrication est compatible avec l'intégration monolithique de nombreux autres composants actifs et passifs, ce qui offre des perspectives attrayantes en matière de traitement optique du signal, et aussi probablement en terme de coût.

Les pertes de couplage du faisceau incident dans l'amplificateur sont élevées, en raison de la supériorité du diamètre du faisceau sur l'épaisseur de la couche active du semi-conducteur.

IV.1.3. Les amplificateurs à fibre dopée (EDFA) :

Le milieu amplificateur est cette fois-ci le cœur d'une fibre optique monomode dopée avec des ions de terre rare. Pour que la fibre ne soit pas absorbante, mais amplificatrice, il faut l'associer à un pompage optique. Un multiplexeur permet de coupler le flux lumineux puissant provenant d'une diode laser de pompe et le signal à l'intérieur de la fibre. Les longueurs d'onde de pompe doivent permettre des transitions vers les états excités des ions de terre rare et créer l'inversion de polarisation.

L'ensemble module de pompe, multiplexeur et fibre dopée forme l'amplificateur le plus rudimentaire. La longueur de fibre est généralement comprise entre 10 et 20 mètres. Pour l'amplification autour de 1550 nm, fenêtre spectrale la plus utilisée car de faible atténuation des fibres optiques en silice, les dopants sont des ions Erbium Er^{3+} . On parle alors d'Amplificateur à Fibre Dopée à l'Erbium (AFDE ou EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier en anglo-américain). 980 et 1480 nm sont les deux longueurs d'onde de pompe

les mieux adaptées à l'EDFA. Et des diodes lasers à semi-conducteur sont disponibles à ces longueurs d'onde (lasers en AlGaAs pour le 980 nm et lasers en InGaAsP pour le 1480 nm). Le multiplexeur optique, sélectif en longueur d'onde, doit présenter une perte d'insertion faible à ces deux longueurs d'onde afin d'optimiser le rendement optique du système. Des isolateurs présents à chaque extrémité en assurent aussi la stabilité en bloquant tous les faisceaux lumineux susceptibles de revenir en aval. Le signal de pompe peut être couplé dans la fibre en co-propagation (mêmes sens pour le signal et le signal de pompe) afin de réduire le facteur de bruit ou en contre-propagation (sens opposés du signal de pompe sur le signal utile) favorisant ainsi une plus forte puissance de saturation. Mais afin d'augmenter et uniformiser dans la fibre dopée l'inversion de polarisation et donc l'amplification du signal, un double pompage aux deux extrémités peut également être réalisé. La (Figure IV.2) représente la configuration d'un de ces amplificateurs à fibre dopée.

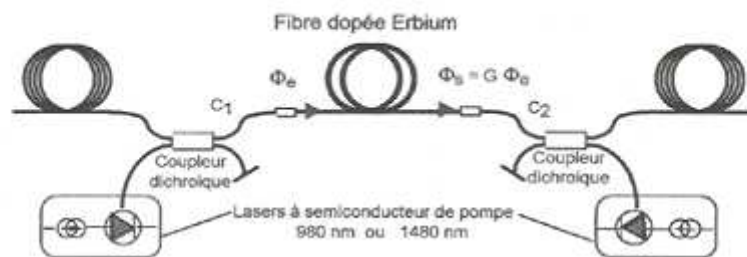


Figure IV.2: Configuration d'un amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium avec pompage optique

IV.1.4) 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

perles 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.

IV.1.5. Utilisation de l'amplificateur optique :

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.

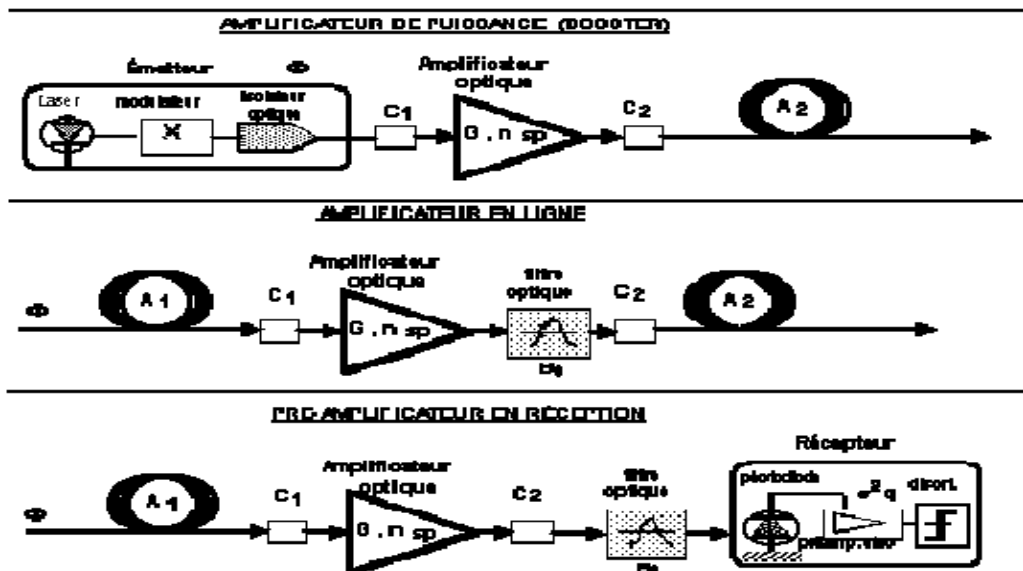


Figure III.3: Configuration des amplificateurs optiques (A1 et A2 représentent les fibres optiques).

IV.6 .Les atténuateurs, isolateurs et les compensateurs de dispersion

Un atténuateur consiste en un assemblage de filtres, réduisant l'intensité de la lumière qui le traverse. Ce composant est utilisé dans les télécommunications optiques pour réguler la quantité de lumière arrivant sur les composant sensibles, tels que les photodétecteurs

Un isolateur optique consiste en un assemblage de lentilles et de prismes, transmettant la lumière uniquement dans une seule et même direction. Ces composants sont généralement utilisés pour stopper la réflexion ou pour isoler les sources émissives, comme les lasers.

Durant la transmission des multiples longueurs d'onde dans une fibre, les longueurs d'onde les plus longues ont tendance à prendre de l'avance sur les plus courtes, du fait de leurs modes de dispersion différents durant le trajet. De ce fait, le spectre du signal transmis devient plus large que celui émis à l'origine.

Pour réguler ce phénomène, on insère avant le récepteur du compensateur de dispersion, constitués d'une fibre courte, ralentissant les longues d'onde longues et accélérant les courtes.

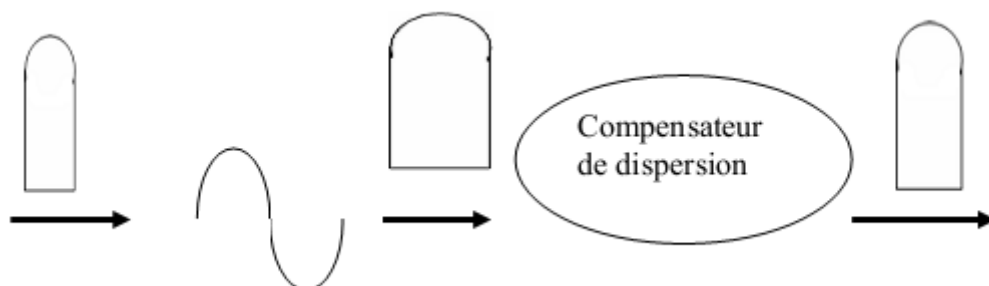


Figure IV.4 Principe d'un compensateur de dispersions

IV.7. 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 coeurs sont très proches. Pour que les coupleurs permettent une diffusion efficace d'informations, ils doivent satisfaire à deux conditions fondamentales :

- Leurs pertes ne doit pas perturber le système auquel ils donnent accès.
- Le prélèvement de données en un point ne doit pas soustraire plus de quelques pourcent de la puissance transmise.

Il existe plusieurs formes de coupleurs, telles que les coupleurs étoiles qui disposent de N entrées et N sorties, les coupleurs séries qui disposent de deux entrées et une sortie ou inversement, les coupleurs en T et les coupleurs en Y.

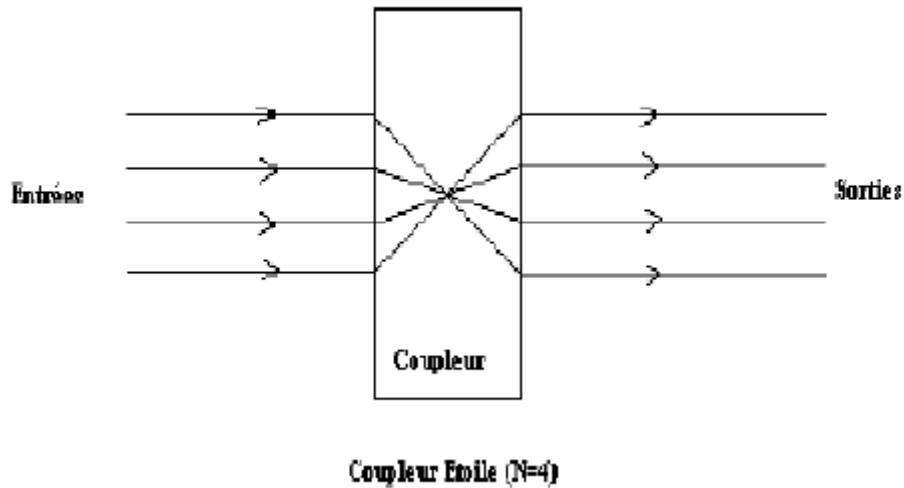


Figure IV .5: Coupleur Etoile

Le coupleur se compose de guides constituant ses entrées et ses sorties. En effet, la figure suivante présente un exemple de coupleurs à deux entrées et une sortie.

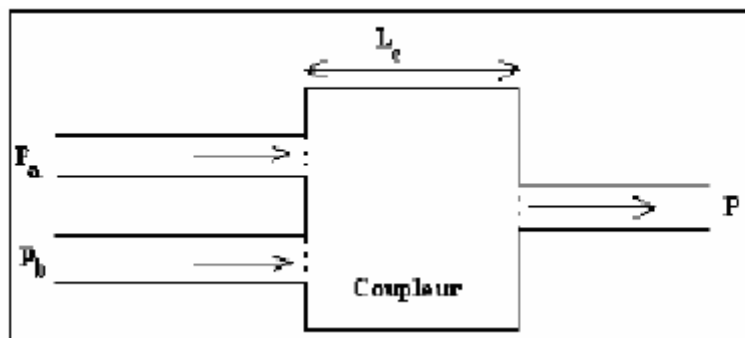


Figure IV.6 : coupleur à deux entrées et une sortie.

Les puissances P_a et P_b injectées dans les deux guides du coupleur ont pour expressions :
 $P_a = \sin^2(k.z)$ où z : Direction de propagation de la lumière le long du coupleur.

$P_b = \cos^2(k.z)$ k : Coefficient de couplage entre les modes des deux guides d'ondes.

Pour assurer le transfert de toute la puissance optique, le coupleur doit avoir une longueur L_c .

IV.8. 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.

Conclusion :

Les fibres optiques possèdent de nombreuses qualités pour transmettre une grande quantité d'informations sur de longues distances. Plusieurs de leurs défauts ont été énumérés (par exemple la dispersion chromatique) et des solutions sont proposées pour les corriger (fibres de compensation). Sont apparus sur le marché depuis quelques années des amplificateurs optiques pour remédier à l'atténuation du signal dans les fibres.

Chapitre V :

Simulation d'une liaison haut débit avec COMSIS

Introduction :

le développement des télécommunications par fibre optique a multiplié les architectures des réseaux, les techniques de codage et les composants disponibles. La conception des systèmes associés est de plus en plus complexe, tant le nombre de paramètres influant sur les performances de la liaison est important. Aussi, les outils de simulation constituent une assistance de plus en plus utilisée pour aider à trouver rapidement 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. Ce chapitre représente le corps de notre travail pratique qui a pour but d'étudier la qualité de la transmission en fonction de différents types de codage, dans notre cas nous avons choisi les deux types de codages suivants : NRZ-I, HDB3. Pour illustrer la qualité de la transmission dans les deux types de codages précédents, nous avons effectué nos essais sur une liaison point à point à haut débit dans un premier niveau un débit de 10 Gbit/s et dans un autre un débit de 40 Gbit/s. La liaison est composée de trois principaux blocs : l'émetteur, la ligne de transmission et le récepteur.

V.1.Présentation du logiciel :

COMSIS est un logiciel de simulation système 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 utilisateur. Il permet d'analyser des systèmes analogiques ou numériques décrits sous la forme de schémas blocs.

V.1.1. L'éditeur de 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

Chapitre V : Simulation d'une liaison haut débit avec COMSIS

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'entrées et de sorties et doivent être interconnectés et nommés. Une fois ces modèles positionnés, reliés et nommés, leurs paramètres caractéristiques doivent être définis, sous forme numérique ou à l'aide d'un paramètre formel, avant de lancer l'analyse du système. Il faut encore insérer des variables intermédiaires (correspondant aux grandeurs d'entrée et de sortie des opérateurs) et les nommer. Ainsi, le simulateur a accès aux signaux en chaque point du schéma. COMSIS dispose d'une aide en ligne contextuelle et hypertexte, constituée du manuel d'utilisation accessible dans son intégralité.

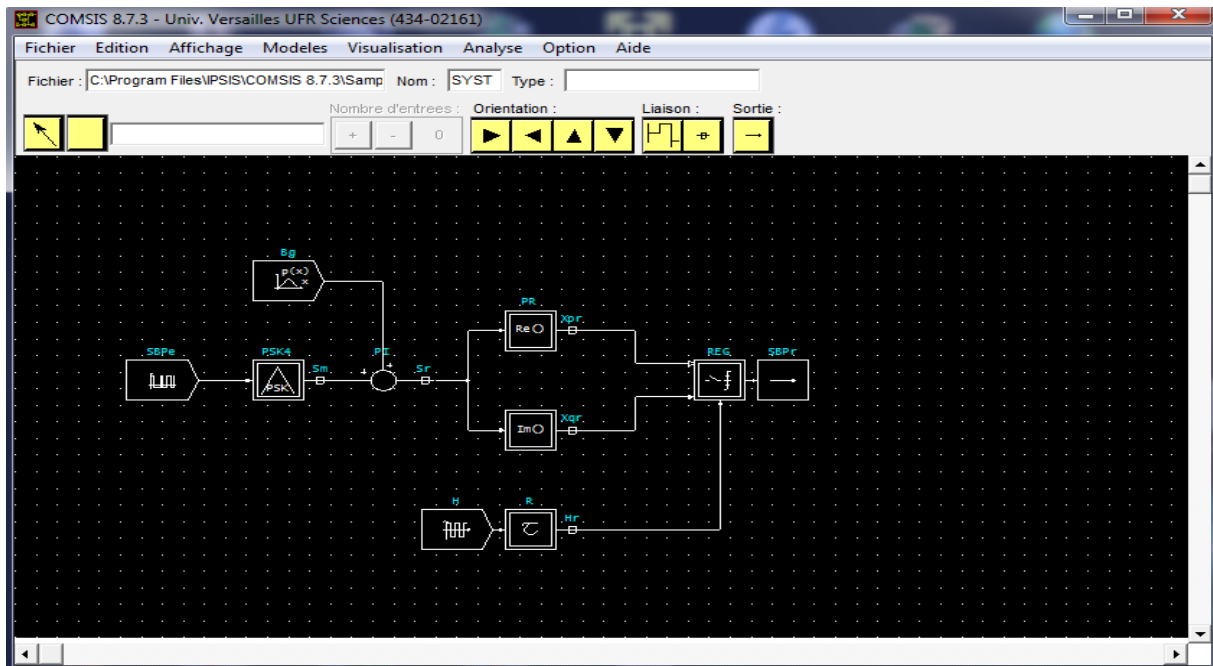


Figure. V.1.L'éditeur de schéma-bloc de COMSIS.

V.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.....

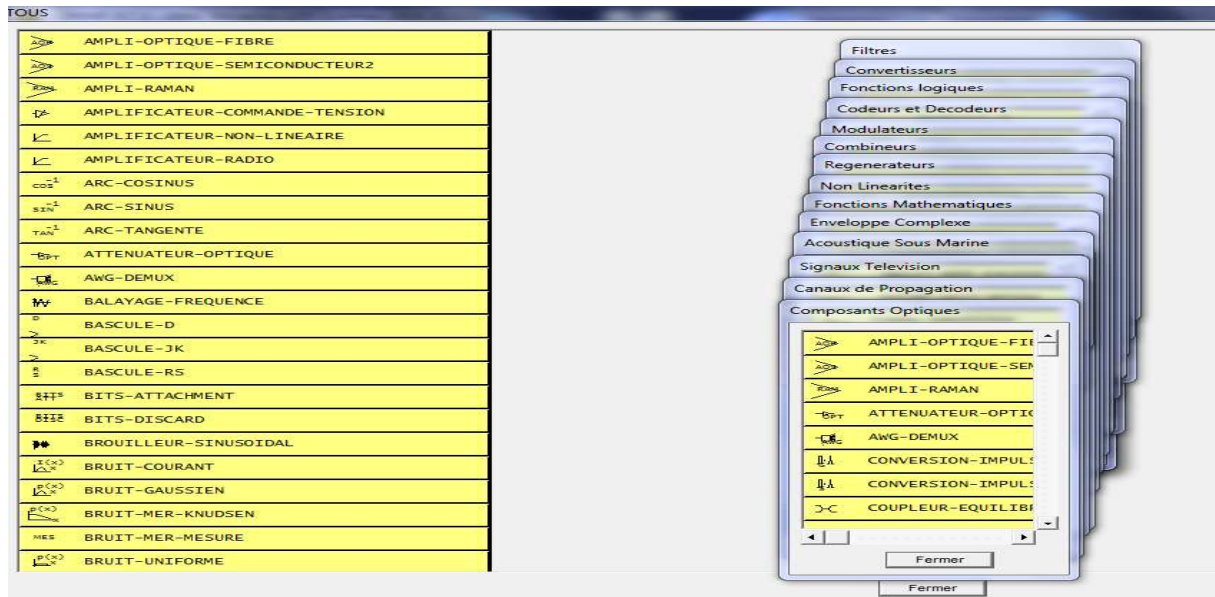


Figure. V.2 La bibliothèque de modèles de COMSIS.

V.1.3. La simulation :

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.....).
- 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.

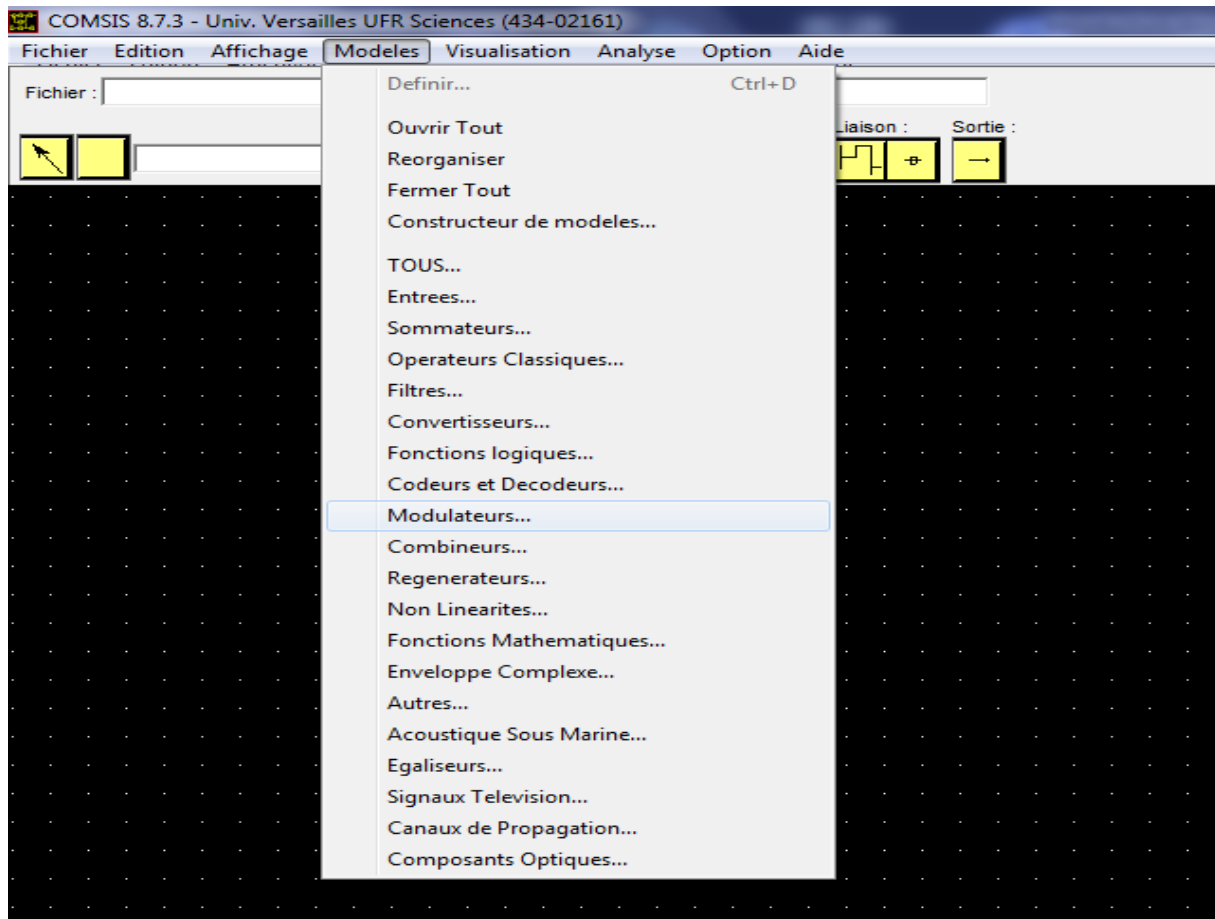


Figure. V.3. Menu des modèles de COMSIS.

- 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 ;

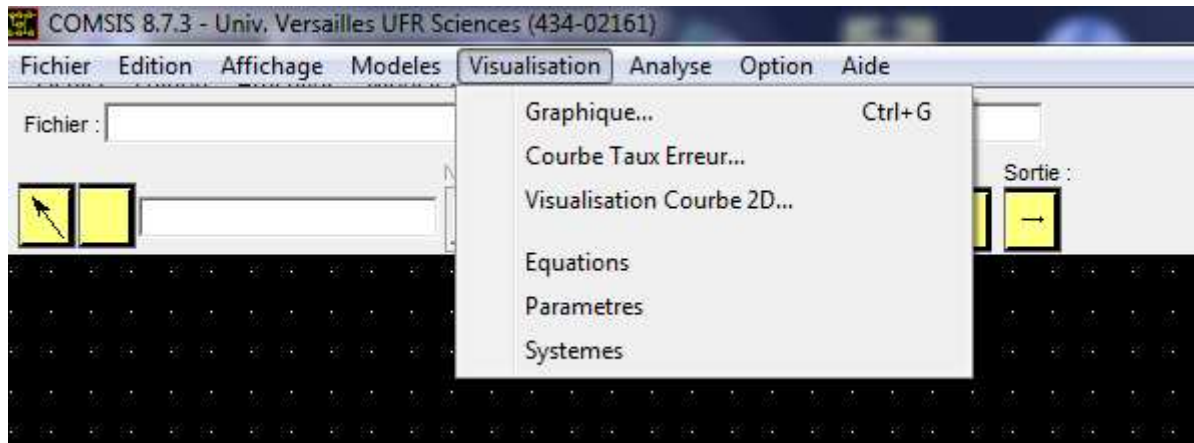


Figure.V.4.Menu visualisation de COMSIS.

- La nature du système (continu ou échantillonné).
- La partie simulation proprement dite est accessible par le menu Analyse.

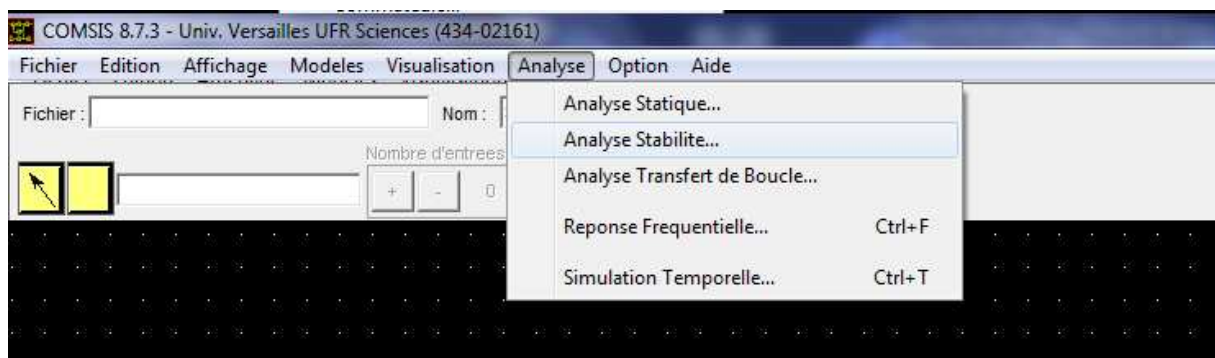


Figure. V.5.Menu Analyse de COMSIS.

- La visualisation des résultats s'effectue au moyen d'une fenêtre graphique
- 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.....

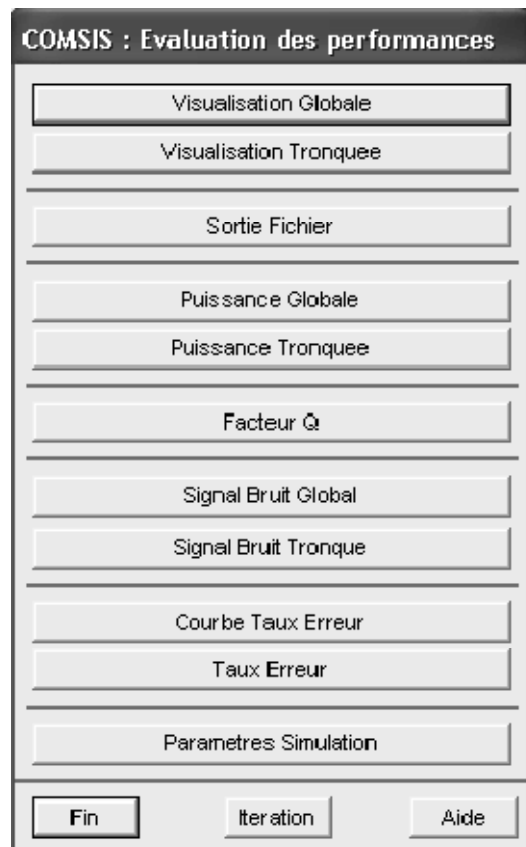


Figure.V.6. Menu Evaluation des performances.

- 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.....

V.2.Définition des paramètres

V.2.1.L'émetteur :

L'émetteur est composé par les éléments suivants :

- L'entrée est une séquence binaire aléatoire .

COMSIS : Definition des parametres

Generalites

- Nom : en
- Nature : SEQUENCE-BINAIRE-ALEATOIRE
- Groupe : Entrees
- Type (en sortie) : INDEFINI

Caracteristiques

DEBIT BINAIRE (Mbits/s) : 10000

POURCENTAGE DE 1 DE LA SEQUENCE : 6

OK Annuler Aide

- Codeur non retour a zéro inversé (NRZ-I) :

COMSIS : Definition des parametres

Generalites

- Nom : oo
- Nature : CODEUR-NRZ-M
- Groupe : Codeurs et Decodeurs
- Type (en sortie) : INDEFINI

OK Annuler Aide

- Codeur HDB3 :

COMSIS : Definition des parametres

Generalites

- Nom : hdb
- Nature : CODEUR-HDBN
- Groupe : Codeurs et Decodeurs
- Type (en sortie) : INDEFINI

Caracteristiques

INDICE : 3

AMPLITUDE DE SORTIE : 4

OK Annuler Aide

- L'alimentation du laser est un courant laser

COMSIS : Definition des parametres

Generalites

Nom : e
Nature : COURANT-LASER
Groupe : Composants Optiques
Type (en sortie) : INDEFINI

Caracteristiques

DEBIT BINAIRE (Mbits/s) : 5000
LONGUEUR DU REGISTRE : 8
COURANT MINIMUM (mA) : 12
COURANT MAXIMUM (mA) : 150

OK Annuler Aide

- Laser système .

COMSIS : Definition des parametres

Generalites

Nom : LAS
Nature : LASER-SYSTEME
Groupe : Composants Optiques
Type (en sortie) : INDEFINI

Caracteristiques

Type de definition : Systeme Physiques

Longueur d'onde (nm) : 1550
Courant de seuil (mA) : 15
Rendement Puissance/Courant (W/A) : 0.15
Largeur de raie (MHz) : 5 pour le courant (mA) : 50
Taux d'amortissement (MHz) : 4000 pour le courant (mA) : 50
Bande a -3 dB (MHz) : 8000

Donnees physiques modifiables : Donnees...

Parametres Facultatifs

Espacement entre modes (nm) : 1
 Chirp (MHz/mA) : 100
 Bruit RIN (dB/Hz) : -154 pour le courant (mA) : 70

Parametres physiques...

OK Annuler Aide

➤ Modulateur électro-absorption :

COMSIS : Definition des parametres

Generalites

Nom : mo
Nature : MODULATEUR-ELECTRO-ABSORPTION
Groupe : Composants Optiques
Type (en sortie) : INDEFINI

Caracteristiques

GAIN (OU PERTES) (dB) : 10
TENSION D'OFFSET (V) : 2
COEFFICIENT DE L'EXPOSANT DE LA FONCTION D'ABSORPTION (-) : 4
FACTEUR DE COUPLAGE PHASE-AMPLITUDE (-) : 0.5

OK Annuler Aide

V.2.2.La ligne de transmission :

➤ Fibre optique monomode :

COMSIS : Definition des parametres

Generalites

Nom : fo
Nature : FIBRE-OPTIQUE-MONOMODE
Groupe : Composants Optiques
Type (en sortie) : INDEFINI

Caracteristiques

Longueur de la fibre (km) : 100
Coefficient d'attenuation (dB/km) : 0.2
Dispersion chromatique (ps/nm/km) : Constante 5
Effet Kerr : Oui Non
Effet Raman : Oui Non
Coefficient de non linearite de la fibre (m2/W) : 3.2e-20
Gain Raman (m2/W) : 7.48e-21
Frequence de resonance (THz) : 12
Demi-largeur de raie Raman (THz) : 6.432
Aire effective de la section de la fibre (micro m2) : 80
Type de discretisation de la longueur : Fixe Variable
Valeur du pas (km) :
Valeur initiale du pas (km) :
Dispersion Modale de Polarisation : Oui Non
Birefringence lineique (ps/km) :
Longueur de couplage (km) :
Etat de la fibre
Retard introduit par la fibre (ns) : 1.5

OK Annuler Aide

V.2.3.le Récepteur :

➤ Photodiode – PIN :

COMSIS : Definition des parametres

Generalites

Nom : PIN
Nature : PHOTODIODE-PIN
Groupe : Composants Optiques
Type (en sortie) : INDEFINI

Caracteristiques

SENSIBILITE (A/W) : 0.9
COURANT D'OBSCURITE (nA) : 0

OK Annuler Aide

- Filtre électrique a basse fréquence

COMSIS : Definition des parametres

Generalites

Nom : FIL
Nature : FILTRE-COSINUS-BF
Groupe : Filtres
Type (en sortie) : INDEFINI

Caracteristiques

bande passante a 3 dB (MHz) : 5000
coefficient d'arrondi : 0.5
retard (Micro-sec) : 1e-4

OK Annuler Aide

- La sortie

COMSIS : Definition des parametres

Generalites

Nom : s
Nature : SORTIE
Groupe : -
Type (en sortie) : INDEFINI

OK Annuler Aide

V.3. Interprétation des résultats :

D'après les résultats obtenus on les traite à l'aide de :

- La densité spectrale de puissance au niveau d'entrée et la sortie.
- Concernons le diagramme de l'œil on a fait une comparaison entre les débits 10 Gbits/s et 40 Gbits/s, d'une liaison codée en premier temps avec NRZ-I et en second temps avec HDB3 ; avec et sans compensation.

V.4. Simulation I : Liaison point à point à haut débit à 10 Gbits/s et 40 Gbits/s codé par NRZ-I

A.1) Sans compensation :

Cette simulation permet d'illustrer une comparaison entre une liaison optique point à point de débit 10 Gbits/s et 40 Gbits/s codée par NRZ.-I

On a réalisé le schéma suivant :

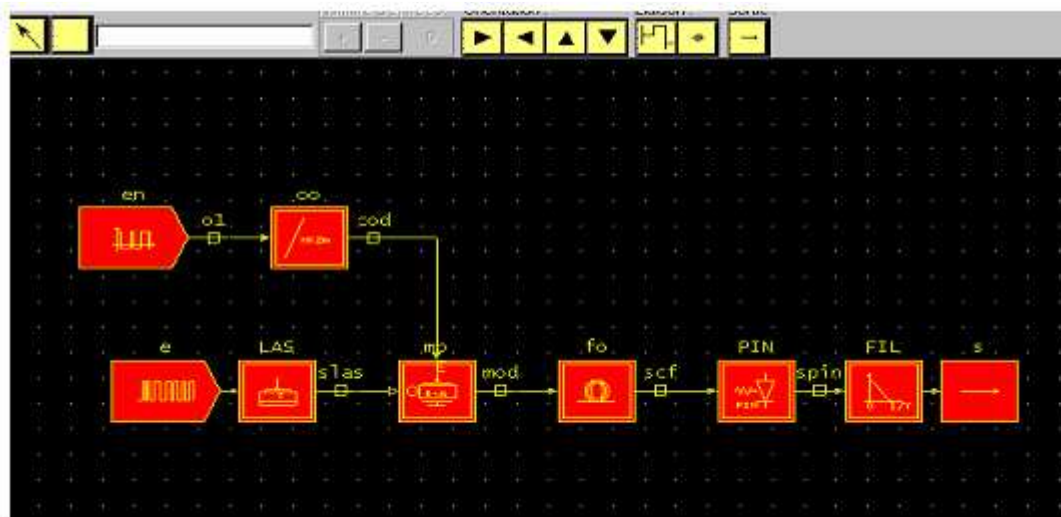
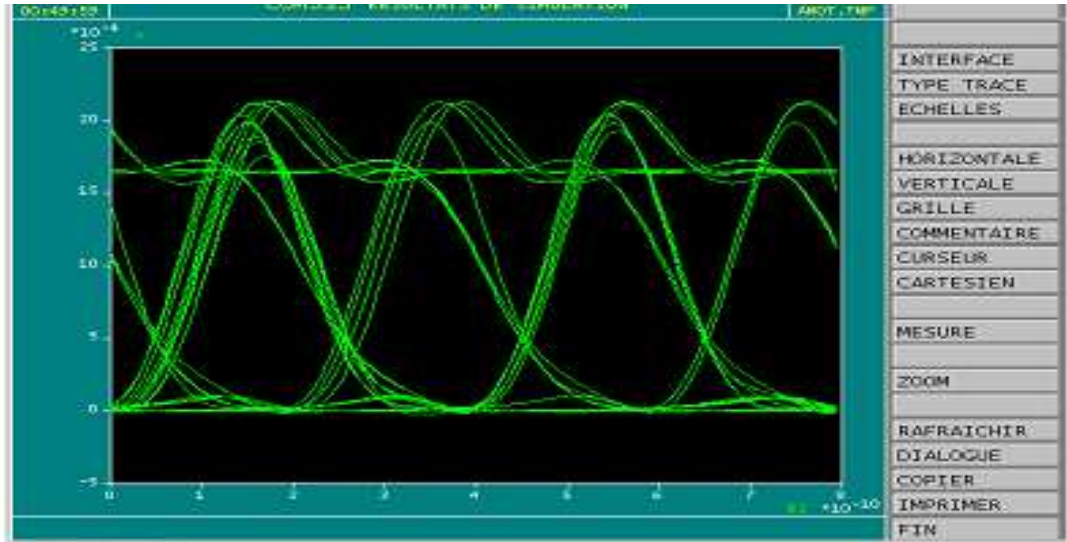


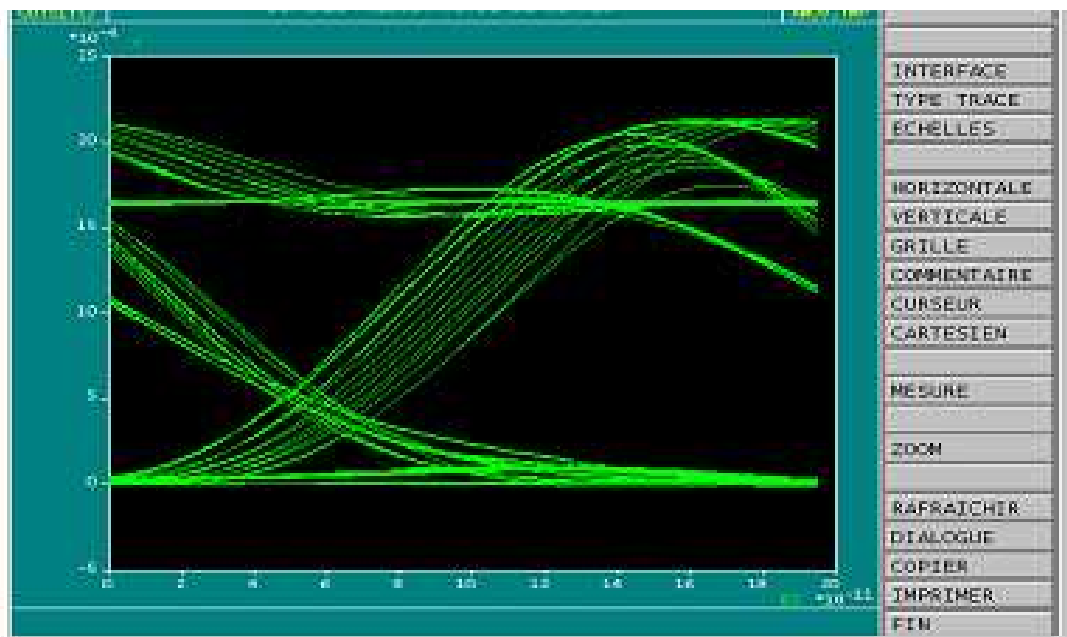
Schéma bloc de la liaison de simulation.

a) Diagramme de l'oeil :

- Liaison à 10Gbits:



- Liaison à 40Gbits :

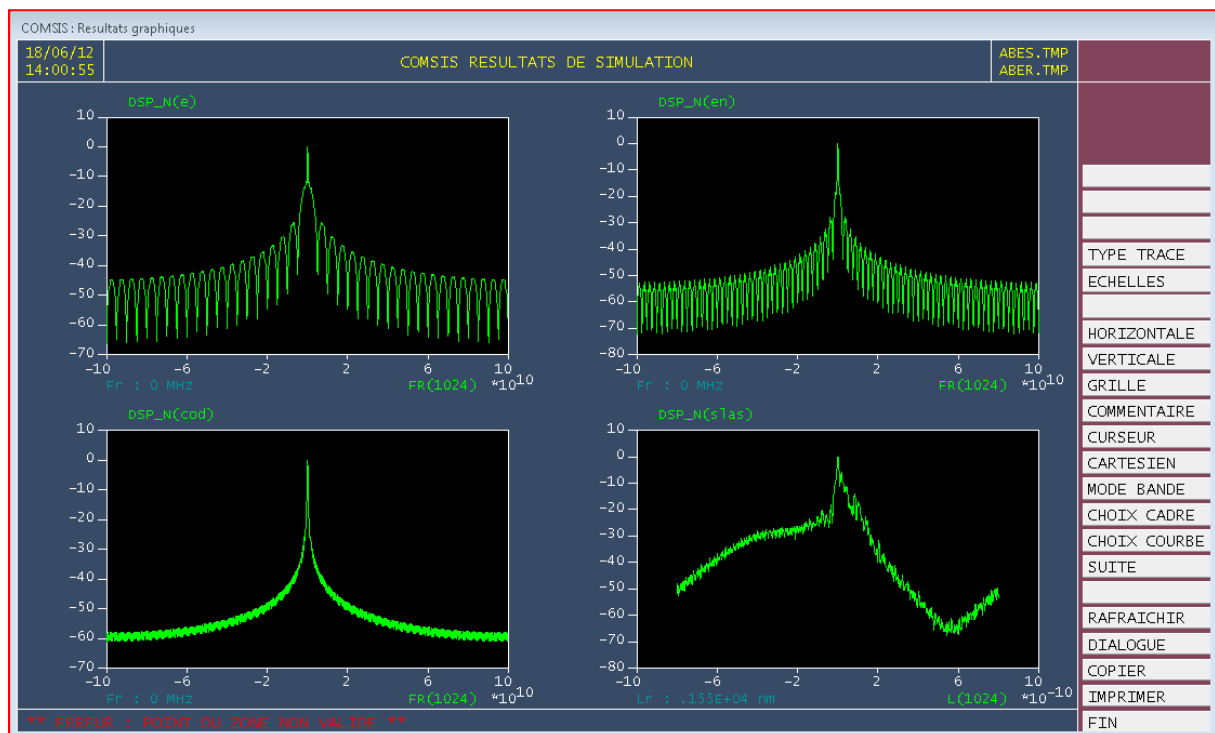


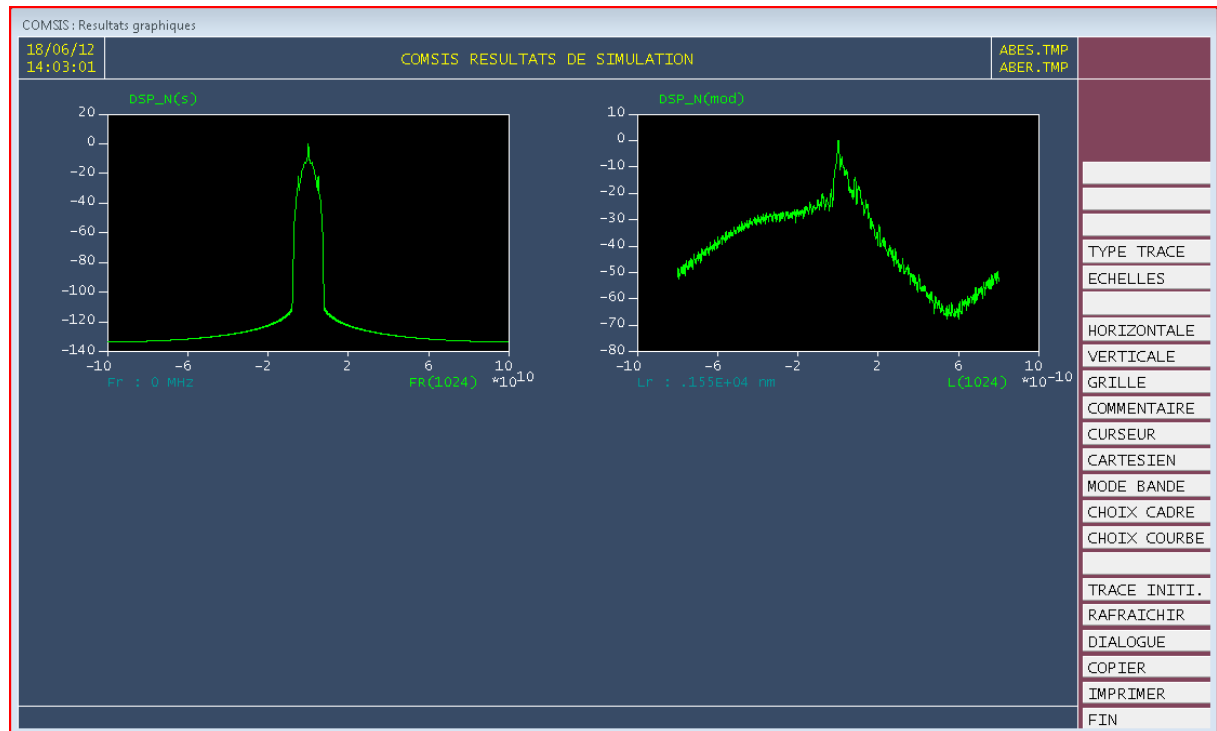
En l'absence de bruit (40Gbits/s), l'œil est ouvert, si bien qu'il serait possible de détecter les données sans erreur en plaçant un seuil de décision entre les deux valeurs extrêmes. En 10Gbits/s on observe des traces brouillées et élargies et la dégradation de la probabilité d'erreur due à l'interférence entre symboles est d'autant plus grande que l'œil est pas bien ouvert.

b) Densité spectrale de puissance :

D'après notre simulation on trouve les graphes au dessous, au niveau des blocs suivants :

- entrée
- codeur
- laser
- modulateur
- sortie





Après la modulation du signal d'entrée codé en NRZ-I avec un signal laser, on aura un signal lumineux mais bruité par rapport au signal d'entrée ; après la transmission, le signal lumineux aura subi plus de bruit, une fois arrivé au photodétecteur PIN, il se convertit de la forme lumineuse à celle électronique. Et pour un meilleur signal à la sortie quasi identique à celui de l'entrée, on filtre le bruit à la sortie.

A.2) Avec compensation :

Cette simulation permet d'illustrer une comparaison entre une liaison optique point à point à haut débit (10Gbits, 40Gbits) codé par NRZ-I.

On a réalisé le schéma suivant :

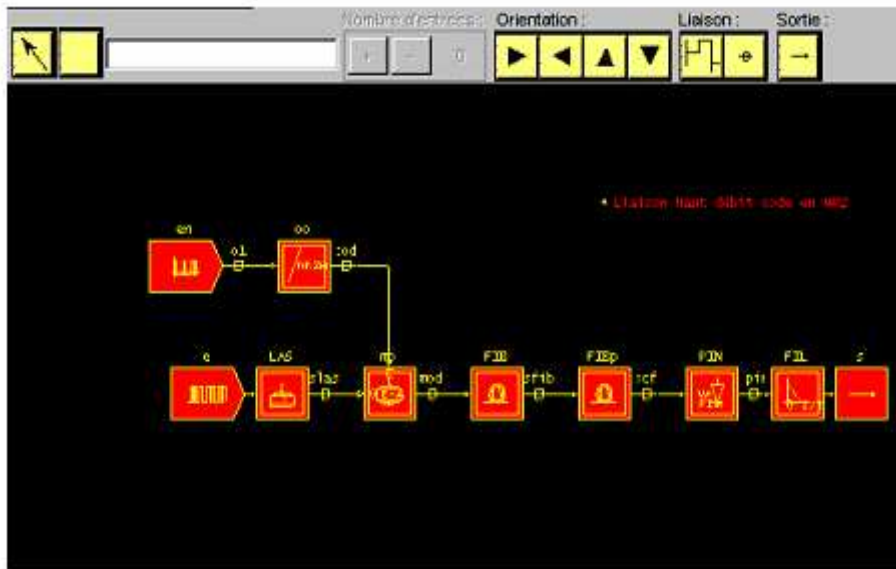
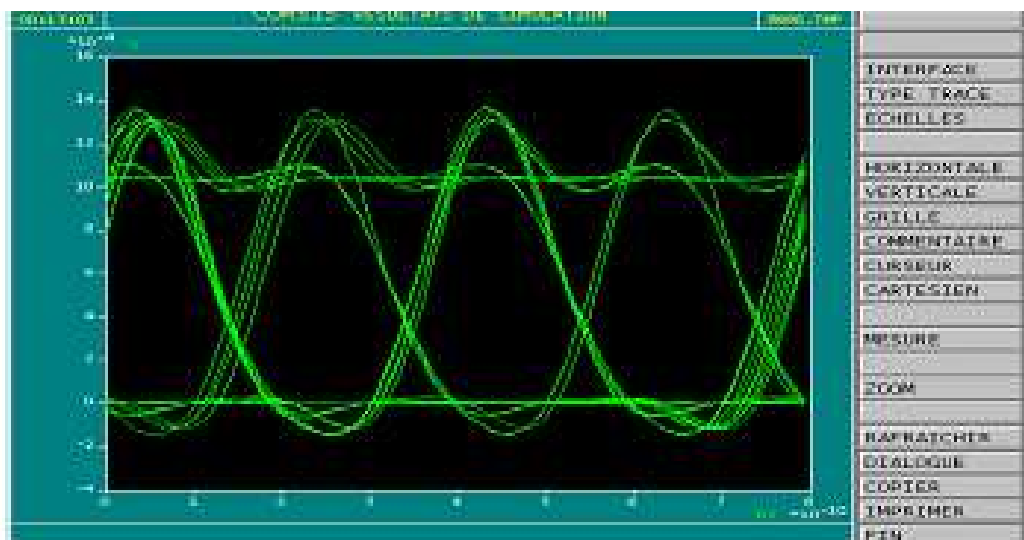


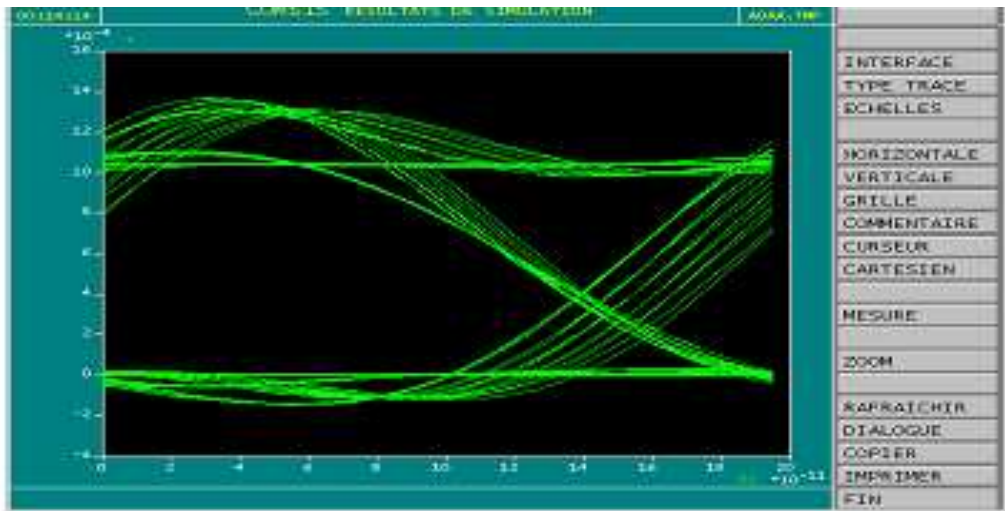
Schéma bloc de la liaison de simulation

a) Diagramme de l'œil :

- Liaison a 10Gbits :



- Liaison à 40Gbits :

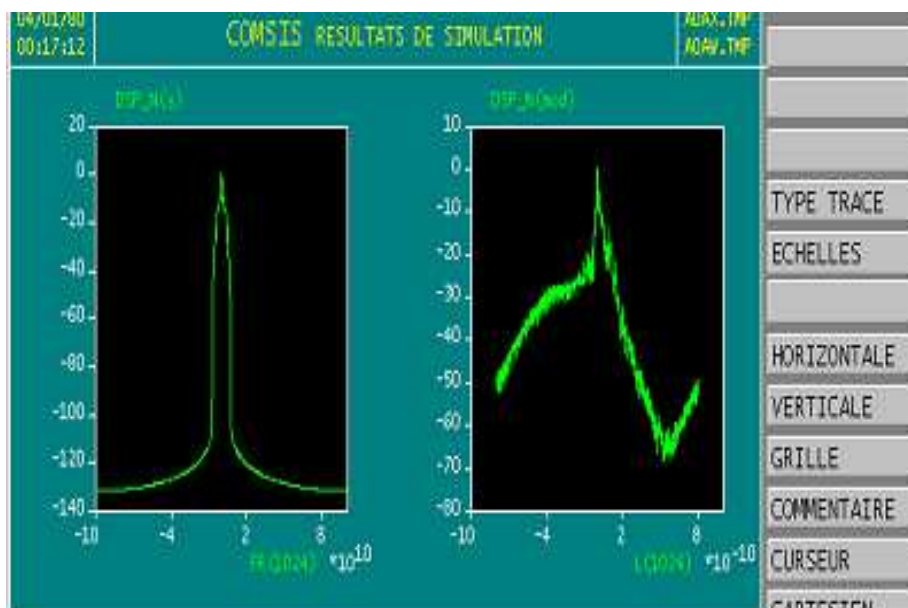
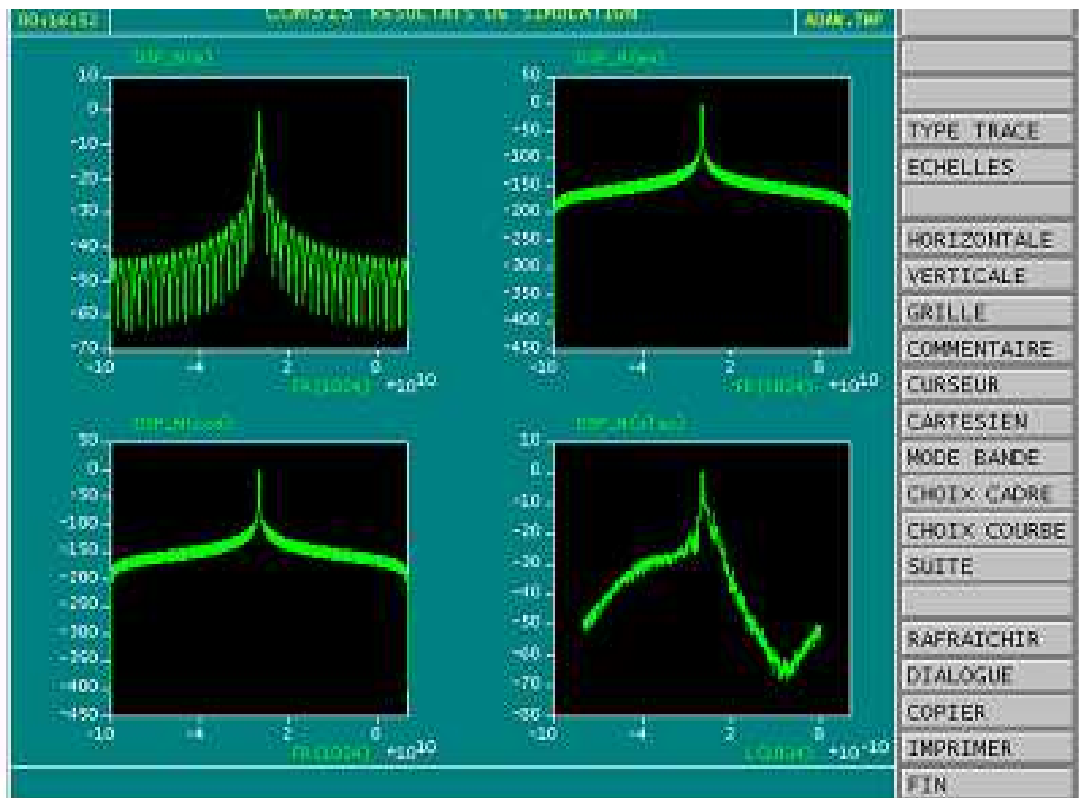


La première fibre introduite de la dispersion, qui élargit les impulsions. La deuxième fibre est de dispersion négative et permet, en ajustant sa longueur, de compenser exactement la dispersion accumulée dans la première fibre. Alors une diminution de bruit qui est exprimé par l'ouverture de l'oeil donc amélioration en qualité de transmission.

b) Densité spectrale de puissance :

Les graphes ces dessous représentes la DSP, au niveau des blocs suivantes :

- Les entrées
- Laser
- codeur
- modulateur
- la sortie



Après la modulation du signal d'entrée codé en NRZ-I avec un signal laser, on aura un signal lumineux mais bruité par apport au signal d'entrée ; après la transmission, le signal lumineux aura subit plus de bruit, pour le minimiser, on place un morceau de fibre dit fibre de compensation qui élimine la dispersion chromatique de la ligne, une fois arrivé au photoditecteur PIN, il se converti de la forme lumineuse a celle électronique. Et pour un meilleur signal à la sortie quasi identique à celui de l'entrée, on filtre le bruit à la sortie.

V.5.Simulation II: Liaison point à point à haut débit à 10Gbits et 40Gbits codé par HDB3.

B.1) Sans compensation :

Cette simulation permet d'illustrer une comparaison entre une liaison optique point à point à haut débit (10GHZ, 40GHZ) codé par HDB3.

On a réalisé le schéma suivant :

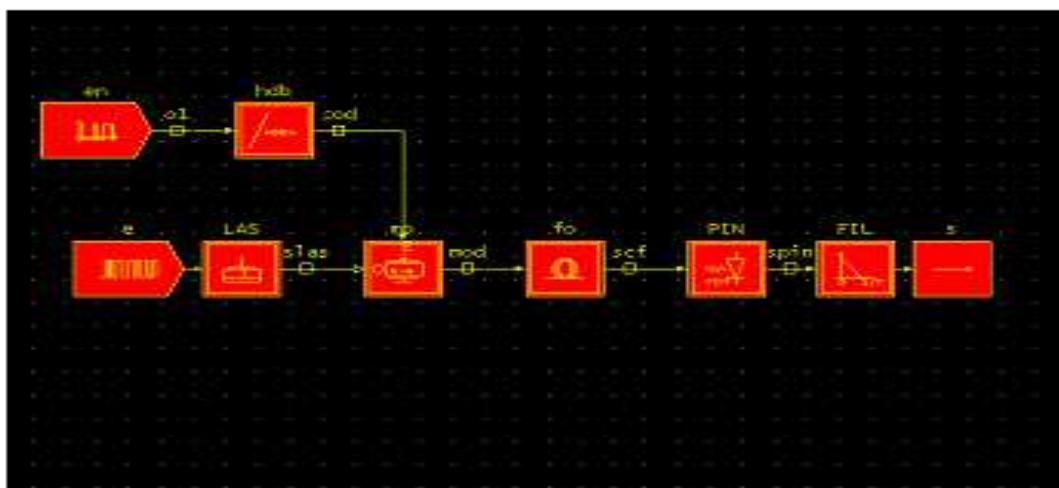
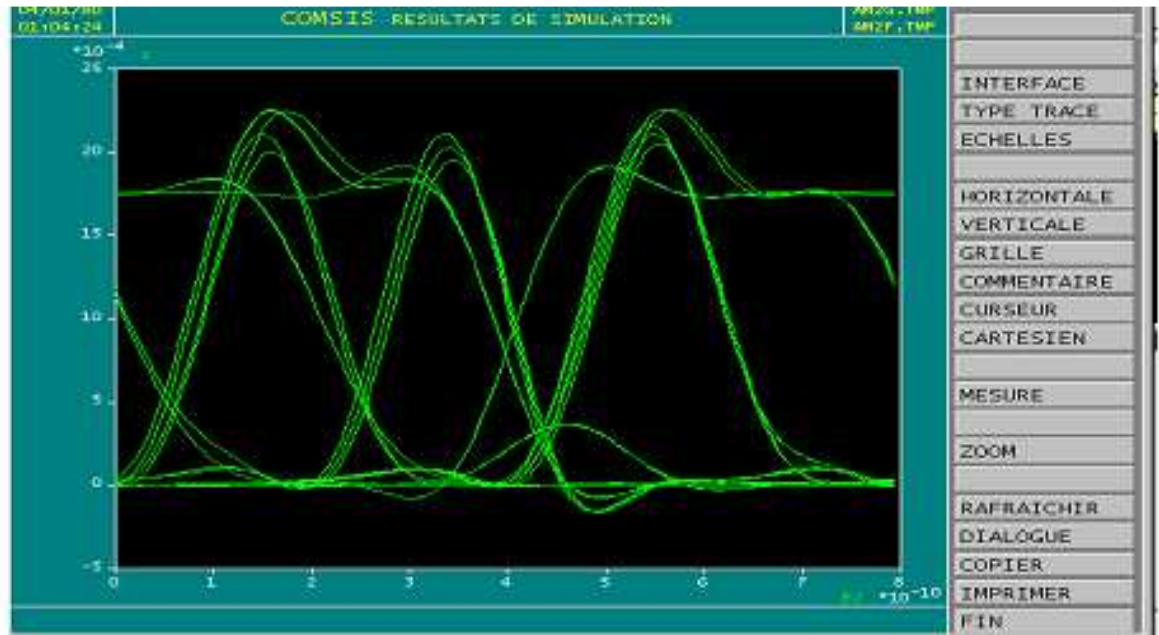


Schéma bloc de la liaison de simulation

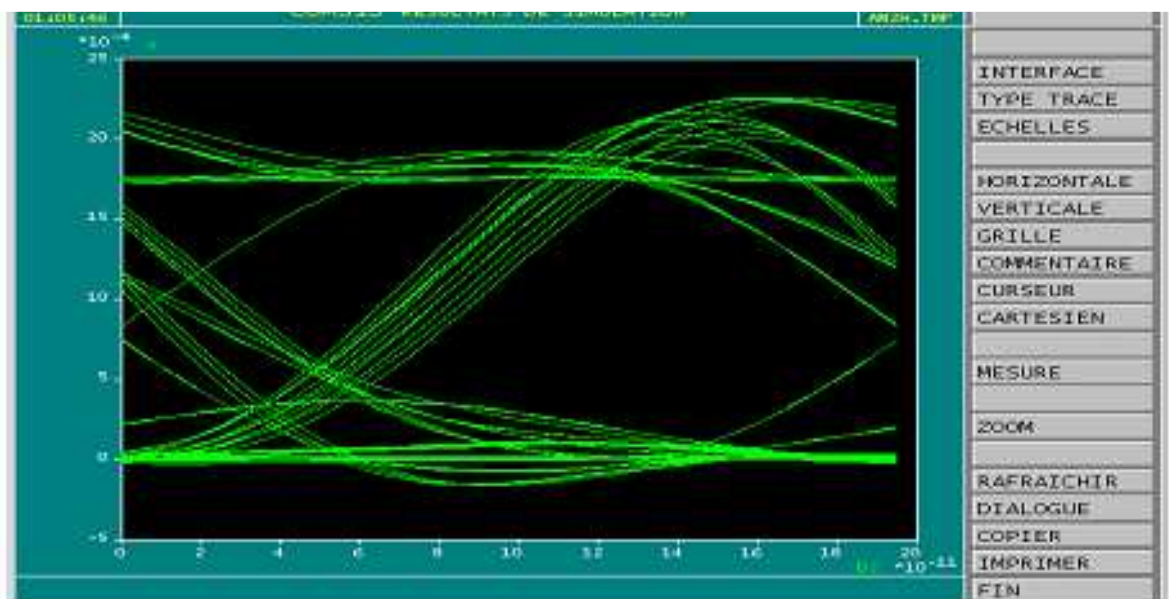
Analyse :

a) Diagramme de l'oeil :

- Liaison à 10Gbits :



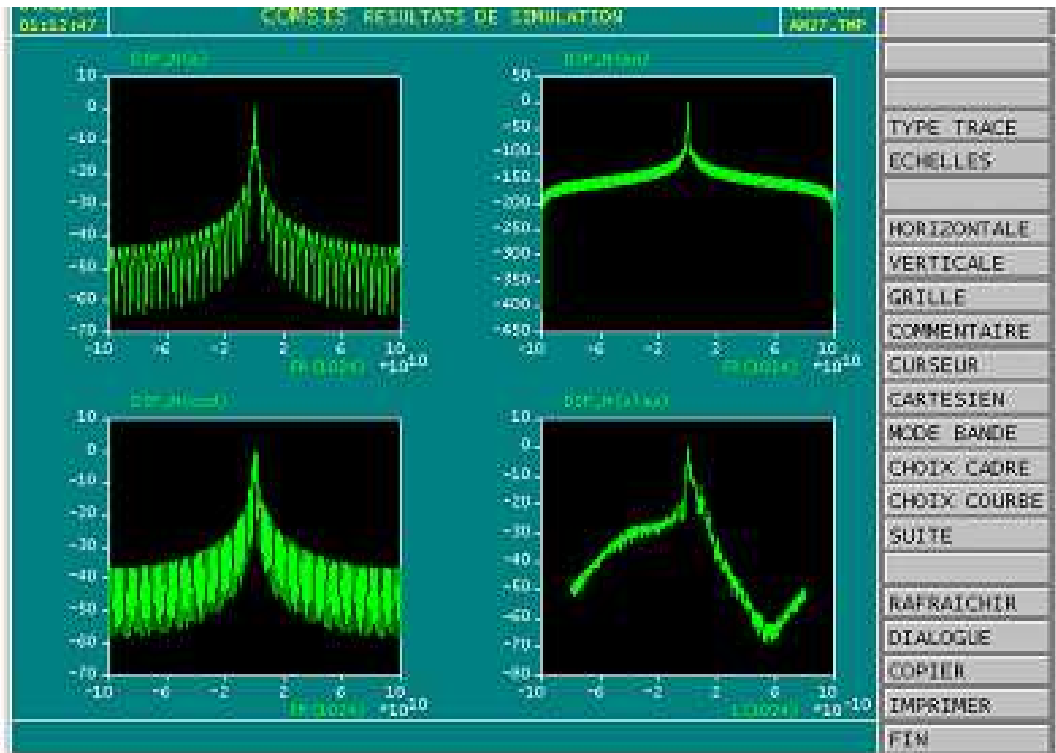
- Liaison à 40Gbits :

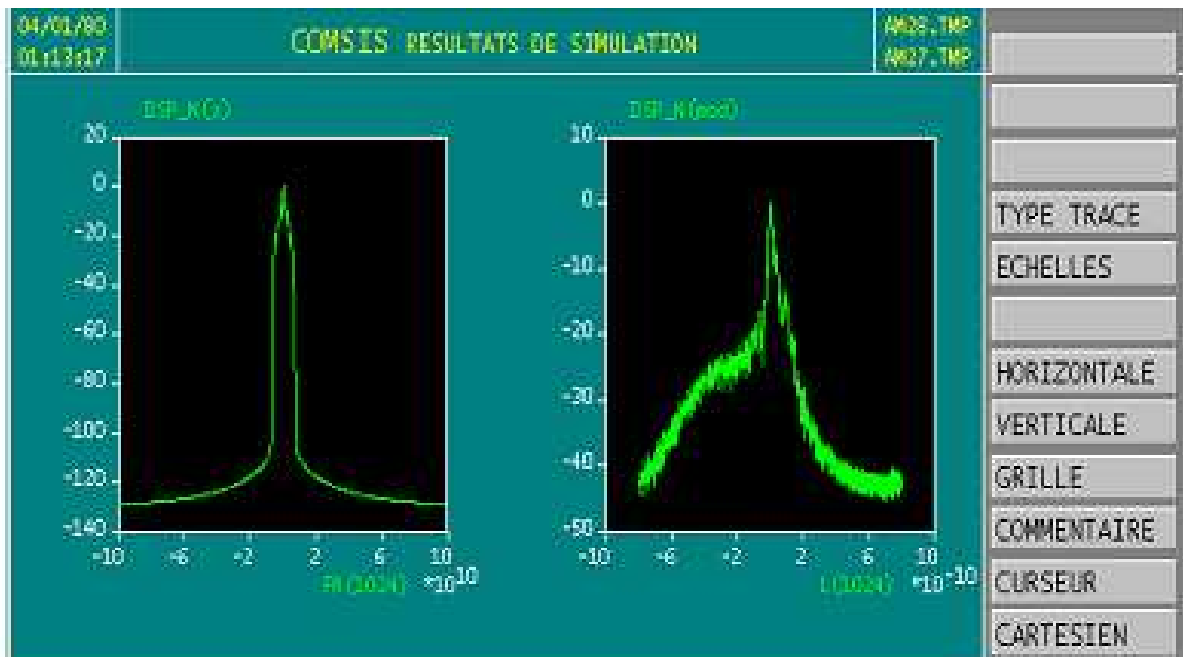


b) Densité spectrale de puissance :

D'après notre simulation on trouve les graphes au dessous, aux niveau des blocs suivants :

- Les entrées
- codeur
- laser
- modulateur
- la sortie





Après la modulation du signal d'entrée codé en HDB3 avec un signal laser, on aura un signal lumineux mais bruité par apport au signal d'entrée ; après la transmission, le signal lumineux aura subit plus de bruit, une fois arrivé au photodétecteur PIN, il se converti de la forme lumineuse a celle électronique. Et pour un meilleur signal à la sortie quasi identique à celui de l'entrée, on filtre le bruit à la sortie.

B.2) Avec compensation :

Cette simulation permet d'illustrer une comparaison entre une liaison optique point à point à haut débit (10Gbits, 40Gbits) codé par HDB3.

On a réalisé le schéma suivant:

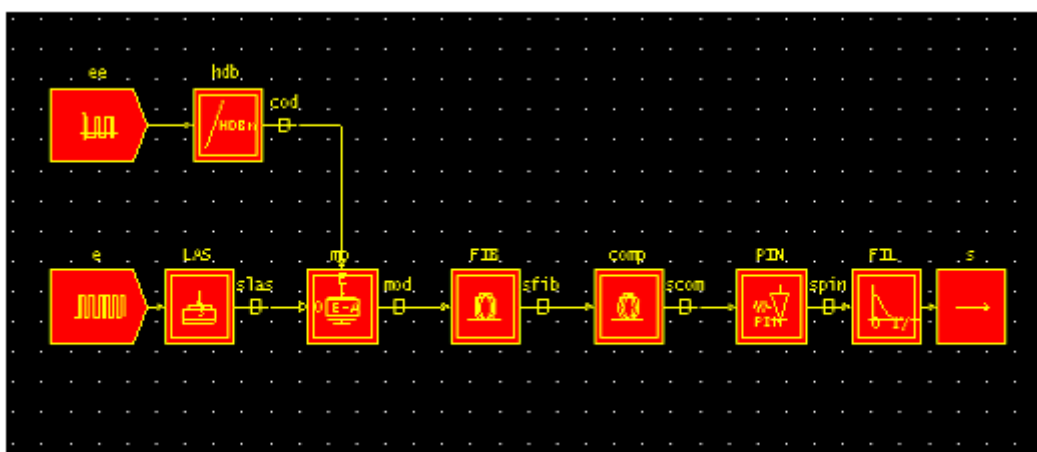
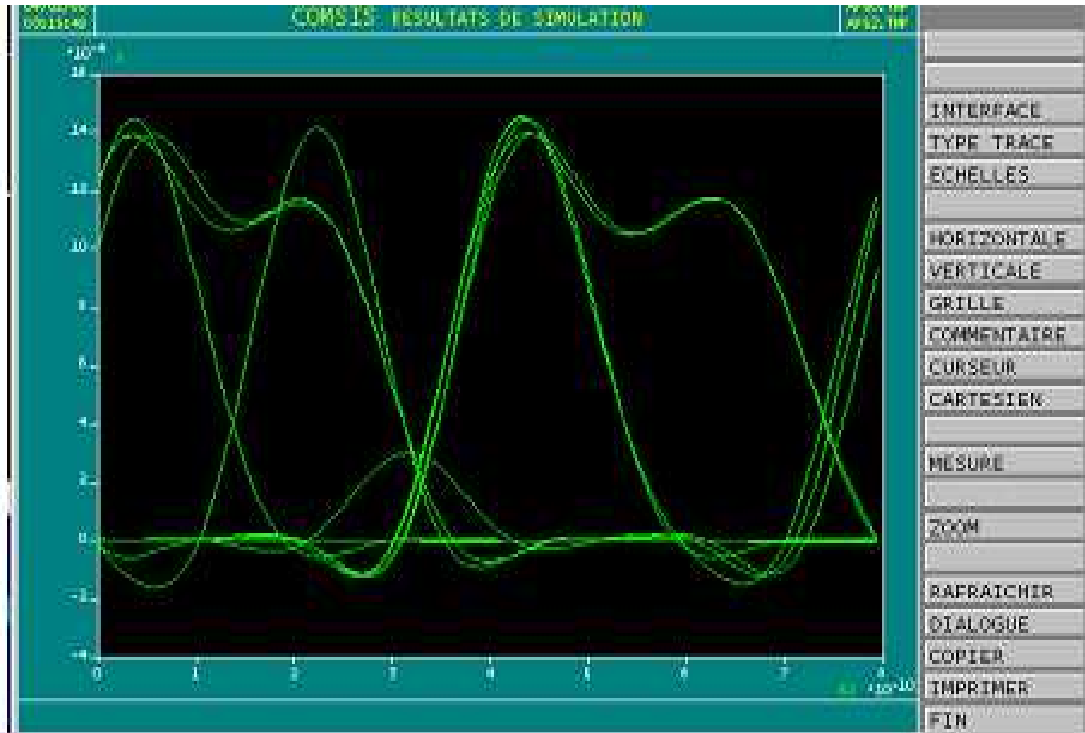


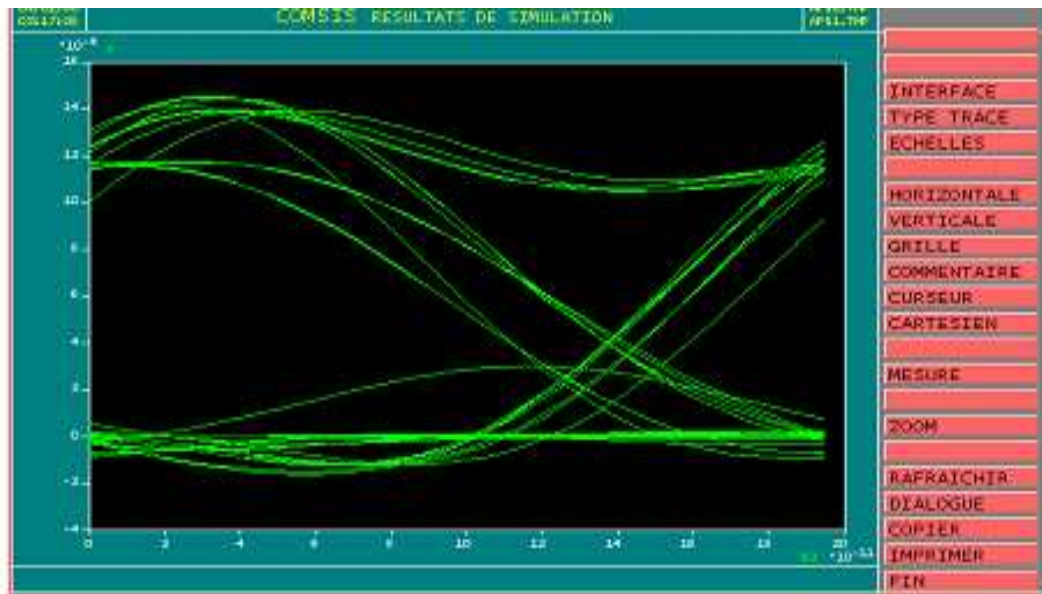
Schéma bloc de la liaison de simulation

a) Diagramme de l'œil :

- Liaison à 10Gbits :



- Liaison à 40Gbits :

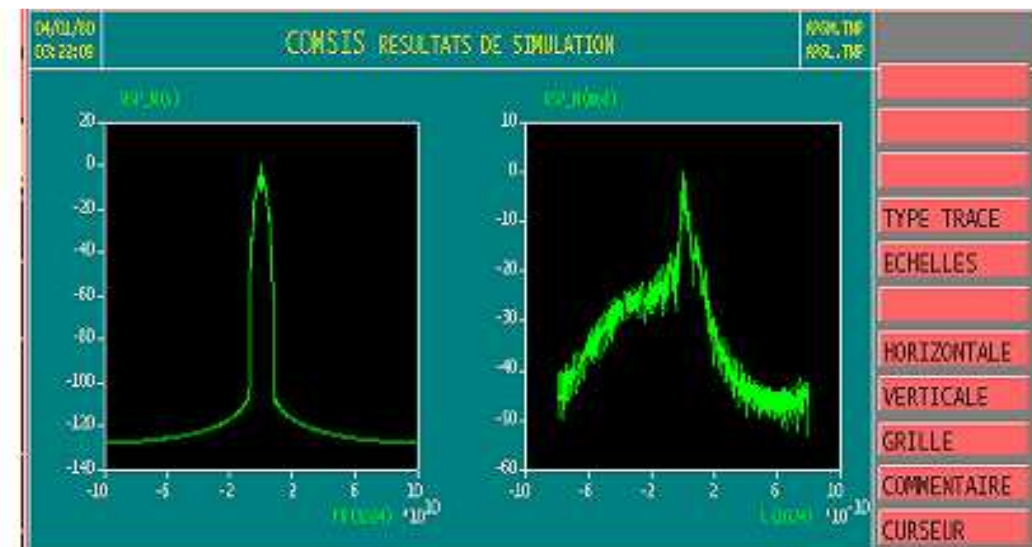
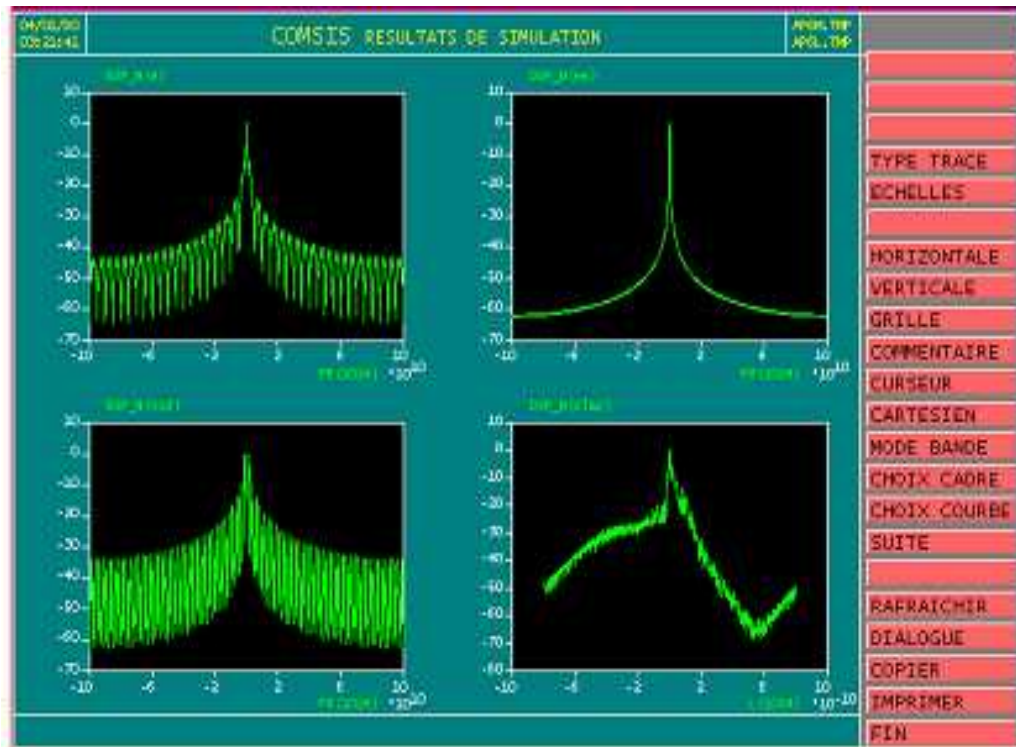


On voit que les résultats obtenus avec le code NRZ-I dans tous les cas (débit différent, avec et sans compensation) sont plus performants que les résultats obtenus avec le code HDB3. On se base sur l'ouverture de l'œil.

b) Densité spectrale de puissance :

Les graphes ci-dessous représentent la DSP, au niveau de :

- Les entrées
- codeur
- laser
- modulateur
- la sortie



Après la modulation du signal d'entrée codés en HDB3 avec un signal laser, on aura un signal lumineux mais bruité par apport au signal d'entrée ; après la transmission, le signal lumineux aura subit plus de bruit, pour le minimiser, on place un morceau de fibre dit fibre de compensation qui élimine la dispersion chromatique de la ligne, une fois arrivé au

photodecteur PIN, il se converti de la forme lumineuse a celle électronique. Et pour un meilleur signal à la sortie quasi identique à celui de l'entrée, on filtre le bruit à la sortie.

Conclusion :

Cette simulation permet de démontrer le code le plus performant pour la liaison point a point à des débits différents 10Gbit/s et 40Gbits/s, en utilisant la technique de la fibre de compensation pour minimisé la dispersion. On utilise cette technique pour obtenir une meilleure qualité de transmission, d'après les résultats de simulation on a conclud que le code NRZ répond à ces besoins car il est riche de transition ce qui permet la récupération du signal d'horloge.

Conclusion générale

Conclusion générale

D'après l'étude faite sur les réseaux PDH et SDH, il ressort que le système SDH apporte les améliorations suivantes : L'intégration de la gestion des réseaux, la Connexion inter constructeur, l'augmentation des distances entre répéteurs, l'interface possibles vers tous les niveaux PDH, Visibilité directe des affluents, Évolution aisée vers des débits supérieurs.

D'autre part l'utilisation couplée de SDH et WDM offrent des débits plus important, soit en augmentant le débit par canal, soit en mettant en jeu un plus grand nombre des canaux(DWDM), voir les deux au même temps.

Les résultats de cette étude ont montré que la simulation système est avant tout une aide importante pour la conception et l'optimisation d'une liaison optique.

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.

Bibliographie

Bibliographie

Livre :

[1] **I et. JOINDOT et douze coauteurs** « Les télécommunication par fibre optiques »
édition **MASSON 1996, FRANCE**

[2] **P.LECOY** « Télécommunication » édition **E.C.P 2001,FRANCE**

[3] **Yasuharu Suematsu / Ken-Ichi IGA** « Transmission sur fibre optique(technologie
général) »édition **MASSON 1984 ,FRANCE**

[4] **P. LECOY :** « **technologie des telecom** »,édition **HERMES 1995,FRANCE**

[5] **THOMSON-CSF** « transmission optiques »édition **MASSON 1982,FRANCE**

[6] **Jean-Piérre Laude** « le multiplexage de longueur d'onde ».édition **MASSON
1992,FRANCES**

[7] **Z.S.MEBAREK:** « transmission par fibre optique »édition **OPU 2001,ALGERIE**

Mémoires de fin d'études :

[8] **HAMITOUCHE Arezki** « Multiplexage SDH et dimensionnement des réseaux
DWDM », Mémoire d'ingenieur, UMMTO2010

[9] **GUETTAL Idir et IFRIHADDADENE Adel,**« Etude d'une liaison par fibre optique a
haut débit(Technologie WDM) »,Mémoire d'ingenieur,UMMTO2010

Bibliographie

Documentation Algérie Telecom :

- [10] « Nouvelles technologies réseaux :SDH »
- [11] « Form SDH Technodis1»,
- [12] « Cours Technologie WDM»,
- [13] « Cours_AT_Composants WDM »,
- [14] « EGTP-Composants optoélectroniques »,
- [15] « Cours A mplificateur Optique »,

SITE WEB :

- [S.1] <http://www.telcite.fr/fibre.htm>
- [S.2] <http://christian.caleca.free.fr/fibroptique/>
- [S.3] <http://mapage.noos.fr/mnimier/internet/technique/fibreoptique/fibre-optique1.html>
- [S.4] <http://www.webdiffusion.tv/fibre.htm>