

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Dr. Tahar Moulay–Saida
Faculté de la Technologie
Département d'Electronique



Projet

De fin d'études pour l'obtention du diplôme Master en électronique
Option : Instrumentation

THÈME

**ETUDE D'UNE LIAISON RADIO SUR FIBRE
OPTIQUE D'UN SIGNAL WIFI**

Présenté Par: -

DAOUDI othman
LARBI boukhars brahim

Devant le jury composé de :

Président :

Chami Nadir

Examineur :

Bouchenak sofya

Encadreur :

Mme. Aboura.Lamia

Promotion 2019/2020

REMERCIEMENTS

NOS REMERCIEMENTS AVANT TOUS AU BON DIEU QUI NOUS A AIDÉS POUR QU'ON PUISSE RÉALISER CE MODESTE TRAVAIL

J'ADRESSE MES SINCÈRE REMERCIEMENTS À MON ENCADREUR MADAME ABOURÀ : POUR LES EFFORTS ET LE TEMPS QU'ELLE NOUS A CONSACRÉ, DE SON EXPÉRIENCE ET SES ENCOURAGEMENTS ELLE NOUS A ÉCLAIRÉ LE CHEMIN DE CETTE ÉTUDE.

NOS RECONNAISSANCES VONT ÉGALEMENT À NOTRE ENSEIGNANT DE LA SPÉCIALITÉ (ELN) POUR LEURS HONORABLES TACHES DURANT MA PÉRIODE D'ÉTUDES.

MERCI À TOUS CEUX QUI NOUS ONT AIDÉS DE PRÈS OU DE LOIN POUR ACCOMPLIR CE TRAVAIL.

MERCI

Sommaire

Sommaire

Glossaire

Introduction générale	1
<u>Chapitre 1 : Généralités</u>	
I.1.1.Systèmes de transmission sur fibre optique.....	3
I.1.1.INTRODUCTION	3
I.1.2.Les canaux de transmission	4
I.1.2.1.Cas des lignes de transmission	4
I.1.2.1.1.Guide d'onde	5
I.1.3.Fibre optique	7
I.1.3.1.Principe théorique	7
I.1.3.2.Paramètres caractéristiques des fibres optiques.....	7
I.1.3.3.Ouverture numérique (ON)..	8
I.1.3.4.Différents types de fibre :	9
I.1.4.Classification le nombre de mode.....	10
I.1.4.1.Classification le matériau constituant la fibre optique.....	10
I.1.4.1.1.Fibre en verre.....	10
I.1.4.1.2.Fibre en plastique.....	10
I.1.5.Connexion des fibres optiques.....	10
I.1.6.Transmission d'information sur fibre optique.....	11

I.2. Radio sur fibre.....	11
I.2.1. Topologie et technologie d'intégration	13
I.2.2. Performances électriques	13
I.2.3. Intégration de l'antenne dans le système RoF	14
I.2.4. Avantages et limites de la technologie ROF.....	14
I.2.4.1. Les avantages de ROF	14
I.2.4.2. Limitations des systèmes RoF.....	14
I.2.5. Les applications principales de la radio sur fibre.....	15
I.2.6. Les moyens pour transmettre le signal.....	15
I.2.6.1. Techniques numériques	15
I.2.6.2. Techniques analogiques	15
I.4- Radio Fréquence.....	15
I.4.1. Communication sans fil	16
I.4.2. Chaîne de transmission.....	16
I.4.2.1. L'émetteur	17
I.4.2.2. Le canal	18
I.4.4.3. Le récepteur	18
I.4.4.3.1. Caractéristiques principales d'un récepteur.....	18
I.4.4.3.2. Organes principaux d'un récepteur.....	19
I.5. WIFI	19
I.5.1. Portées et débits.....	20
<u>Chapitre 2 : radio sur fibre</u>	
II.1. Introduction.....	22
II.2. Princeps de technologie ROF	22

II.3.Les avantage de fibre optique.....	23
II.4.Limitation des systèmes RoF	24
II.5.Les applications principales de la radio sur fibre	24
II.6.Les architectures générale de la radio sur fibre.....	24
II.6.1 l’architecture point à point radio sur fibre	25
II.6.2 Les architectures point à multipoints radio sur fibre.....	26
II.6.3 Les architectures radio sur fibre indoor et domestique.....	27
II.7 Modulation de radio sur fibre	28
II.7.1.Modulation externe.....	28
II.7.2Modulation directe.....	29
II.8.Canal de transmission de un ROF	29
II.8.1.L’émetteur	30
II.8.2. L’élément de connexion	30
II.8.3.Le récepteur.....	31

Chapitre 3 : Simulation

III.1.Présentation de logicielle	32
III.2.Application de optisystem	32
III.3.Principales parties de l'interface graphique	33
III.3.1.Présentation du projet.....	33
III.3.2.Dockers.....	34
III.3.2.1.Bibliothèque de composants.....	34
III.3.2.2.Navigateur de projet	35
III.3.2.3.La description.....	36
III.3.3.Barre d'état.....	36
III.3.4.Barre de menu	37

III.3.5. Utilisation de la bibliothèque de composants	37
III.3.6. Fonction de connexion automatique	39
III.3.7. Activation et désactivation de la fonction de connexion automatique	39
III.3.9. Visualisation des résultats	40
III.3.10. Paramètres de composants	41
III.3.10.1 Affichage et modification des propriétés du composant	41
III.3.10.2. Affichage des paramètres dans la mise en page	42
III.3.11. Unités de paramètres	42
III.3.12 Sauvegarde des résultats de la simulation	43
III.4. Résulta de simulation	45
III.4.1. Les signaux	45
III.4.2. les fréquences.....	46
III.4.3. le débit de biner	47
Conclusion Générale	48

Liste des figures

Lista de figura

Figure I.1 : linge de Transfer	5
Figure I.2 : guide d'onde.....	6
Figure I.3 : réfraction et transmis de rayon	7
Figure. I.4 : L'absorption de la lumière	8
Figure I.5 : modulation de fibre optique	8
Figure I.6 : passe d'un rayon donne tuyau	9
Figure I.7 : type de fibre optique	9
Figure I.8 : Principe de la Radio sur fibre (RoF)	12
Figure I.9 :architecture tx/rx.....	13
Figure I.10 Usinage de l'antenne dans la mousse (a). Revêtement métallique de la mousse (b)	13
Figure I.11 : system d'un radio fréquence	16
Figure I.12 : chaine de transmission	17
Figure 1.13 : Adaptation (a) , diagramme de l'antenne (b)p.....	20
Figure 1.14 : Photographie (a) , adaptation de l'antenne (b).....	21
Figure 1.15 : Intégration de l'antenne	21
Figure II.1 : Schéma synoptique d'une liaison RoF.	22
Figure II.2 : Affaiblissement de la fibre multimode { gradient d'indice en fonction de la longueur d'ondes.....	23
Figure II.3 :Schéma d'un système d'antenne distribué utilisant la fibre optique en P2P	26
Figure II.4 : Exemple d'architecture radio sur fibre pour les bâtiments.....	28
Figure II.5 : Modulation directe d'une diode.....	29
Figure II.6 : schéma de un ROF	30
Figure II.7 : schéma de un léser	30
Figure II.8 :fibre optique	31

Figure II.9: un photodétecteur pin	31
Figure III.1 : l'interface graphique	33
Figure III.2: Présentation du projet	34
Figure III.3 : Fenêtre de la bibliothèque de composants.....	35
Figure III.4 : fenêtre du navigateur de projet.....	36
Figure III.5 : Fenêtre de la description	36
Figure III.6 : barre d'état.....	37
Figure III.7 : barre de menu.....	37
Figure III.8 : Ajout d'un bit sequence generator à la disposition principale	38
Figure III.9 : Ajout de composants à la disposition principale	38
Figure III.10 : Ports de connexion	39
Figure III.11 : Composants de connexion.....	39
Figure III.12 : Composants de connexion	40
Figure III.13 : Visualiser dans la disposition principale	40
Figure III.14 : Paramètres de composant CW laser	41
Figure III.15 : Affichage des paramètres dans la disposition principale	42
Figure III.16 : Unités de paramètres	42
Figure III.17 : Exécution de la simulation.....	43
Figure III.18 : fin de simulation	44
Figure III.19 : résultats de visualizers a) NZR plus du generator b) photodiode PIN.....	45
Figure III.20 : optical spectrum analyzer	46
Figure III.21 : BER analyser.....	47

La liste des Tableaux

Tableau I.1: table de débit de wifi.....	20
---	----

Glossaire

DWDM Dense WDM « multiplexage dense en longueur d'onde »).

EDFA : Erbium Doped Fiber Amplifier

LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

OCDMA : Optical Code Division Multiple Access.

OTDM : Optical Time Division Multiplexing.

PDA :Photo Diode à Avalanche.

RF : Radio fréquence.

Rof : Radio sur fibre.

TDM : Time Division Multiplexing ou Multiplexage Temporel).

TDM: Time Division Multiplexing.

WDM: Wavelength Division Multiplexing, ou multiplexage en longueur d'onde

Introduction générale

Introduction générale

Aujourd'hui, les technologies de l'Internet sont utilisées pour diffuser des programmes de télévision, contrôler des usines, interconnecter des banques, gérer des transmissions militaires, suivre des opérations médicales, ou transporter des conversations téléphoniques. Des services de plus en plus gourmands en bande passante comme le partage des contenus, le service de stockage en ligne, la télé haute définition (TV3D, TvHD), les jeux en ligne, le Peer To Peer, le téléenseignement et la télémédecine viennent s'ajouter à la liste de nos services usuels.

Les télécommunications optiques ont acquis une importance considérable dans les réseaux de communication longues distances. L'un des principaux critères de cette réussite tient à la grande bande passante de la fibre, mais surtout dans les très faibles pertes qu'elle présente. La conception de système de transmission à très grande capacité était désormais possible. Ceci fait de la fibre un élément indispensable des réseaux métropolitains, transnationaux et intercontinentaux.

Une solution prometteuse pour le déploiement des ondes millimétriques entre les multiples points d'accès est offerte par la technologie radio sur fibre (RoF, Radio over Fiber). Cette technologie exploite les avantages de l'optique pour la transmission de signaux radio par le biais d'une liaison optique. Dans une liaison RoF, le signal radio est transposé sur l'amplitude ou la phase d'une porteuse optique par des transducteurs électro-optique (E/O) et ensuite récupéré à l'extrémité de la liaison par des transducteurs optoélectrique (O/E) correspondants. Cette combinaison entre ces deux domaines permet l'extension de la couverture radio et offre des débits de plus en plus élevés par l'association des performances de la fibre optique (faibles pertes, très grande largeur de bande passante et immunité aux interférences électromagnétiques) avec le principal avantage d'un système sans fil qui est la mobilité. Bien qu'un système RoF offre de multiples avantages, des distorsions sur le signal RF transmis sur cette liaison optique peuvent exister et affecter la qualité de la transmission. Ces distorsions sont liées à plusieurs facteurs : le bruit d'intensité relatif et bruit de phase du laser, le bruit de grenaille de la photodiode, le bruit thermique des étages électroniques, la dispersion de la fibre optique, les non-linéarités des différents composants optoélectroniques et le gain négatif de la liaison RoF. Ces facteurs limitant doivent être considérés dans l'étude et l'analyse de la transmission des signaux radio sur des liaisons RoF.

Notre mémoire est divisé en trois chapitres. Dans le premier chapitre, nous allons décrire à fibre optique et Les canaux de transmission le que constitue de L'émetteur, canal et récepteur .Ensuite wifi et su débit . la fin Radio sur fibre.

Le second chapitre, nous ferons tout d'abord une introduction sur la technologie Radio sur Fibre et ses applications, ses avantage ses inconvénient et Les architectures générale de la radio sur fibre.

Le troisième chapitre, à pour objectif de présenter le logiciel de simulation OptiSystem qu'on a utilisé pour les mesures de notre liaison Radio sur Fibre et l'étude détaillée des composants qui nous on permis d'avoir une connaissance sur la transmission du signal dans chaque partie de notre liaison. Cela nous a été d'un grand aide pour connaitre le système en termes de, longueur de la fibre, la puissance émise par le laser et le débit nécessaire pour une telle transmission.

Chapitre 1

Généralités

I.1.1.Systèmes de transmission sur fibre optique

I.1.1.INTRODUCTION

Comparée aux autres supports de transmission existants, la fibre présente une atténuation quasiment constante sur une énorme plage de fréquences (plusieurs milliers de gigahertz) et offre ainsi l'avantage de bandes passantes gigantesques, permettant d'envisager aujourd'hui la transmission de débits numériques très importants (plusieurs téraoctet/seconde) exigés par la multiplication des services et les besoins accrus de transmission d'images . Très vite également, il est apparu que les systèmes optiques permettaient, par rapport aux systèmes sur câble coaxial de capacité équivalente, un gain notable sur la distance entre répéteurs-régénérateurs, qui passait de quelques kilomètres à quelques dizaines de kilomètres. À partir de 1978 furent installés des systèmes travaillant à la longueur d'onde optique de $0,8 \mu\text{m}$, acheminant un débit compris entre 50 et 100 Mbit/s, avec un espacement entre répéteurs de 10 km, c'est-à-dire trois fois plus environ que les systèmes sur câble coaxial de capacité équivalente.

La seconde génération de systèmes de transmission sur fibre optique, apparue dans les années 1980, découle directement de la mise au point de la fibre monomodale et du laser à semi-conducteur à $1,3 \mu\text{m}$, longueur d'onde pour laquelle la dispersion chromatique (c'est-à-dire la distorsion induite sur les signaux par la propagation) est minimale. Des débits supérieurs à 1 Gbit/s, avec un espacement entre répéteurs de plusieurs dizaines de kilomètres, sont alors atteints. Les portées de ces systèmes sont limitées par les pertes de la fibre, 0,5 dB/km dans le meilleur cas, et l'idée apparaît alors de développer des sources émettant à la longueur d'onde de $1,55 \mu\text{m}$ pour laquelle l'atténuation est minimale. Néanmoins, ce gain est détruit par l'effet de la dispersion chromatique, toutes les longueurs d'onde ne se propageant pas à la même vitesse. Cette dispersion chromatique du matériau de la fibre est beaucoup plus forte qu'à $1,3 \mu\text{m}$ et c'est d'elle que provient alors la limitation de la bande passante et donc du débit. Des progrès simultanés tant sur les lasers émettant sur un seul mode que sur le milieu de transmission (fibres à dispersion décalée) apporteront des solutions à ces problèmes et les premiers systèmes travaillant à $1,55 \mu\text{m}$ apparaîtront à la fin des années 1980, avec un débit supérieur à 2 Gbit/s.

Apparus à la fin des années 1980 et devenus très rapidement des produits industriels, les amplificateurs à fibre vont apporter un bouleversement considérable dans le domaine des communications par fibre optique : insérés dans la ligne de transmission, ils permettent de compenser l'atténuation de la fibre et donc d'augmenter la portée des systèmes de transmission, au prix de l'addition de bruit . Utilisés comme préamplificateurs, ils augmentent la sensibilité des récepteurs optiques. Enfin, leur bande passante énorme (30 nm et même bien plus aujourd'hui)

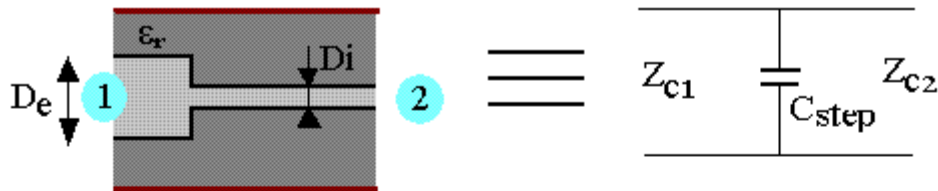
permet d'envisager l'amplification simultanée de plusieurs porteuses optiques juxtaposées dans le spectre, constituant ce que l'on appelle un multiplex. Ainsi naît le concept de multiplexage en longueur d'onde (WDM Wavelength Division Multiplexing) ; chaque fibre transportant un multiplex de N canaux est alors équivalente en capacité à N fibres transportant chacune un canal, et il est aisément concevable que cette approche permet potentiellement d'augmenter la capacité d'un réseau de manière très importante sans modifier son infrastructure physique. Les premiers systèmes utilisant cette technique, avec un débit de 2,5 Gbit/s par canal, ont été installés dès 1995 par tous les grands opérateurs mondiaux dans leurs réseaux de transport pour faire face à la croissance du trafic. Ils ont été suivis rapidement par des systèmes à $N \times 10$ Gbit/s dès le début des années 2000 et, dix ans plus tard, des équipements offrant un débit de 40 Gbit/s par canal étaient commercialement disponibles. Autour de 2005 apparaît une nouvelle génération de systèmes, toujours basés sur le multiplexage en longueur d'onde, mais dans lesquels les techniques de compensation électronique permettent de surmonter des obstacles à la montée en débit. Le débit de 100 Gbit/s est d'ores et déjà disponible.[1]

I.1.2.Les canaux de transmission :

Dans le domaine de la transmission du signal, le problème qui se pose est celui de définir le type de support de ce signal devant relier l'émetteur au récepteur sans déformer le signal véhiculé et sans atténuer. Ces supports de transmission du signal sont appelés canaux de transmission, il existe trois types de canaux à savoir:

- Les lignes de transmission
- Les guides d'onde
- Les filtres optiques

I.1.2.1.Cas des lignes de transmission :



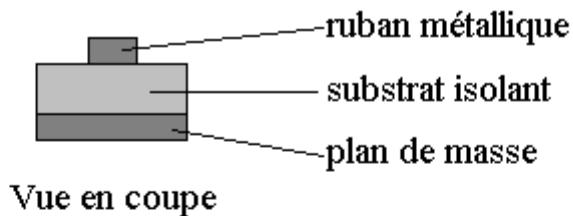
Z_{c1} : impédance caractéristique ①
 Z_{c2} : impédance ②

$$f_{\text{coupure}} = \frac{2C}{\pi(D_{\text{int}} + D_{\text{ext}})\sqrt{\epsilon_r}}$$

C : vitesse de la lumière
 ϵ_r : Constante diélectrique relative du diélectrique

Autres types de ligne

-Ligne microscopique



-Ligne coplanaire

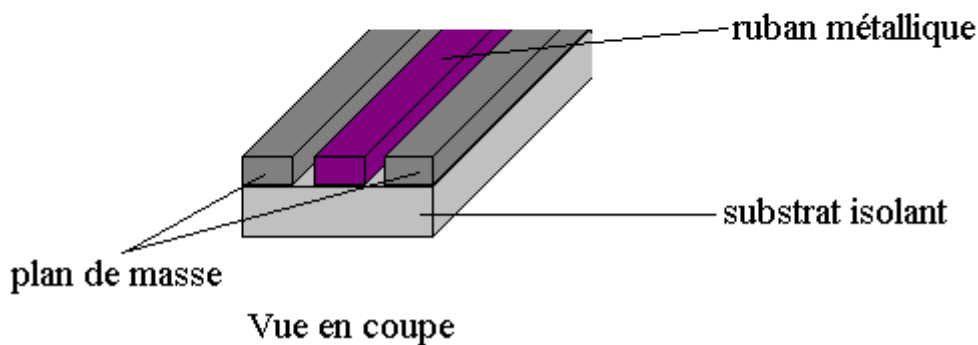


Figure I.1 : ligne de Transfer

I.1.2.1.1. Guide d'onde :

Trois éléments interviennent dans la propagation des ondes électromagnétiques guidées, il s'agit du champ électrique E , du champ magnétique H , de la direction de propagation. Ces 3 composantes constituent un repère orthogonal.

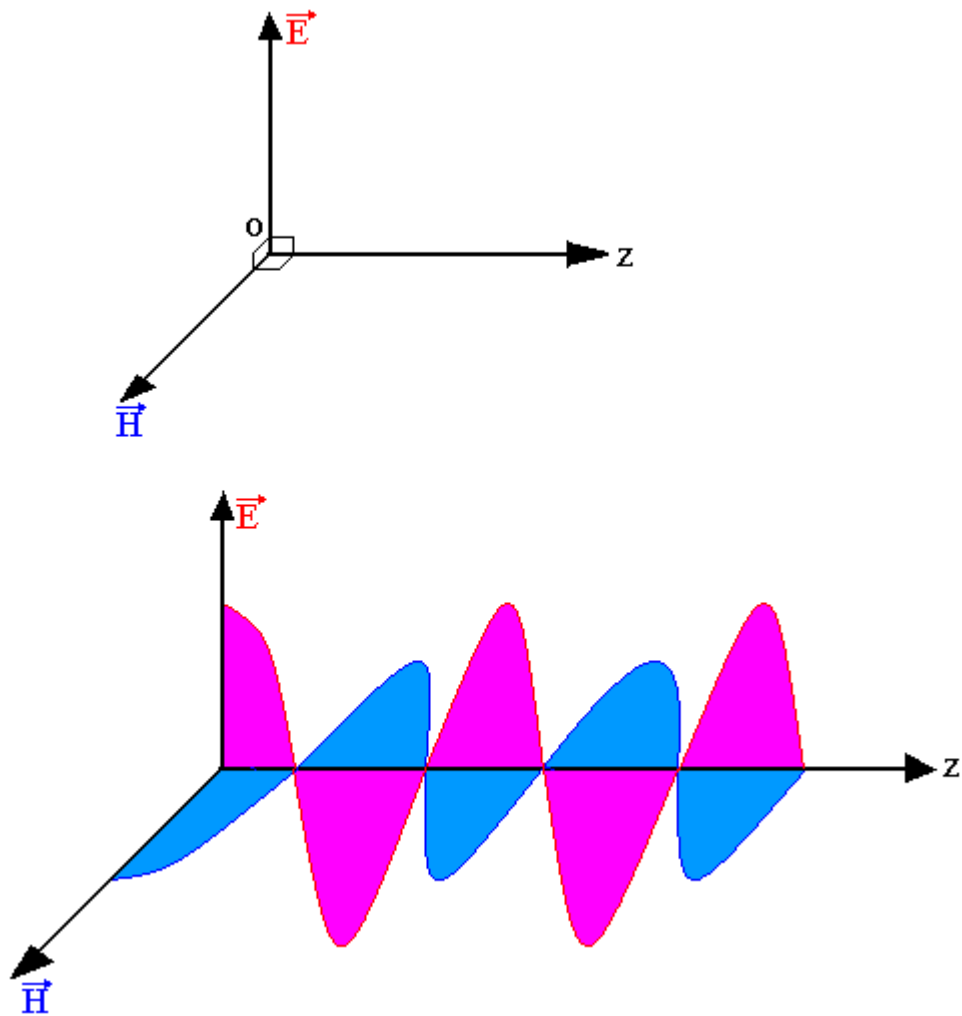


Figure I.2 : guide d'onde

La propagation des ondes électromagnétiques dans le vide se caractérise par les modes, ainsi on distingue trois types de mode de propagation à savoir:

- Le mode TEM appelé mode transverse électrique et magnétique.
- Le mode TE appelé mode transverse électrique.
- Le mode TM appelé mode transverse magnétique.

I.1.3.Fibre optique

On rappelle que la lumière est une onde de champ électromagnétique de longueur d'onde voisine de 1mm. Au-dessus de cette longueur d'onde on se situe dans l'infrarouge et au-dessous dans l'ultra violet. On distingue aussi l'indice de réfraction n d'un milieu d'ou on tire la vitesse de phase. $V=C/n$

c :vitesse de la lumière

n : indice du milieu

$n=1$ cas de l'air

I.1.3.1.Principe théorique

A l'interface des deux milieux l'indice de réfraction n_1 et n_2 un rayon incident se partage en deux rayons donc un réfléchi et l'autre transmis.

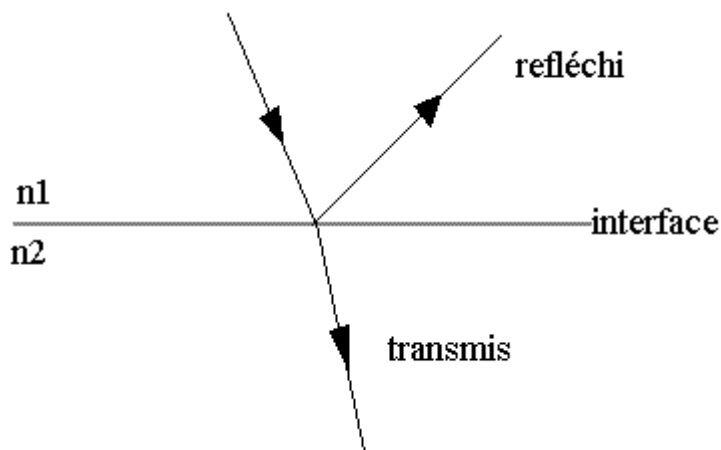


Figure I.3 : réfraction et transmis de rayon

Si $n_1 > n_2$ il existe un angle d'incidence au-dessus duquel il y'a plus de transmission, cet angle s'appelle angle de Brewster. La fibre optique est un guide d'onde lumineux ayant des caractéristiques suivantes.

I.1.3.2.Paramètres caractéristiques des fibres optiques

L'atténuation de la puissance d'un rayon le long de la fibre optique se définit par:

$$\alpha_{\text{dB/m}} = 10 \log \left[\frac{P_{\text{émise}}}{P_{\text{reçue}}} \right]_{\text{dB/m}} \quad P : \text{puissance}$$

Exemple: Une atténuation de 0,1dB/Km correspond à une perte de 2,3% par Km et l'atténuation 0,2dB/Km correspond à 4,7% par Km. Cette atténuation a pour origine principale:

- L'absorption de la lumière par des défauts, des impuretés ou des ondes:

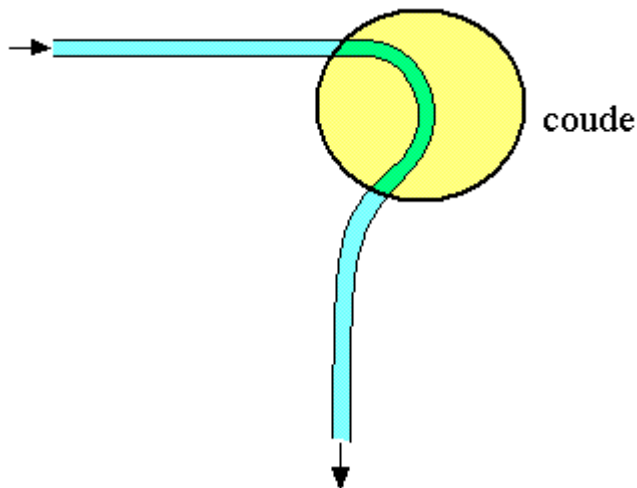


Figure . I.4 : L'absorption de la lumière

- La dispersion module dû aux différences de trajet entre les rayons (se traduisant par un élargissement progressif le long de la fibre), d'une impulsion de Dirac injectée à l'entrée:

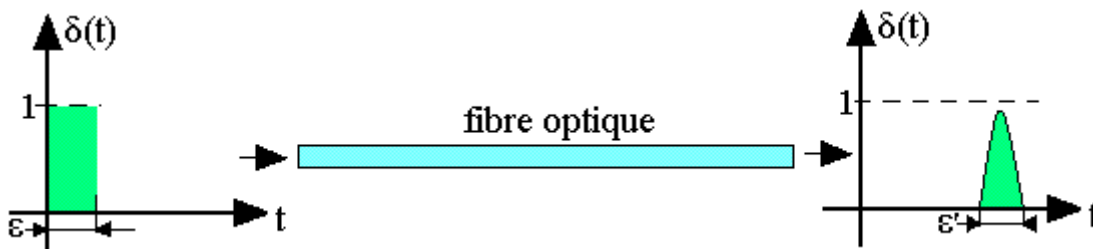


Figure I.5 :modulation de fibre optique

- La dispersion chromatique d'au fait que l'indice varie avec la fréquence
- La diffusion de la lumière dans le diélectrique constituant la fibre.

I.1.3.3.Ouverture numérique (ON)

L'ouverture numérique ON définit l'angle sur lequel la lumière peut pénétrer dans la fibre. Plus ON est grande plus il est facile d'injecter la lumière dans la fibre, cette ouverture définit par la relation $ON = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$

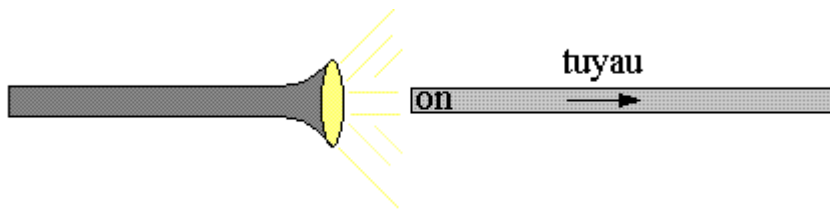


Figure I.6 : passe d'un rayon donne tuyau

I.1.3.4. Différents types de fibre :

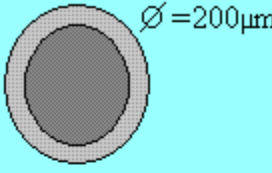
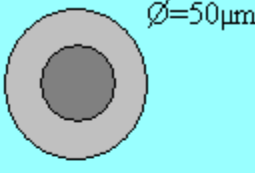
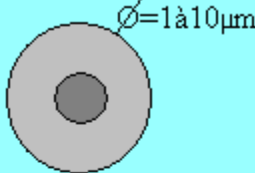
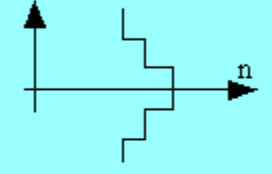
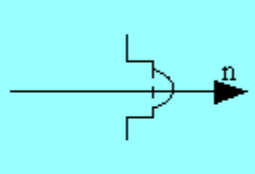
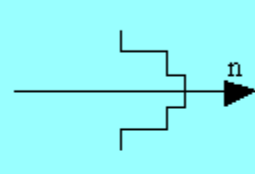
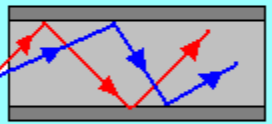
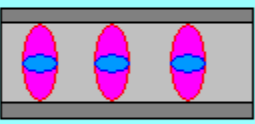

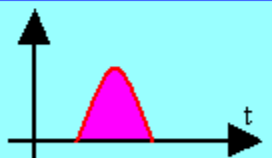
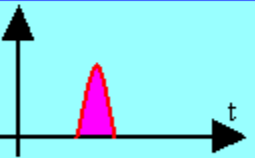
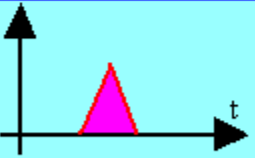
Dénomination	Multimodes à saut d'indice	Multimodes à gradient d'indice	Monomodes
En coupe	 $\varnothing = 200\mu\text{m}$	 $\varnothing = 50\mu\text{m}$	 $\varnothing = 1\text{ à }10\mu\text{m}$
Profil d'indice			
Trajet des rayons			
Réponse à un DIRAC			
Bande passante pour 1Km	5 à 100 MHz	300 à 10^3 MHz	100 GHz

Figure I.7 : type de fibre optique

Le principe de guidage de la lumière par un diélectrique était connu depuis très longtemps (cas des fontaines lumineuses), mais il a fallu attendre 1972 pour voir apparaître la première fibre optique industrielle fabriquée par CORNING GLASS ayant une atténuation raisonnable de 20dB/Km. Deux critères permettent de classer une fibre optique:

- Le nombre de mode m qu'elle propage
- le matériau de construction

I.1.4. Classification le nombre de mode

On distingue les fibres monomodes ($m=1$) et celle multi modes, parmi ces dernières on fait en outre la distinction entre des fibres à saut d'indice des ceux à gradient d'indice. On constate que leur bande passante est très différente.

Pour une fibre optique à saut d'indice, la bande passante se calcule par la formule $BP = (0,88n_1C)/ON^2$

I.1.4.1. Classification le matériau constituant la fibre optique

I.1.4.1.1. Fibre en verre

Les fibres optiques cylindriques sont réalisées au silice (SiO_4) dopée ou non, elles ont pour propriété une faible atténuation c'est-à-dire une atténuation inférieure à 1dB/Km, donc elles permettent des liaisons à grande distance (par comparaison un câble électrique a une atténuation typique de 100dB/Km à la fréquence 1GHz et une ON de l'ordre de 0,1 à 0,4). Malheureusement elles sont assez chères et fragiles. Comme pour tout guide d'onde il existe un rayon de courbure minimal à ne pas dépasser pour éviter la détérioration du câble d'où l'absence de propagation, ce rayon de courbure est de l'ordre de quelque centimètre.

En microélectronique il est possible d'intégrer dans un substrat de verre des micros canaux dopés capables de guider le flux lumineux. Cette technologie de pointe est nécessaire et réservée à des liaisons ultracourtes.

I.1.4.1.2. Fibre en plastique

Ces fibres cylindriques sont réalisées en plastique (exemple du PMMA) elles ont pour propriété d'avoir une forte atténuation généralement très supérieure à 1dB/Km, c'est pour cela qu'elles sont réservées à des liaisons à courte distance de plus elles ont un ON de l'ordre de 0,5, elles sont onéreuses.

I.1.5. Connexion des fibres optiques

Le principe d'une connexion de fibre optique est de faire coïncider les axes optiques, elle est plus difficile à réaliser en monomode qu'en multi mode. Tout défaut d'alignement se traduit par une atténuation et une réflexion, en règle générale l'atténuation engendrée localement par une connexion est de l'ordre de 0,1dB. La puissance réfléchiée par une mauvaise connexion par exemple interruption du faisceau lumineux par un espace d'un milieu différent est donnée par le coefficient de réflexion.

$$R = \left(\frac{n_1 - n_{\text{milieu}}}{n_2 - n_{\text{milieu}}} \right)^2$$

Si ce milieu est l'air $n=1$.

Elle se manifeste par un écho de l'onde lumineuse qui se propage en sens inverse de l'onde émise à l'entrée de la fibre. On utilise cette propriété pour détecter les défauts sur les fibres optiques enterrées, cette technique s'appelle l'échomètre. Des appareils plus perfectionnés permettent de déterminer la nature du défaut (exemple le réflectomètre optique OTDR).

Il existe deux types de connexion:

- Les plissures fixes (collage, soudure, blocages mécaniques) réalisées au chantier avec outillage spécial.
- Le connecteur démontable qui s'inspire en miniaturisant de la technologie des connecteurs en micro-onde (nombreux connecteurs plus ou moins centralisés tels que ST; SMA; FC; DIN/IEC; VFO etc.

I.1.6. Transmission d'information sur fibre optique

Les fibres optiques sont de plus en plus utilisées pour la transmission de l'information à longue distance, car leurs pertes sont faibles et leur bande passante élevée, de plus elles sont insensibles aux parasites électromagnétiques.

On utilise principalement la transmission en bande de base (bien qu'en fait il s'agisse d'une modulation d'amplitude de la puissance de la porteuse optique).

Elles sont plus économiques que les câbles, leur bande passante élevée permet d'augmenter le nombre de canaux multiplexé sur une seule fibre et de diminuer les équipements de transmission nécessaires. Leur poids est plus faible. Par comparaison on sait atteindre 300Gbits/s sur les fibres contre 0,2Gbits/s sur un câble coaxial.

Les longueurs d'onde les plus utilisées en pratique sont: 810nm; 1300nm; 1550nm.[2]

I.2. Radio sur fibre

Les divers services tels que les visualisations, les partages des fichiers multimédia exigent des besoins importants en débit. La bande de fréquence aux alentours de 60 GHz est une solution intéressante pour répondre à ces besoins. En effet, elle dispose d'une bande de fréquence assez large (9 GHz) permettant d'obtenir des débits pouvant aller jusqu'à 6 Gbits/s. Un tel débit est appréciable pour effectuer des liaisons sans fils courte portée (1 à 10 m typiquement) qui peuvent remplacer des solutions filaires telles que le HDMI (High Definition Multimedia Interface). Afin d'augmenter la portée et la zone de couverture d'une telle application, une solution qui semble être très prometteuse est la Radio sur Fibre [3], [4]. En effet, un réseau de fibre optique est déployé entre différentes pièces ou bâtiments pour transporter le signal radio (Figure 1.8). Ceci nécessite l'utilisation des transducteurs pour transformer les ondes radios en ondes optiques. Aux deux extrémités de chaque liaison optique, il y a donc deux têtes hyperfréquences 60 GHz.

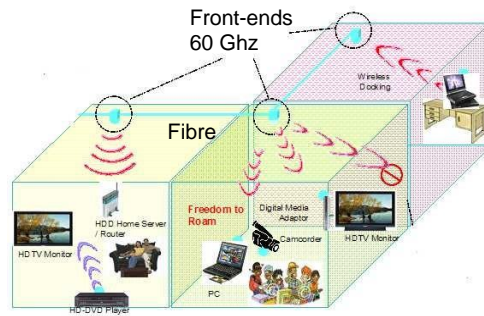


Figure 1.8 :Principe de la Radio sur fibre (RoF)

Les spécifications aux niveaux de ces deux front-ends radio doivent tenir compte des différentes contraintes liées à cet interfaçage Radio-Fibre. La Figure 1.9 montre l'architecture hétérodyne adaptée pour ce genre de système.

L'émetteur, le récepteur comportent un oscillateur local, un LNA, un PA, un multiplicateur de fréquence, un mélangeur et une antenne pour émettre ou recevoir les ondes hyperfréquences. Un switch peut être inséré dans la chaîne pour n'utiliser qu'une seule antenne (partagée entre l'émetteur et le récepteur) mais ceci risque d'apporter des pertes supplémentaires (environ 5dB). De plus, le coût des switches dans la bande millimétrique reste encore relativement élevé.

Sur une intégration utilisant une approche hybride, des puces MMIC sont disponibles sur le marché pour la plupart de ces composants. Pour réduire les interconnexions, des MMIC multifonctions intégrant les composants élémentaires (LNA, PA, Mixer, multiplicateur) sont même proposées par certains fondeurs [5]. Cependant, les performances de ces puces sont souvent limitées car elles sont étroitement liées aux avancées faites dans les différentes technologies utilisées (AsGa, CMOS...). Par conséquent, l'antenne est devenue donc un élément clé pour compenser les limitations imposées par les autres composants. En effet, selon les types d'applications visés, les paramètres comme le gain, l'angle d'ouverture servent de degré de liberté pour satisfaire les exigences en termes de rapport Signal-Bruit, de couverture radio par exemple [6].

Cet article montre un exemple d'antenne utilisée pour une liaison point à point dans un contexte WLAN très haut débit. Les spécifications au niveau du gain et de l'ouverture -3dB sont respectivement 7 dBi et 70°. La fréquence centrale est de 60 GHz et la bande passante est de 9 GHz.

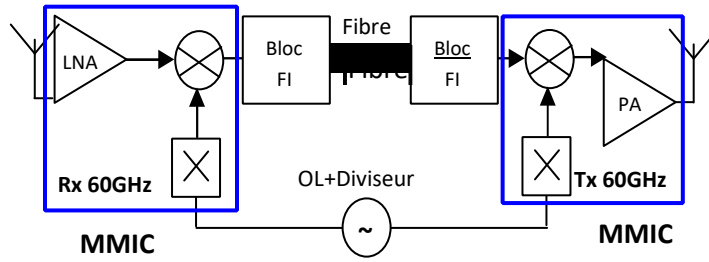


Figure I.9 :architecture tx/rx

I.2.1. Topologie et technologie d'intégration

D'après les spécifications données ci-dessus, l'antenne cornet semble être une bonne candidate car elle dispose d'un gain pouvant aller facilement au-delà des 10 dBi. Cependant, la technologie volumique (métal) souvent utilisée pour sa réalisation va à l'encontre des objectifs bas coûts, peu encombrant adaptés à des applications grand public. Pour contourner ces inconvénients, la technologie mousse devient très attractive. La mousse est légère, présente une permittivité voisine de celle de l'air et une tangente de perte égale à 10^{-3} à 60 GHz.

La mise en œuvre de l'antenne consiste à Figure I.10-a usiner la mousse avec une bonne précision afin de donner la forme du cornet. Ensuite, on enduit une peinture métallique sur une grande partie, formant ainsi les murs électriques. On peut distinguer sur la Figure I.10-b, l'antenne cornet avec son accès en guide normalisé WR15 ($3.8 \times 1.9 \text{ mm}^2$) et son ouverture. Une bonne qualité de peinture est essentielle pour garantir une bonne adaptation en entrée et éviter les rayonnements parasites pouvant dégrader le gain réalisé.

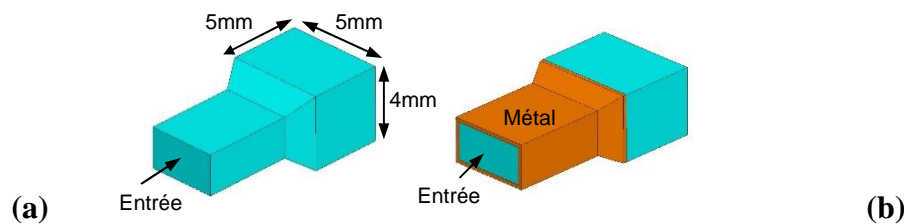


Figure I.10 Usinage de l'antenne dans la mousse (a). Revêtement métallique de la mousse (b)

I.2.2. Performances électriques

La modélisation électromagnétique de l'antenne a été effectuée sur le logiciel HFSS. La Figure 1.10-a montre que l'adaptation en entrée est meilleure que -20 dB sur toute la bande passante utile (57.5-65.5 GHz). Les diagrammes à 60 GHz dans les deux plans (plan E, plan H) sont présentés sur la Figure 3-b et montre que le gain maximum obtenu est de 9 dBi avec une ouverture -3dB égale à 70° . Les pertes estimées dans la mousse et les plaques métalliques sont d'environ 1dB.

Concernant la technique de mesure, l'antenne est insérée dans un guide normalisé WR15 (Figure 1.10-a). Une calibration TRL est effectuée ensuite pour enlever toute contribution du guide sur l'adaptation et les pertes métalliques.

La mesure en réflexion de l'antenne est présentée à la Figure 1.10-b : l'adaptation est meilleure que -18dB sur toute la bande. Les mesures du gain, des diagrammes et de couplage viennent d'être programmées. Elles seront montrées dans la version finale.

I.2.3. Intégration de l'antenne dans le système RoF

Comme la procédure de mesure détaillée ci-dessus le montre, un guide rectangulaire doit être inséré dans le module pour faire la connexion entre l'antenne et les restes des circuits Radio. Ceci nécessite donc une réalisation d'une transition (guide-planaire) pour passer du PCB vers le guide. A ce sujet, différentes techniques performantes existent dans la littérature .[7][8]

Finalement, on peut imaginer le module complet mis dans un boîtier muni des accès pour l'antenne et la connexion optique .

I.2.4. Avantages et limites de la technologie ROF

I.2.4.1. Les avantages de ROF

technologie RoF présente les avantages suivants :

Faible atténuation : La distribution des signaux radiofréquence sous forme électrique, en espace libre ou par le biais de lignes de transport est coûteuse et peut être fortement limitée en termes de portée. En effet, les pertes de propagation en espace libre sont d'autant plus importantes que la fréquence de la porteuse radio est élevée (les pertes sont inversement proportionnelles à la longueur d'onde). Dans les lignes de transmission, l'impédance augmente avec la fréquence impliquant des pertes d'autant plus importantes que la fréquence est élevée. Par conséquent, la distribution des signaux radio à haute fréquence sous forme électrique sur des longues distances nécessite des équipements de régénération coûteux. Une solution à ce problème consiste à distribuer optiquement les signaux en bande de base ou à des fréquences intermédiaires (FI) du CS vers la BS. Au niveau de la station de base, les signaux sont convertis à une fréquence haute (RF) avant d'être amplifiés puis rayonnés. Ainsi, des oscillateurs locaux de hautes performances seraient requis pour la mise en œuvre de la conversion de fréquence au niveau de chaque station de base. Toutefois, étant donné que la fibre optique offre une très faible perte, la technologie RoF peut être utilisée pour obtenir à la fois une distribution de signaux sur de longues distances. Large bande passante : Les fibres optiques offrent énormément de bande passante.[9]

I.2.4.2. Limitations des systèmes RoF

En dépit des nombreux avantages que présentent les systèmes RoF, ceux-ci font face à certaines limitations. Ces limitations sont liées à la nature analogique du signal micro-onde transmis par la liaison

RoF. Ainsi, le rapport signal sur bruit (SNR, Signal to Noise Ratio) peut être limité entraînant une dynamique de la liaison plus faible. Ceci peut être relié :

- au bruit additif de la liaison RoF qui affecte le SNR pour de faibles puissances d'entrée RF du système RoF, c'est principalement le bruit d'intensité relatif du laser qui a le plus d'impact sur la qualité de transmission. Le bruit de grenaille de la photodiode peut également être dominant sous certaines conditions de polarisation et certains niveaux de puissances optiques émises.

- à la non-linéarité due aux différents composants de la liaison RoF pour les fortes

Puissances d'entrée RF, notamment, la non-linéarité provenant du transducteur E/O. Ces non-linéarités provoquent des distorsions du signal transmis et limitent ainsi la dynamique de la liaison.

- à l'impact de la dispersion chromatique de la fibre optique qui représente un coefficient de distorsion limitant le produit distance-bande passante qui varie avec la fréquence de modulation du signal RF et la longueur de la fibre. Il s'ajoute à ceci la dispersion modale dans les systèmes RoF basés sur des fibres optiques multimodes (MMF, Multi-Mode Fiber).

I.2.5. Les applications principales de la radio sur fibre

Les applications principales de la radio sur fibre sont :

- Communication intra satellite
- Réseaux cellulaires
- Réseaux locaux sans fil
- Communication routière

I.2.6. Les moyens pour transmettre le signal

Il existe deux moyens pour transmettre le signal radio sur la fibre optique.

I.2.6.1. Techniques numériques

Si on transporte les données il s'agit alors d'un réseau optique ; il faut sur chaque antenne un box WiFi. Et on réalise un échantillonnage

I.2.6.2. Techniques analogiques

on transporte des signaux « basses fréquences, et on transporte des signaux RF « l'antenne » aura le simple rôle d'amplification

I.4-Radio Fréquence

Le terme radio-fréquence (souvent abrégé en RF) désigne une fréquence d'onde électromagnétique située entre 3 kHz et 300 GHz (entre 3×10^3 et 3×10^{11} Hz), ce qui inclut les fréquences utilisées par différents moyens de radiocommunication, notamment la téléphonie mobile, le Wi-Fi ou la radiodiffusion, ainsi que des signaux destinés à d'autres usages comme les radars ou les fours à micro-ondes. Les ondes utilisant de telles fréquences sont les ondes radio. L'électronique dédiée au traitement des signaux RF constitue un domaine bien particulier de l'électrotechnique qui couvre à la fois l'émission et la réception de

ces signaux par des antennes et leur traitement analogique et/ou numérique mais aussi la conception physique des circuits, une particularité des ondes RF Le contenu est disponible sous licence CC BY-SA 3.0 sauf mention contraire. Étant en effet de se propager à la fois dans les milieux conducteurs (câbles, composants, etc.) mais aussi dans l'espace environnant.[10]

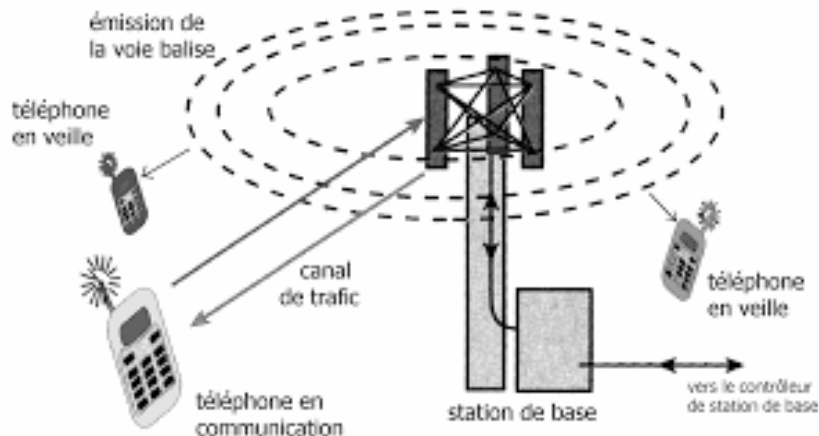


Figure I.11 : system d'un radio fréquence

I.4.1. Communication sans fil

La plupart des technologies sans-fil fonctionnent avec la transmission et la modulation de fréquence, les données numériques étant converties en signaux radio. Deux principaux spectres de fréquences peuvent être utilisés sans autorisation spéciale ni frais de licence : 2,4 GHz et 5 GHz.

Les fréquences 2,4 et 5 GHz sont utilisées par tous les standards de LAN sans-fil, comme le 802.11x, le DECT ou encore le Bluetooth, qui utilisent tous la fréquence 2,4 GHz. Si de nombreux services utilisent ces deux fréquences, les services GSM de téléphonie mobile utilisent des fréquences 900 à 1 800 MHz et le système UMTS, de 1 900 à 2 170 MHz. Les mêmes règles de physique s'appliquent à toutes les transmissions radio[11]

I.4.2. Chaîne de transmission

La chaîne de transmission de l'information, dans sa structure fonctionnelle la plus simple, La communication correspond à l'échange d'information (sous forme de signal) entre un émetteur et un récepteur à l'aide d'un canal de transmission

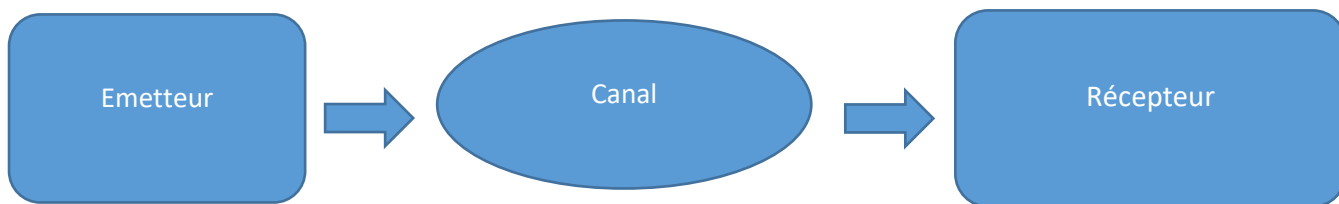


Figure I.12: chaine de transmission

I.4.2.1. L'émetteur

Un émetteur radio est un appareil électronique destiné à émettre certaines ondes radioélectriques modulées, permettant ainsi de transmettre des données. Une onde est la propagation d'une perturbation produisant sur son passage ne variation réversible de propriétés physiques locales. Elle transporte de...) radioélectriques modulées, permettant ainsi de transmettre des données (Dans les technologies de l'information (TI), une donnée est une description élémentaire, souvent codée, d'une chose, d'une transaction d'affaire, d'un événement, etc.) (Sons, images ou autres) par les airs à des récepteurs radio.

L'utilisation d'un émetteur radio est soumise à une réglementation stricte : il est interdit de se servir d'un émetteur sans une autorisation ou une licence. L'obtention de cette autorisation, délivrée à titre personnelle, est soumise à la connaissance des règlements en vigueur, d'éventuelles capacités techniques, plus bien souvent de l'acquiescement d'une taxe annuelle.

Les ondes radioélectriques sont divisées en bandes de fréquences. Chaque bande est attribuée par les autorités compétentes pour une utilisation spécifique :

- La radiodiffusion, AM, FM.
- La télévision ;
- Les bandes radioamateur ;
- La transmission radio professionnelle (civile et militaire) ;
- La téléphonie (La téléphonie est un système de télécommunication qui a pour but la transmission de son et en particulier la transmission de la parole.) mobile ;
- Les radars et systèmes de détections.[12]

I.4.2.2. Le canal

Le canal de transmission est le support physique qui transporte les signaux de données de l'émetteur vers le récepteur. A ce titre, c'est de sa nature et de son modèle que dépendent la plupart des mécanismes mis en place pour la transmission des données. Dans les réseaux sans fil, le canal de transmission, est modélisé sur base de son comportement vis-à-vis des signaux qui y parcourent.

Les utilisateurs se partagent le canal en fréquence, Cette technique est l'une des plus anciennes : elle est utilisée depuis environ un siècle. 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. Chaque utilisateur à qui le système a alloué un canal de fréquence peut émettre en continu, mais seulement dans le canal de fréquence qui lui est attribué. A la réception, un filtre passe-bande sélectif est utilisé pour démoduler le signal correspondant à un unique utilisateur tout en évitant les interférences avec les signaux présents dans d'autres domaines fréquentiels

I.4.4.3.Le récepteur

Les techniques de réception des ondes radio permettent de restituer les informations analogiques ou numériques portées par une onde radio : divers schémas de récepteurs, de filtrage, de démodulation sont utilisés, en fonction des applications et des fréquences. Elles ont été l'objet de spectaculaires évolutions depuis l'apparition des circuits intégrés (synthétiseurs, processeurs).

I.4.4.3.1.Caractéristiques principales d'un récepteur

Les caractéristiques principales sont :

- Sensibilité
- Dynamique
- Stabilité
- Bruit de phase
- Réglage d'accord
- Réponses parasites
- Distorsion du signal démodulé
- Protection sur la voie utile
- Autres spécifications

I.4.4.3.2. Organes principaux d'un récepteur

Les organes principaux sont :

- Filtre d'antenne ou « présélecteur »
- Amplificateur d'entrée
- Mélangeur
- Oscillateur local
- Synthétiseur
- Démodulateur
- Amplificateur intermédiaire

I.5. WIFI

Est un ensemble de Exemple d'application du Wi-Fi : impression sans fil. Protocoles de communication sans fil régis par les normes du groupe IEEE 802.11 (ISO/CEI 8802-11). Un réseau Wi-Fi permet de relier par ondes radio plusieurs appareils informatiques (ordinateur, routeur, smartphone, modem Internet, etc.) au sein d'un réseau informatique afin de permettre la transmission de données entre eux. Apparues pour la première fois en 1997, les normes IEEE 802.11 (ISO/CEI 8802-11), qui sont utilisées internationalement, décrivent les caractéristique 'un réseau local sans fil (WLAN). La marque déposée « Wi-Fi » correspond initialement au nom donné à la certification délivrée par la Wi-Fi Alliance (« Wireless Ethernet Compatibility Alliance », WECA), organisme ayant pour mission de spécifier l'interopérabilité entre les matériels conformes à la norme 802.11 et de vendre le label « Wi-Fi » aux matériels répondant à ses spécifications. Pour des raisons de facilité d'usage (et de marketing) le nom de la norme se confond aujourd'hui avec le nom de la certification (c'est le cas en France, en Espagne, au Canada, en Suisse, en Tunisie...). Ainsi, un réseau Wi-Fi est en réalité un réseau répondant à une des normes IEEE 802.11. Dans d'autres pays

(Allemagne et États-Unis par exemple) de tels réseaux sont aussi nommés par le terme générique WLAN : Wireless LAN (réseau local sans fil). Grâce aux normes Wi-Fi, il est possible de créer des réseaux locaux sans fil à haut débit. En pratique, le Wi-Fi permet de relier des ordinateurs portables, des machines de bureau, des assistants personnels (PDA), des objets communicants ou même des périphériques à une liaison haut débit : de 11 Mbit/s théoriques ou 6 Mbit/s réels en 802.11b, à 54 Mbit/s théoriques ou environ 25 Mbit/s réels en 802.11a ou 802.11g, 600 Mbit/s théoriques pour le 802.11n et 1,3 Gbit/s théoriques pour le 802.11ac normalisé depuis décembre 2013. La portée peut atteindre plusieurs dizaines de mètres en intérieur (généralement entre une vingtaine et une cinquantaine de mètres) s'il n'y a aucun obstacle gênant (mur en béton par exemple) entre l'émetteur et l'utilisateur. Ainsi, des fournisseurs d'accès à Internet peuvent établir un réseau Wi-Fi connecté à Internet dans une zone à forte concentration d'utilisateurs (gare, aéroport, hôtel, train, etc.). Ces zones ou points d'accès sont appelés bornes ou points d'accès Wi-Fi ou « hot spots ». [13]

I.5.1. Portées et débits

Les normes 802.11a, 802.11b et 802.11g, appelées «normes physiques» correspondent à des révisions du standard 802.11 et proposent des modes de fonctionnement, permettant d'obtenir différents débits en fonction de la portée.[14]

Standard	Bande de fréquence	Débit	Portée
a (802.11a)	5 GHz	54 Mbit/s	10 m
B (802.11b)	2.4 GHz	11 Mbit/s	140 m
G (802.11g)	2.4 GHz	54 Mbit/s	140 m
N (802.11n)	2.4 GHz / 5 GHz	450 Mbit/s	250 m

Tableau I.1: table de débit de wifi

Chapitre 2

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous donnons la définition de la technique radio sur fibre, puis nous présentons les domaines d'applications et les architectures radio sur fibre ...et etc.

II.2. Princesps de technologie ROF :

Pour étendre la couverture géographique des signaux radio fréquences et afin de répondre à l'augmentation en permanence de la demande de fort débit et de bande passante élevée, la solution proposée a été de réaliser des systèmes hybrides combinant les technologies de fibres optiques et radio communément "système Radio sur Fibre" (RoF)[15], par définition la RoF est consacrée à la transmission optique de signaux analogiques micro-ondes. Par conséquent, la liaison RoF exploite l'efficacité des fibres optiques pour la distribution des signaux radio vers plusieurs points d'accès sans fil qui offrent l'avantage de la mobilité. En effet, au lieu de distribuer des signaux numériques tels que l'Ethernet (IEEE 802.11ad) ou HDMI (WirelessHD) pour communiquer entre chaque point d'accès, ce qui nécessite des processus de traitement du signal tel que des conversions de signaux analogique/numérique et numérique/analogique, les systèmes RoF distribuent les signaux radio dans leur format analogique initial. Les signaux radio sont transposés sur une porteuse optique par modulation de l'intensité ou phase de la lumière d'une source laser sans changer le format de modulation. Ceci est possible par l'utilisation de fibres optiques en silice qui offrent une large bande passante et une faible atténuation. La figure II.1) représente le cas le plus simple d'une liaison RoF où deux cellules radio sont placées à chaque extrémité d'une fibre optique nécessitant l'existence d'un transducteur E/O à l'émission qui transpose le signal radio en optique et un transducteur O/E à la réception qui transpose le signal optique en signal radio. Les composants utilisés pour ces transpositions sont, respectivement, un laser ou modulateur et un photodétecteur



Figure II.1 : Schéma synoptique d'une liaison RoF.

II.3. Les avantages de fibre optique

La technique radio sur fibre présente les avantages suivants :

- *Large bande passante* : Il existe trois fenêtres de transmission qui offrent peu d'atténuation, 850 nm, 1310 nm et 1550 nm. Pour une fibre optique monomode, la largeur de bande combinée de ces trois fenêtres excède 50 THz. Actuellement, les systèmes commerciaux (WDM et DWDM) utilisent seulement une très petite partie de cette capacité, environ 1.6 THz.

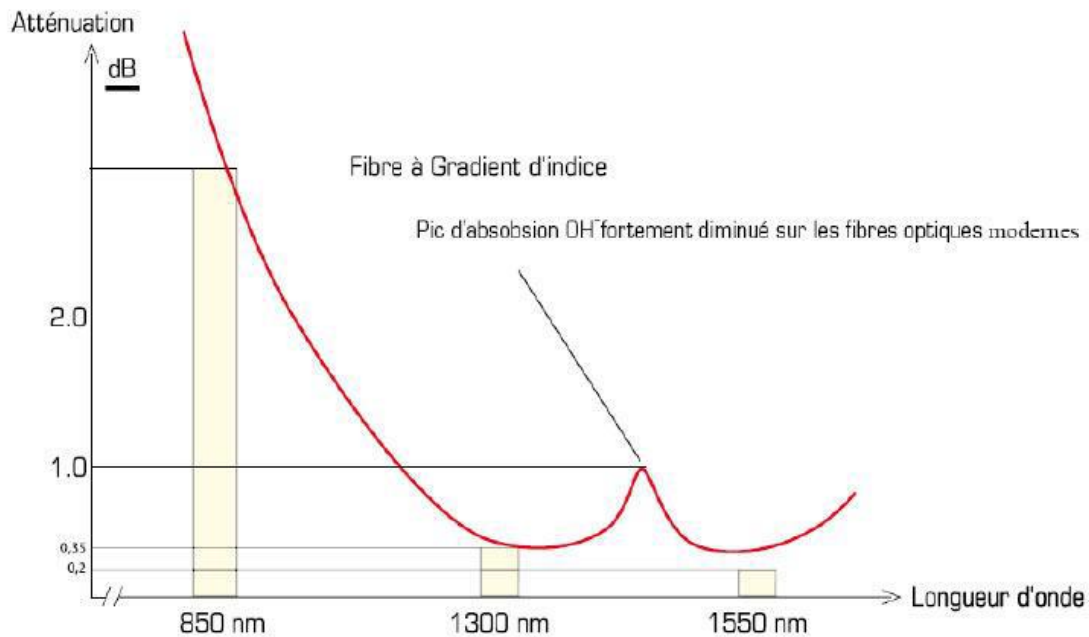


Figure II.2 : Affaiblissement de la fibre multimode gradient d'indice en fonction de la longueur d'ondes

- *Faible atténuation* : La transmission des signaux RF en espace libre ou par câbles est coûteuse et compte tenu des pertes peut limiter la portée du système. La technique radio sur fibre peut être une solution à ce problème pour transporter des signaux radio à haute fréquence sur des longues distances.
- *Coût* : à l'heure actuelle le coût d'installation d'un réseau particulier est plus cher en cuivre qu'en fibre optique. Le cuivre deviendra de plus en plus rare alors qu'il y a une immense réserve de silice. De plus les modes de fabrications ont évolués ; il restera le coût d'infrastructure.
- *Réduction de la consommation d'énergie* :
 - *Simplification des BS* : Une BS peut juste comprendre un laser et un photodétecteur pour la conversion O/E et E/O, un amplificateur, un filtre RF et une antenne.
 - *Faible PIRE (Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente)* : Pour l'application intérieure, un avantage du système radio sur fibre est de réduire la taille des cellules. En

conséquence, la puissance d'émission de l'antenne peut être plus faible si on augmente le nombre de cellules.

- Immunité aux interférences des signaux RF : ceci est un autre avantage du système RoF car les signaux sont transmis sous forme lumineuse immune aux impulsions CEM..
- Pérennité d'installation : les dispositifs complexes et coûteux pour un système RoF sont centralisés au niveau du SC. Ceci permet de centraliser des fonctions complexes et de simplifier les BS. Par conséquent, Les coûts d'installation et d'entretien du système peuvent être réduits, car les composants du SC sont partagés par plusieurs BS.
- Un système « hybride » : Le système RoF peut aussi être partagé entre plusieurs opérateurs (connexion dans la SC) pour distribuer des multiservices en louant l'accès à la couverture.

II.4.Limitation des systèmes RoF

Etant donné que le système RoF utilise une modulation analogique, il est fondamentalement considéré comme un système de transmission analogique. Par conséquent, les imperfections du système telles que le bruit et les distorsions dues à des non-linéarités propres à la transmission analogique doivent être considérées pour le système RoF. Ces handicaps ont tendance à limiter le facteur de bruit (NF) et la marge dynamique (DR) des liens RoF. La marge dynamique (DR) est un paramètre très important pour les systèmes de communication mobile (cellulaire) tels que le GSM, car il permet de caractériser en même temps le bruit et l'intermodulation du système. Ainsi, la puissance RF reçue par un terminal mobile qui est proche de la BS peut être beaucoup plus élevée que la puissance RF reçue par un utilisateur mobile qui est à plusieurs kilomètres du BS. Les sources de bruit considérées dans les liens optiques en mode analogique sont le bruit relatif d'intensité (RIN) du laser, le bruit de grenaille de la photodiode, le bruit thermique de l'amplificateur et la dispersion de la fibre. La dispersion chromatique limite la longueur des liens à base de fibre monomode (SMF), tandis que pour une fibre Multi mode (MMF), la principale limitation est due à la dispersion multi-mode.[16]

II.5.Les applications principales de la radio sur fibre

Voici les principaux domaines d'application de la technique radio sur fibre :

- Communication intra satellite : Dans ce cas, des liens optiques d'inférieurs à 1 km sont utilisés, en particulier, pour la distribution de sources de référence.
- Réseaux cellulaires : C'est le plus important domaine d'application. En effet, il existe trois contraintes principales liées à l'évolution du GSM vers l'UMTS:
- L'augmentation du nombre de cellules à cause de l'augmentation de la fréquence

- La difficulté pour réutiliser des sites GSM et partager l'infrastructure
- L'augmentation de la capacité pour des services spécifiques en intérieur
- Réseaux locaux sans fil : Comme les terminaux mobiles deviennent de plus en plus répandus, les réseaux d'accès sans fil à haut débit évolueront vers une demande haut débit. La technique radio sur fibre est une solution de manière à répondre à cette demande en utilisant la conception de réseaux pico-cellulaires afin d'optimiser la couverture tout en transmettant les signaux au plus près de l'utilisateur.
- Communication routière : L'objectif est de fournir en continu une couverture des réseaux mobiles sur les principaux axes routiers ou ferroviaires (ex. projet CapilTRAM). Ceci sera rendu possible par la technique radio sur fibre avec un coût faible et un très grand nombre de BS le long des voies.

II.6. Les architectures générale de la radio sur fibre

II.6.1 l'architecture point à point radio sur fibre :

L'architecture d'un système point à point radio sur fibre est assez simple. Pour la voie descendante (central vers le client) le central (Base Station : BS) convertit les données venant du réseau coeur en un signal radio, ce signal vient moduler un convertisseur électro-optique (Master Unit), traverse ensuite la fibre puis est détecté par un convertisseur opto-électrique (Remote Unit). Ce signal est amplifié avec un amplificateur forte puissance puis transmis dans l'air jusqu'à un terminal. En ce qui concerne la voie montante (client vers central) la même chaîne est utilisée en sens inverse, si ce n'est qu'au lieu d'utiliser un amplificateur forte puissance avant la fibre nous utilisons un amplificateur faible bruit (Low Noise Amplifier : LNA) (Remote Unit) pour éviter de trop dégrader le rapport signal sur bruit. Cette architecture est utilisée pour réaliser des dépôts d'antennes UMTS.[17]

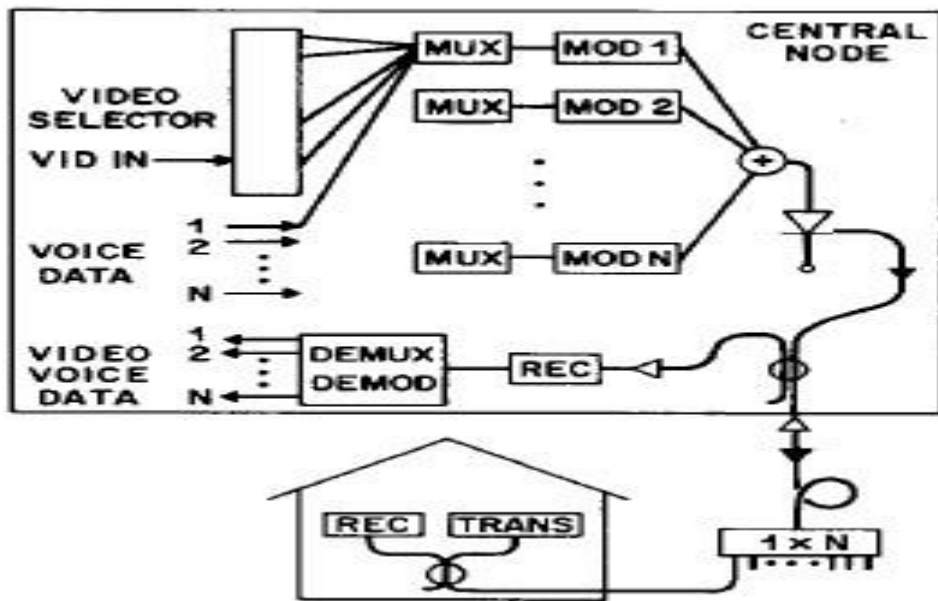


Figure II.3 :Schéma d'un système d'antenne distribué utilisant la fibre optique en P2P

II.6.2 Les architectures point à multipoints radio sur fibre

Les premières applications d'un système RoF point à multipoints ont été réalisées dans les années 90 pour transmettre le multiplex de fréquences de chaînes de télévisions sur une seule longueur d'onde optique, puis de la distribuer aux abonnés via le réseau optique

Dans le cadre de cette thèse, nous devons travailler en bidirectionnel pour la radio et nous n'avons étudié que deux architectures optiques :

- Répartition/combinaison optique : elle consiste à connecter plusieurs stations de base radio à l'aide des répartiteurs optiques.
- Lien descendant : 1 signal + 1 bruit sur les antennes (diversité d'antennes si WDM)
- Lien montant : le photorécepteur recevra la somme des signaux et des bruits ($\square(\text{signaux} + \text{bruits})$). Cela implique une possible distorsion du signal au niveau du photodétecteur et un probable phénomène de battement car les lasers même très proches en longueurs d'onde seront tous différents.
- Répartition/combinaison RF : chaque station de base est liée à un convertisseur E/O et un convertisseur O/E. Le combineur RF sert pour l'émission et la réception.
- Lien descendant : 1 signal + 1 bruit sur chaque antenne
- Lien montant : signaux+bruits = sélection d'antennes (signal) pour minimiser le bruit, sinon saturation possible si le nombre d'antennes devient important

Le principal problème d'un système avec des répartiteurs optiques est que l'on risque d'avoir des distorsions optiques au niveau de la photodiode dans la station centrale lors de plusieurs réceptions simultanées ; en radio on parle de back-off ou de recul. De plus les

lasers ne seront pas exactement à la même longueur d'onde, et cela donnera par interférences des battements. Cela limite d'une part le nombre total du point d'accès et d'autre part les gains RF des stations de bases. De plus, cela ne permet pas de traiter le problème de diversité des antennes sauf avec un multiplexage en longueur d'onde.

Le système avec le combineur RF est la solution choisie dans ce projet. Il n'y a plus de soucis au niveau de la non-linéarité des composants optoélectroniques puisque nous réaliserons un multi « point à point ». Cependant, le SNR restera critique car le niveau du bruit total à la sortie du combineur est toujours très important. Malgré cela on peut trouver un mode de décision.

II.6.3 Les architectures radio sur fibre indoor et domestique

Avec l'introduction de la téléphonie mobile de troisième génération, des nouveaux Problèmes ont été identifiés. Ces problèmes sont surtout au niveau de la couverture radio dans les bâtiments. Pour avoir du débit, la puissance reçue par les mobiles doit être suffisamment forte, or le passage à travers les murs d'un signal radio réduit fortement la puissance et donc le débit. Il est alors nécessaire de déployer un réseau radio dans le bâtiment. Tant pour des questions de coût et d'esthétisme que de limitation d'espace, il faut une architecture centralisée avec des antennes déportées.

Ce type d'architecture s'appelle en anglais Distributed Antenna Systems (DAS). Pour transmettre le signal radio, les câbles coaxiaux n'ont pas les propriétés physiques nécessaires pour ce type architecture. En effet les fréquences utilisées pour les signaux mobiles de troisième génération sont trop élevées, et donc les pertes RF sont trop importantes.[18]

L'utilisation de la fibre optique s'impose dans ce cas. Elle est aussi utilisée pour diffuser des signaux WiFi et autres. Plusieurs articles parlent de ce type d'architecture radio sur fibre pour un bâtiment.

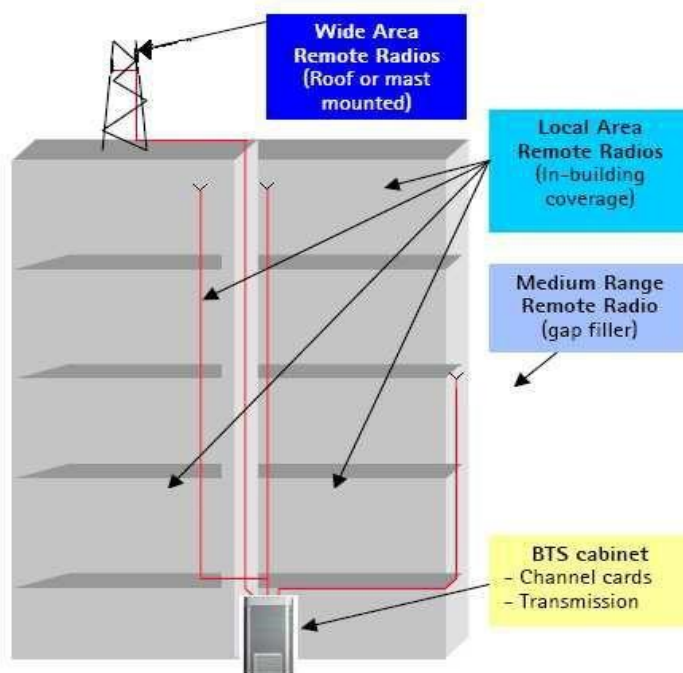


Figure II.4: Exemple d'architecture radio sur fibre pour les bâtiments

II.7 Modulation de radio sur fibre :

La modulation du signal au sein de la fibre optique est essentielle, en effet, cela permet deux choses :

- Générer l'information binaire à partir d'un signal physique.
- Traduire l'information binaire en niveau de puissance du signal lumineux.

Le procédé de modulation peut être de 2 types différents, à savoir le type direct, et le type externe.

II.7.1. Modulation externe

La modulation externe consiste à écrire les données électriques sur un signal optique continu. Elle est obtenue en modulant directement le faisceau lumineux en sortie du laser et non plus le courant d'alimentation à l'entrée du laser. Ainsi les défauts de la modulation directe qui incombent au laser ne seront plus présents sur le signal optique.

Cette modulation consiste à utiliser un modulateur externe. Celui-ci est commandé par une tension externe $v(t)$, modulée et représentative de l'information à transmettre. Cette tension appliquée au modulateur a pour propriété de modifier le facteur de transmission en intensité en sortie.

Le signal optique continu émis par le laser alimenté par un courant constant est donc peu dégradé. En traversant le modulateur, il subit les modifications du facteur de transmission et le signal de sortie se trouve modulé selon $v(t)$. Un driver est souvent présent entre les données et le modulateur afin de fixer les niveaux de $v(t)$ et choisir les modifications du facteur de transmission.

II.7.2 Modulation directe

Un des principaux avantages de l'utilisation des lasers à semi-conducteur pour les systèmes de télécommunications par fibres optiques réside dans le fait qu'il est possible de les moduler facilement. La modulation du courant qui les traverse entraîne directement la modulation en intensité de la lumière émise. Cette technique est appelée modulation directe.

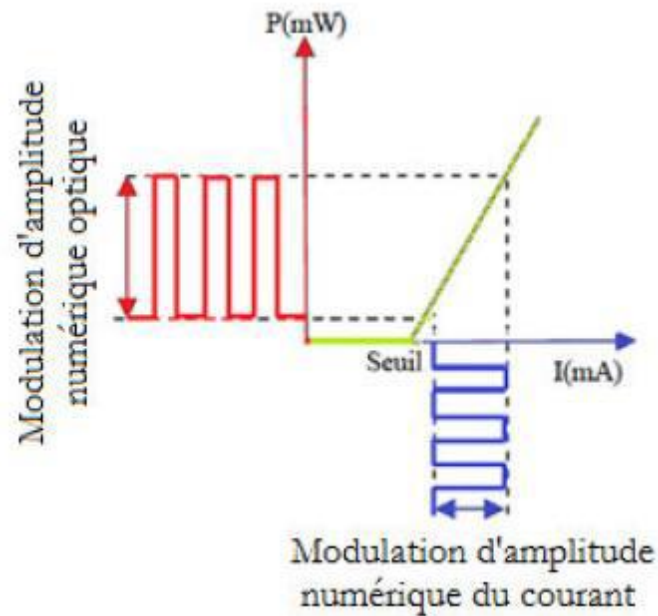


Figure II.5 : Modulation directe d'une diode

Cette solution de modulation directe requiert assez peu de composants. En dehors du laser, seuls un générateur de courant et un driver sont nécessaires. Le premier va émettre à un débit donné une séquence de données.

Le rôle du driver est de commander la source optique au niveau des puissances émises (en fixant les valeurs du courant d'alimentation). Pour cela, il modifie, transforme les niveaux du courant issu du générateur.

II.8. Canal de transmission de un ROF :

Un canal de transmission de rof constitue de (l'émetteur, L'élément de connexion, récepteur)

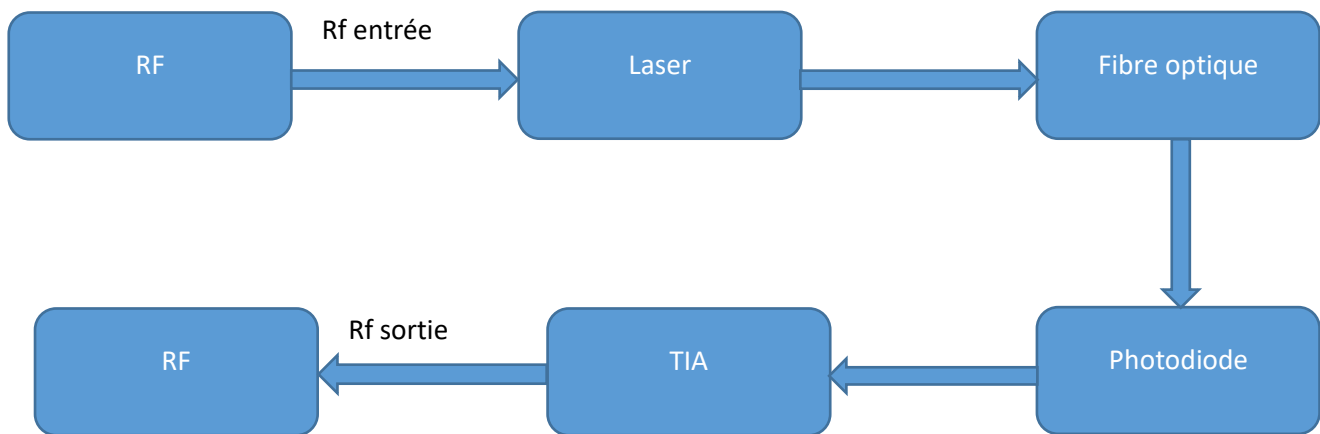


Figure II.6: schéma de un ROF

II.8.1.L'émetteur

La diode laser est composée d'une cavité comprise entre deux couches de semi-conducteurs. Le courant est injecté dans le semi-conducteur pour provoquer le pompage électrique du matériau et l'inversion de population de porteurs. Lorsque le nombre des photons confinés dans la cavité résonante est suffisamment grand, il y a émission.[19]

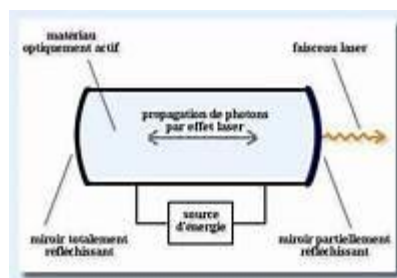


Figure II.7 : schéma de un léser

II.8.2. L'élément de connexion :

Le signal optique modulé est transmis par une fibre optique du modulateur jusqu'au photodétecteur. La fibre est constituée d'un cœur cylindrique de Silice entouré par une gaine avec l'indice de réfraction plus faible que celui du cœur. Ces deux diélectriques de même axe constituent un guide d'onde dont la surface est une gaine de protection.

A très haute fréquence les ondes électromagnétiques se concentrent dans le milieu d'indice le plus élevé, ce qui induit le guidage de l'onde.[20]

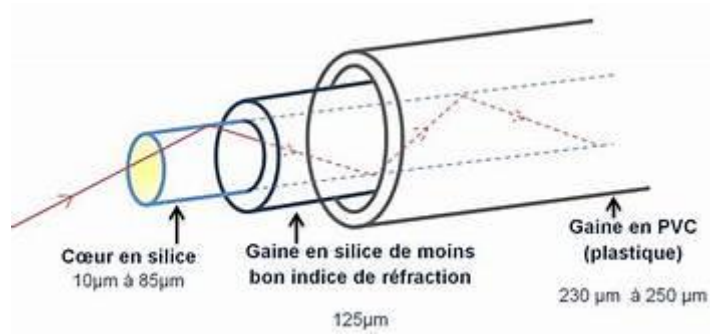


Figure II.8: fibre optique

II.8.3.Le récepteur

Le photodétecteur permet de réaliser la conversion optique – électrique du signal avec une sensibilité importante pour la longueur d’onde utilisée (choix du matériau). Le photodétecteur le plus utilisé est la photodiode PIN, constituée par trois zones : une zone intrinsèque intercalée entre une région fortement dopée P et une autre fortement dopée N.[21]

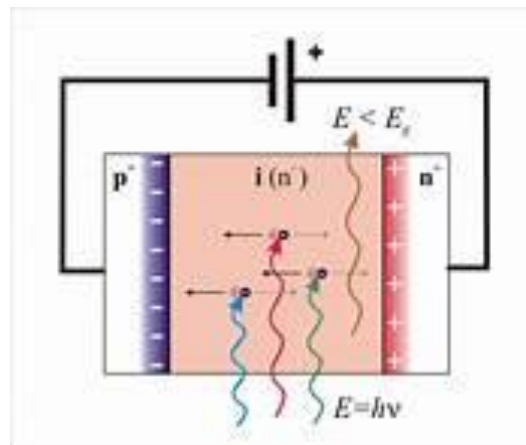


Figure II.9: un photodétecteur pin

Chapitre

3:simulation

III.1.Présentation de logicielle

La conception et l'analyse des systèmes de communications optique, comprennent des dispositifs non-linéaires et des sources de bruit non gaussiennes qui sont très complexes et couteuses en temps, il en résulte que ces tâches ne peuvent désormais être effectuées rapidement et efficacement qu'avec l'aide de nouveaux outils logiciel. OptiSystem est un outil qui permet aux scientifiques 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. OptiSystem est un environnement interactif qui allie des outils numériques efficaces à des fonctionnalités graphiques puissantes et une interface utilisateur conviviale.[22]

III.2.Application de optisystem

Créé pour répondre aux besoins des chercheurs, des ingénieurs en télécommunications optiques, des intégrateurs de systèmes, des étudiants et d'une grande variété d'autres utilisateurs, OptiSystem répond à la demande du marché en évolution de la photonique pour un outil de conception de système optique puissant mais facile à utiliser.

- OptiSystem permet aux utilisateurs de planifier, tester et simuler (à la fois dans le domaine temporel et fréquentiel):
- Conceptions de réseau optique comprenant OTDM, anneaux SONET / SDH, CWDM, DWDM, PON, câble, OCDMA
- Transmission monomode / multimode
- Optique d'espace libre (FSO), Radio sur fibre (ROF), OFDM (direct, cohérent)
- Amplificateurs et lasers (EDFA, SOA, Raman, hybride, optimisation GFF, Lasers à fibre)
- Traitement du signal (électrique, numérique, tout optique)
- Conception du sous-système émetteur et récepteur (direct / cohérent)
- Formats de modulation (RZ, NRZ, CSRZ, DB, DPSK, QPSK, DP-QPSK, PM-QPSK, QAM-16, QAM-64)
- Analyse des performances du système (diagramme de l'œil / facteur Q / BER, puissance du signal / OSNR, états de polarisation, diagrammes de constellation, pénalités linéaires et non linéaires)

III.3.Principales parties de l'interface graphique :

lorsque vous ouvrez optisystem l'application ressemble à la figure 3.2

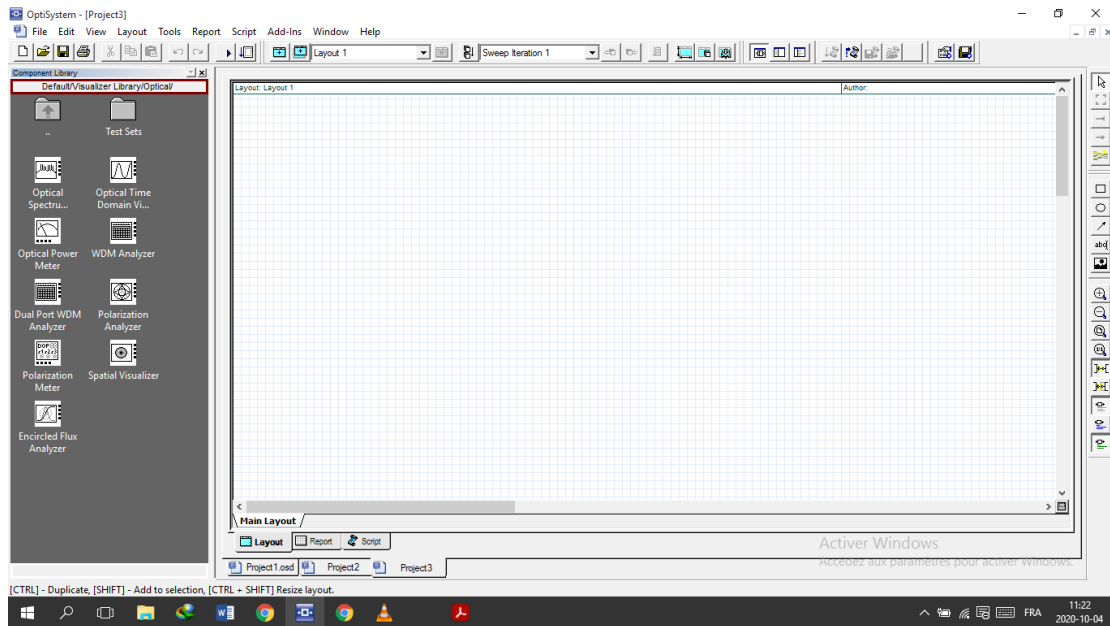


Figure III.1 : l'interface graphique

Parties principales de l'interface graphique :

L'interface graphique d'OptiSystem contient les fenêtres principales suivantes: ·

- Présentation du projet
- Dockers
 - Bibliothèque de composants
 - Navigateur de projets
 - La description
- Barre d'état

III.3.1.Présentation du projet

La zone de travail principale dans laquelle vous insérez des composants dans la présentation, modifiez des composants et créez des connexions entre les composants

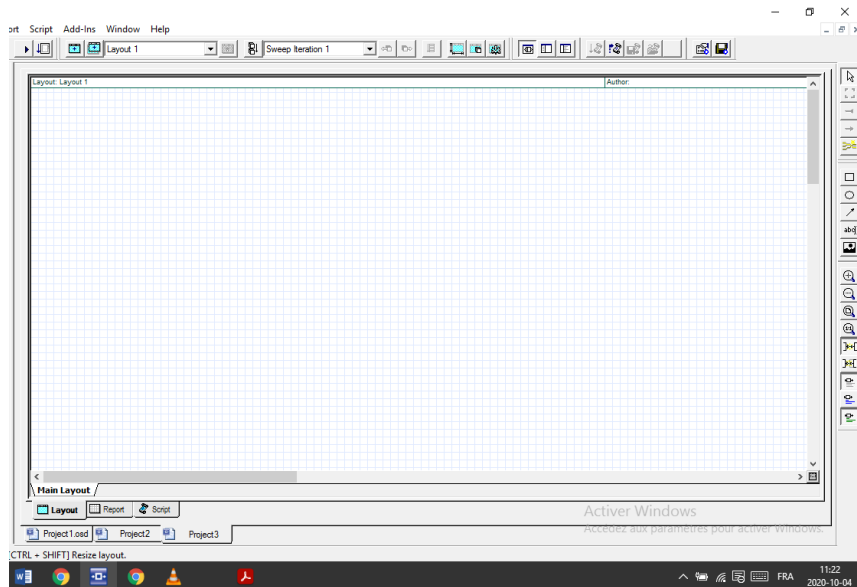


Figure III.2: Présentation du projet

III.3.2.Dockers

Utilisez les dockers, situés dans la mise en page principale, pour afficher des informations sur le projet actif (en cours):

- Bibliothèque de composants
- Navigateur de projets
- La description

III.3.2.1.Bibliothèque de composants

Accéder aux composants pour créer la conception du système



Figure III.3 : Fenêtre de la bibliothèque de composants

OptiSystem fournit une bibliothèque de composants avec des centaines de composants disponibles pour construire vos projets. Vous pouvez importer des composants uniques ou des bibliothèques de composants entières dans OptiSystem et utiliser la fonction de recherche pour rechercher des composants dans la bibliothèque.

Il existe plusieurs catégories de bibliothèques de composants:

- Par défaut: affiche les bibliothèques de composants et les composants par défaut
- Personnalisé: utilisé pour créer et inclure des composants et bibliothèques personnalisés définis par l'utilisateur
- Favoris: utilisé pour inclure vos composants les plus souvent utilisés pour un accès facile
- Récemment utilisé: affiche les dix derniers composants utilisés.

Il existe deux vues disponibles pour la bibliothèque de composants, l'une utilise des icônes et l'autre utilise une liste

III.3.2.2. Navigateur de projet

Organisez le projet pour obtenir des résultats plus efficaces et naviguer dans le projet actuel

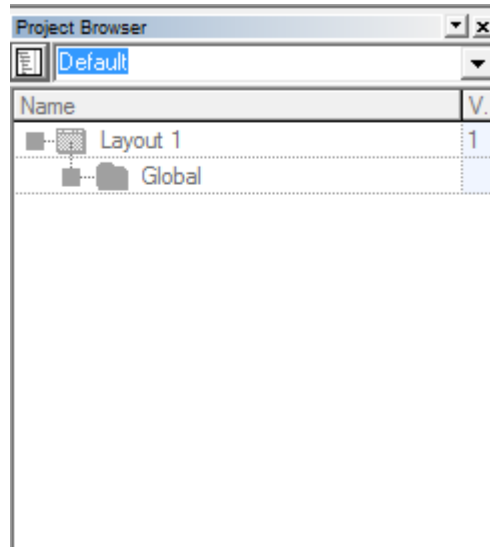


Figure III.4 :fenêtre du navigateur de projet

III.3.2.3.La description

Afficher des informations détaillées sur le projet en cours

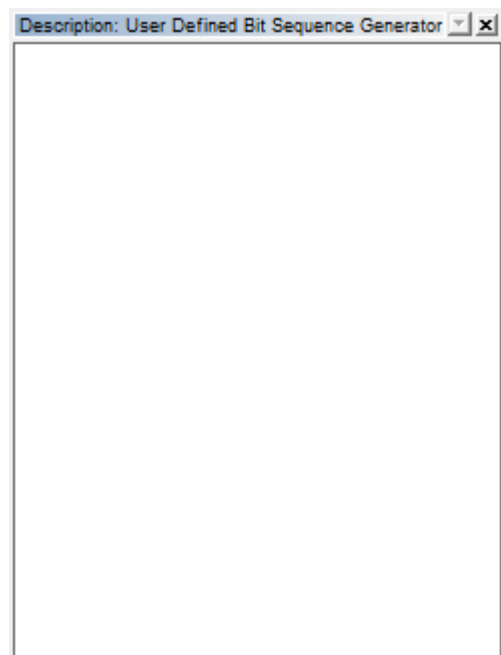


Figure III.5 : Fenêtre de la description

III.3.3.Barre d'état

Affiche des conseils utiles sur l'utilisation d'OptiSystem. Situé sous la fenêtre de présentation du projet

[CTRL] - Duplicate, [SHIFT] - Add to selection, [CTRL + SHIFT] Resize layout.

Figure III.6 : barre d'état

III.3.4.Barre de menu

Contient les menus disponibles dans OptiSystem . Beaucoup de ces éléments de menu sont également disponibles sous forme de boutons sur les barres d'outils ou à partir d'autres listes.

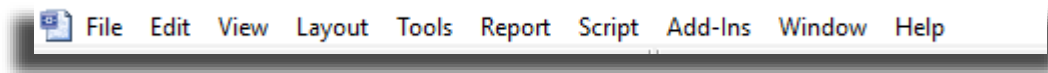


Figure III.7:barre de menu

III.3.5.Utilisation de la bibliothèque de composants

Nous allons concevoir l'émetteur modulé externe. Pour ce la on sélection les composants de la bibliothèque de composants et on les place dans la disposition principale.

Remarque

OptiSystem fournit un ensemble de composants par défaut intégrés.

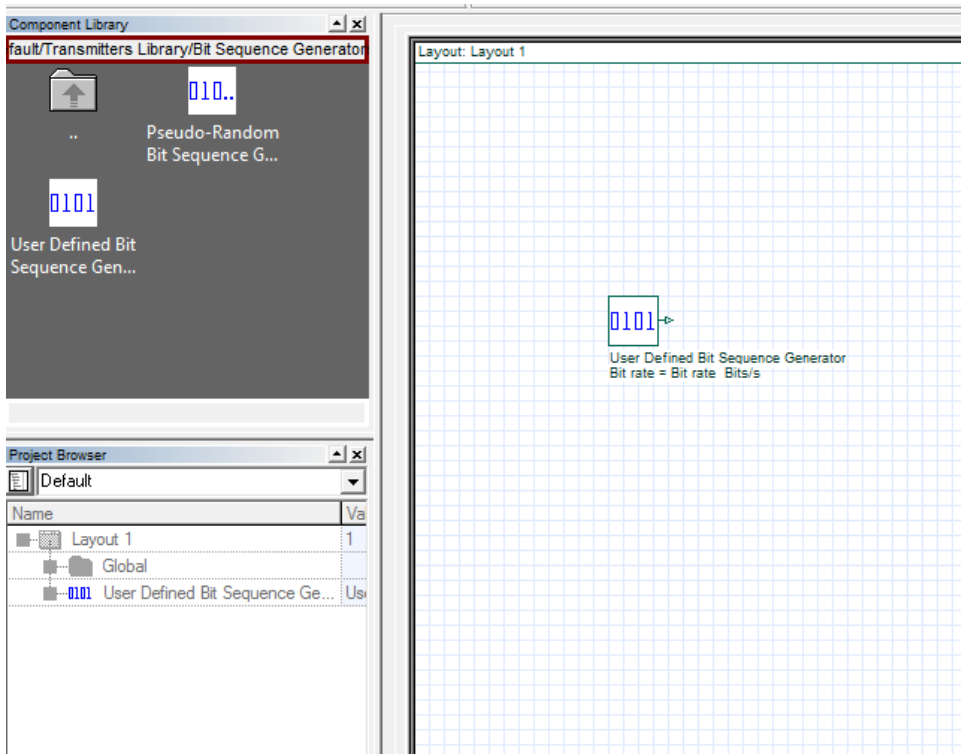


Figure III.8 : Ajout d'un bit sequence generator à la disposition principale

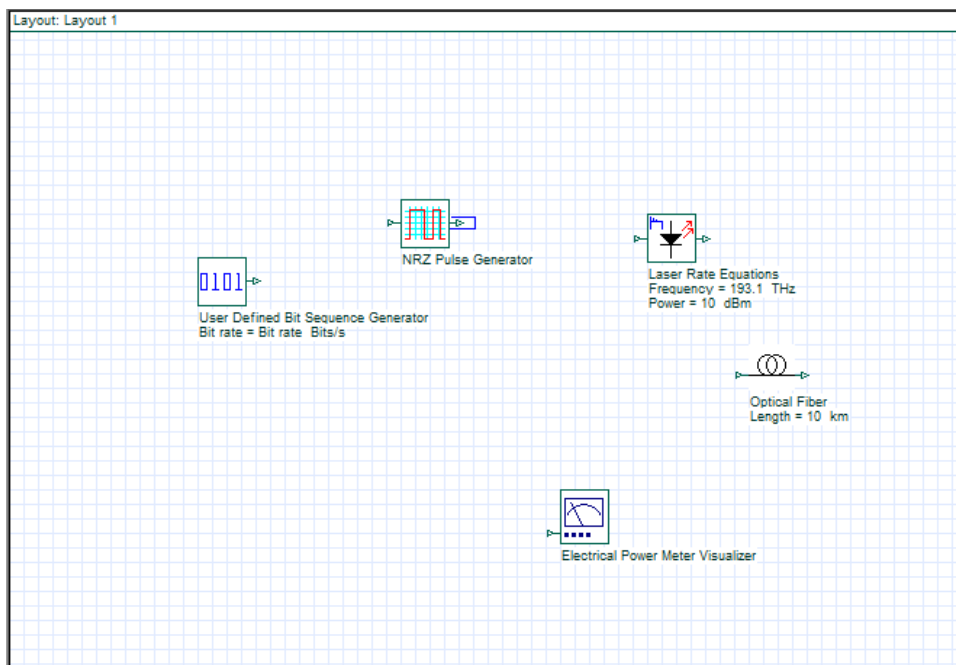


Figure III.9 : Ajout de composants à la disposition principale

III.3.6. Fonction de connexion automatique

Par défaut, la fonctionnalité Connexion automatique sur Drop est active. Les composants peuvent se connecter automatiquement de deux manières:

- Auto Connexion on Drop: Lorsque vous placez un composant de la bibliothèque de composants dans la disposition principale, le port d'entrée du composant se connecte automatiquement au port de sortie le plus proche d'un autre composant.
- Auto Connexion on Move: Lorsque vous déplacez un composant dans la disposition principale, le port d'entrée du composant se connecte automatiquement au port de sortie le plus proche d'un autre composant.

III.3.7. Activation et désactivation de la fonction de connexion automatique

Pour activer et désactiver la fonction de connexion automatique, on effectue la procédure suivante.

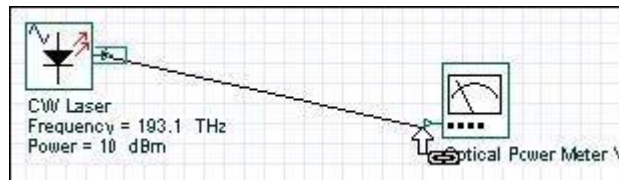


Figure III.10 : Ports de connexion

Pour connecter les composants, on clique sur le port d'un composant et on fait glisser la connexion vers le port d'un composant compatible. On Connecte le port de sortie du générateur de séquence de bits pseudo-aléatoire au port d'entrée de la séquence de bits du générateur d'impulsions NRZ.

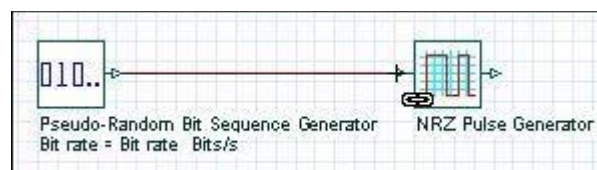


Figure III.11. Composants de connexion

- On Connecte le port de sortie bit sequence generator au port d'entrée NRZ Pulse Générateur
- On Connecte le port de sortie Laser rate equationne au port d'entrée du fibre optique .

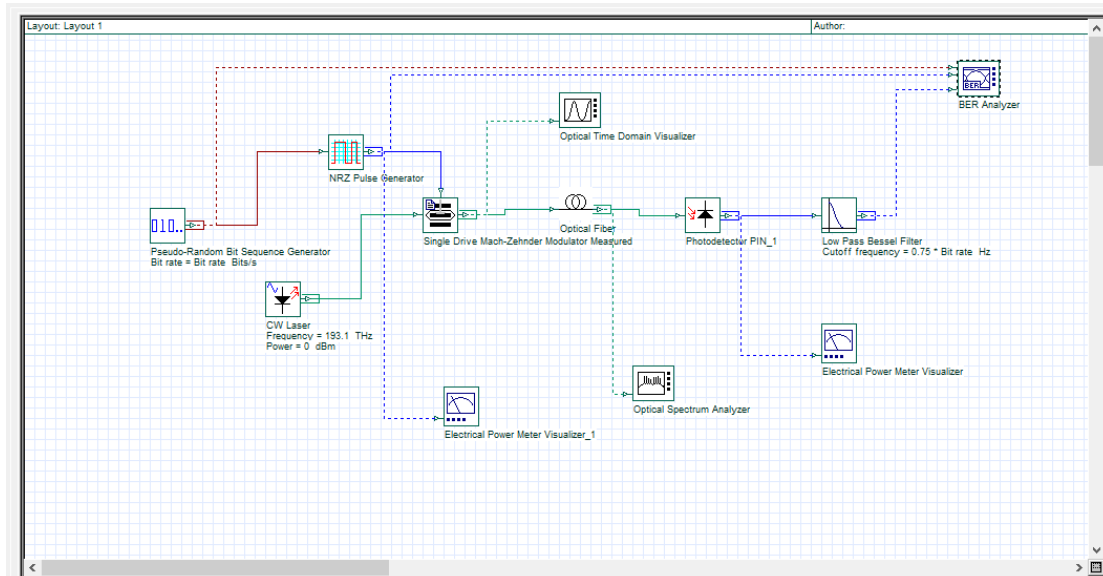


Figure III.12 : Composants de connexion

III.3.9. Visualisation des résultats

OptiSystem nous permet de visualiser les résultats de la simulation de plusieurs façons. Le dossier Bibliothèque de visualiser dans la bibliothèque de composants nous permet de publier des résultats de processus et d'affichage à partir d'une simulation. Le visualiser est classé comme un visualisé électrique ou optique selon le type de signal d'entrée. Par exemple, pour visualiser le signal électrique généré par le générateur d'impulsions NRZ dans le domaine temporel, on utilise un BER analyzer et un electrical power meter visualizer

Pour visualiser les résultats, on effectue les procédures suivantes :

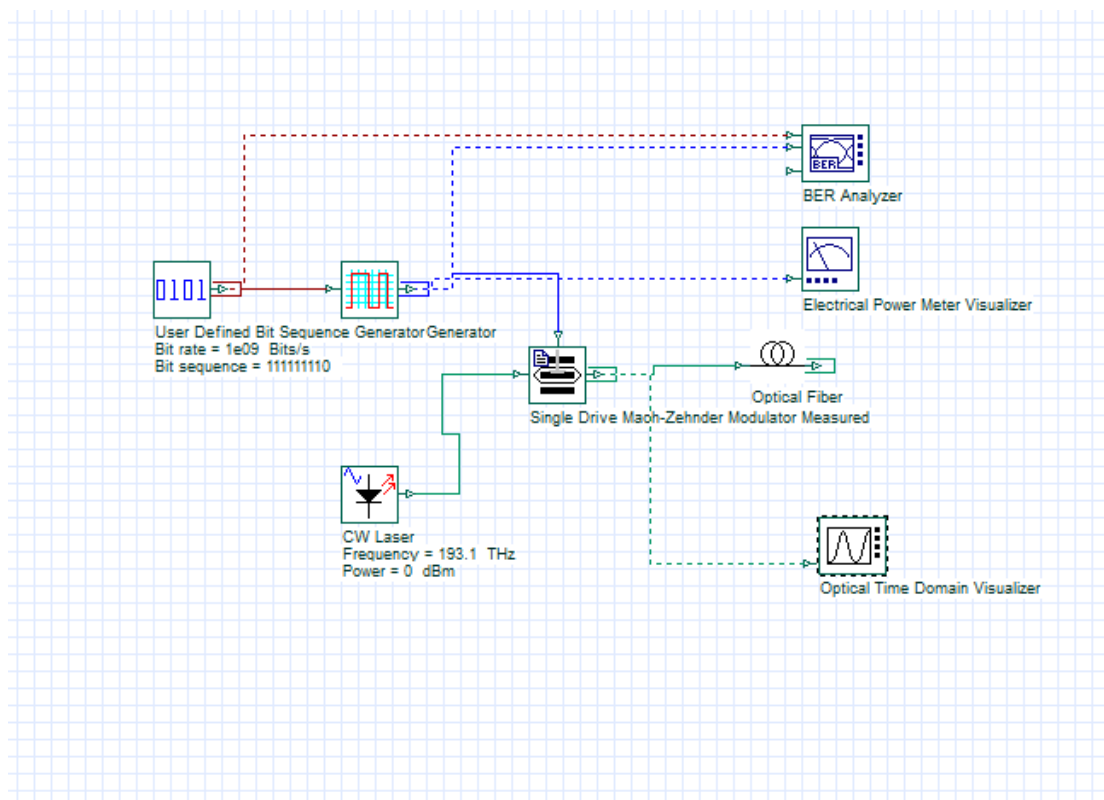


Figure III.13. Visualiser dans la disposition principale

III.3.10. Paramètres de composants

III.3.10.1 Affichage et modification des propriétés du composant

Pour afficher les propriétés d'un composant, on effectue l'action suivante :

Action :

Dans la disposition principale, on double-clique sur Laser rate equationne. Les paramètres de composants sont organisés par catégories. Le Laser rate equationne possède a catégories de paramètres.

- Principal - inclut les paramètres d'accès au laser (Fréquence, Puissance, Largeur de ligne, Phase initiale)
- Polarisation
- Simulation
- Bruit
- Nombres aléatoires

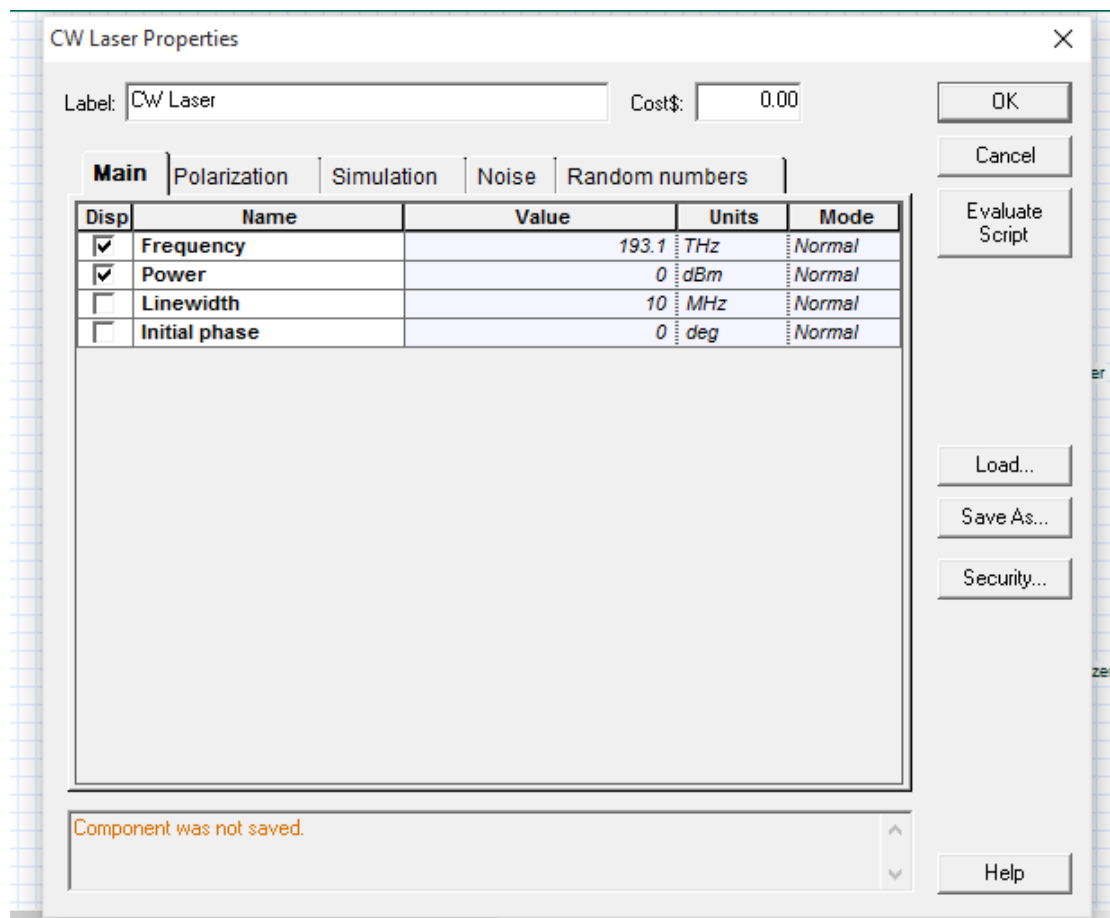


Figure III.14 : Paramètres de composant CW laser

Chaque catégorie a un ensemble de paramètres. Les paramètres ont les propriétés suivantes:

- Prénom
- Valeur
- Unités □ Mode

III.3.10.2. Affichage des paramètres dans la mise en page

La première propriété de paramètre est Disposition. Lorsque vous sélectionnez cette propriété, le nom, la valeur et l'unité du paramètre apparaissent dans la disposition principale. Par exemple, si vous sélectionnez Disposition pour fréquence et puissance, ces paramètres apparaissent dans la disposition principale.

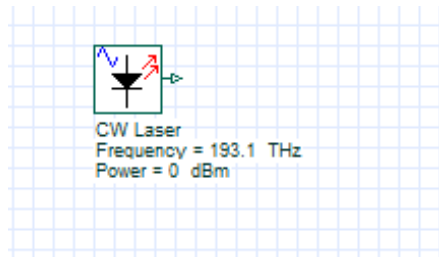


Figure III.15 Affichage des paramètres dans la disposition principale

III.3.11. Unités de paramètres

Certains paramètres, tels que Fréquence et Puissance, peuvent avoir plusieurs unités. La fréquence peut être en **Hz**, **THz** ou **nm**, et la puissance peut être en **W**, **mW** ou **dBm** (voir Figure III.16). La conversion est automatique.

Remarque

Vous devez appuyer sur Entrée ou cliquer dans une autre cellule pour mettre à jour les valeurs.

Laser Rate Equations_1 Properties

Label: Laser Rate Equations_1 Cost\$: 0.00

Main Physical Numerical Graphs Simula... Noise Random...

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Frequency	1552.52438115	nm	Normal
<input type="checkbox"/>	Calculate current	<input checked="" type="checkbox"/>	Hz	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Power	10	THz	Normal
<input type="checkbox"/>	Power at bias current	0	nm	Normal
<input type="checkbox"/>	Bias current	38	mA	Normal

Figure III.16 : Unités de paramètres

III.3.12 Sauvegarde des résultats de la simulation

OptiSystem vous permet de contrôler le calcul de trois manières différentes:

- Calculer l'ensemble du projet: toutes les itérations de balayage pour plusieurs mises en page
- Calculer toutes les itérations de balayage dans la mise en page active: toutes les itérations de balayage pour la mise en page actuelle
- Calculer l'itération de balayage en cours: itération de balayage en cours pour la disposition actuelle Par défaut, vous calculerez l'ensemble du projet, car il n'y a actuellement aucune mise en page multiple et aucune itération de balayage.

Pour exécuter une simulation, effectuez la procédure suivante.

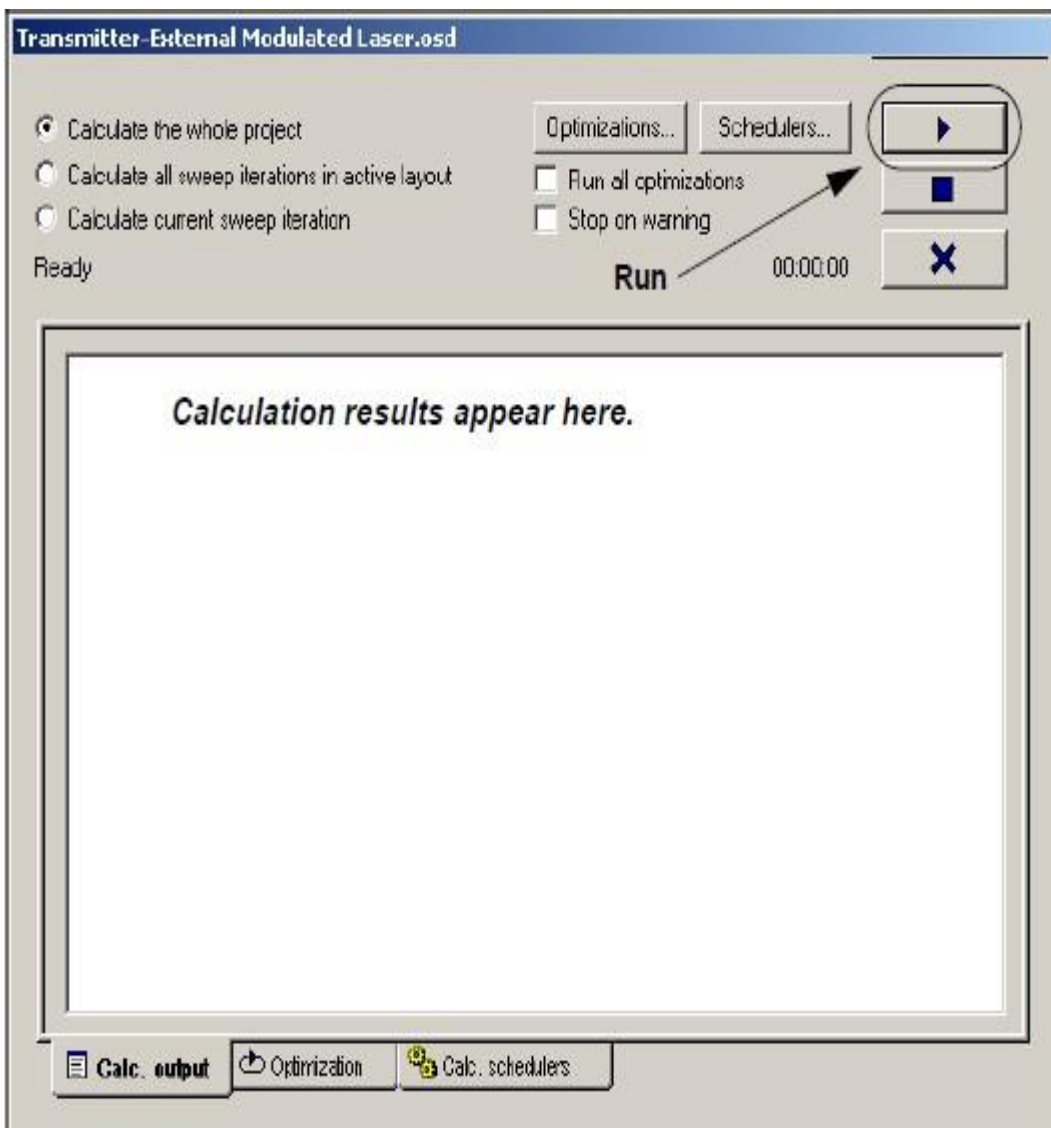


Figure III.17 : Exécution de la simulation

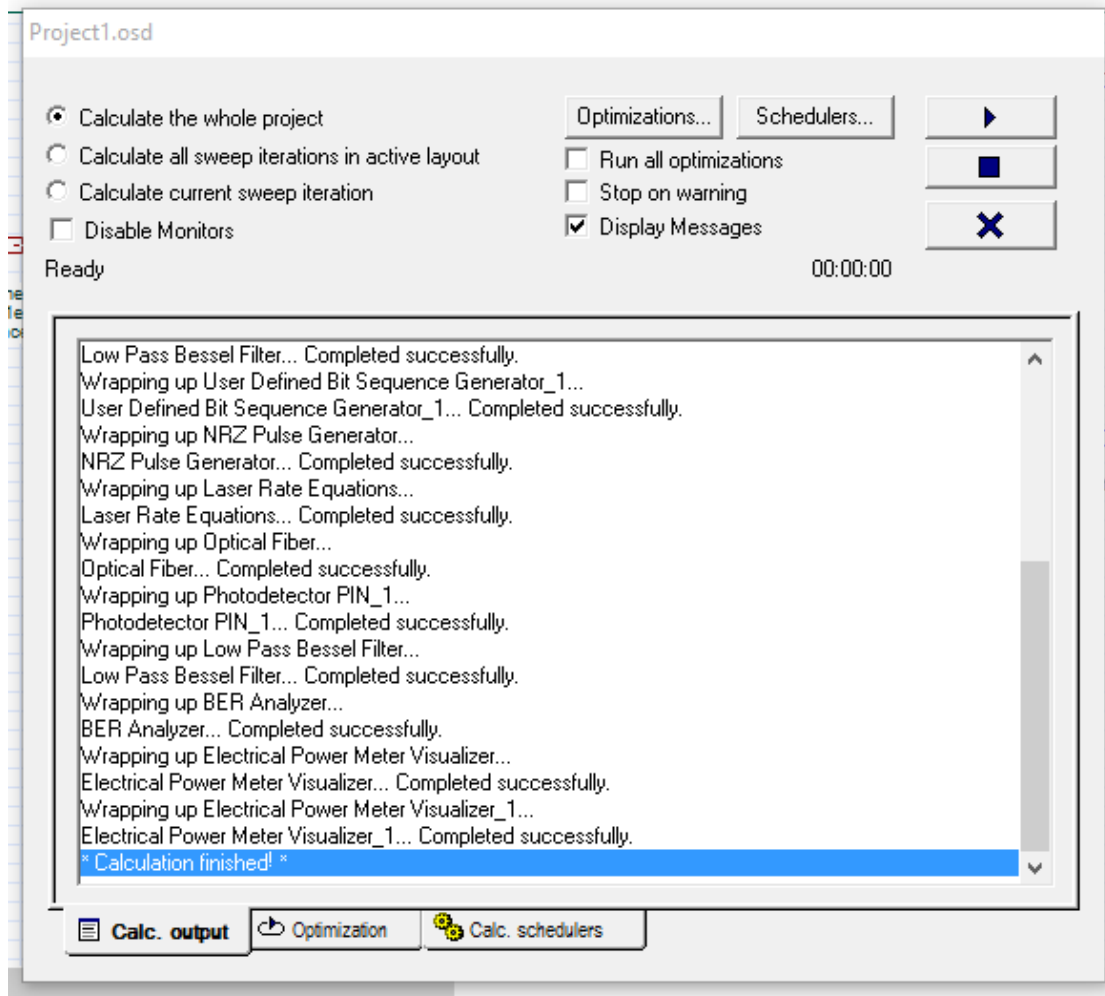
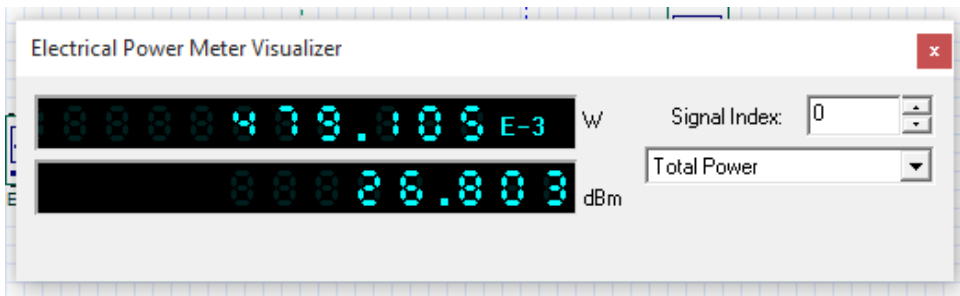


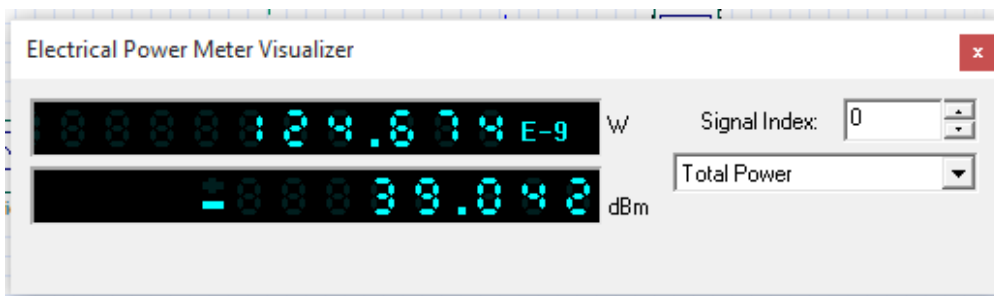
Figure III.18 : fin de simulation

III.4. Résultats de simulation :

III.4.1. Les signaux



a)



b)

Figure III.19 : résultats de visualizers a) NZR plus du generator b) photodiode PIN

Interprétation

Dans cette partie on va visualiser les signaux optiques dans le domaine fréquentiel avec un analyseur de spectre optique, on obtient le résultat suivant :

Le premier résultat le représente le signal avant la transmission et le deuxième après la transmission ; On compare les deux résultats pour connaître si le signal est transmis dans les meilleures conditions et si on a des minimaux de bruit

Si le premier résultat est 26,803 dbm et le deuxième est -39,042 dbm

Donc la différence est 65,845 dbm

Donc la bande est bonne

III.4.2. les fréquences

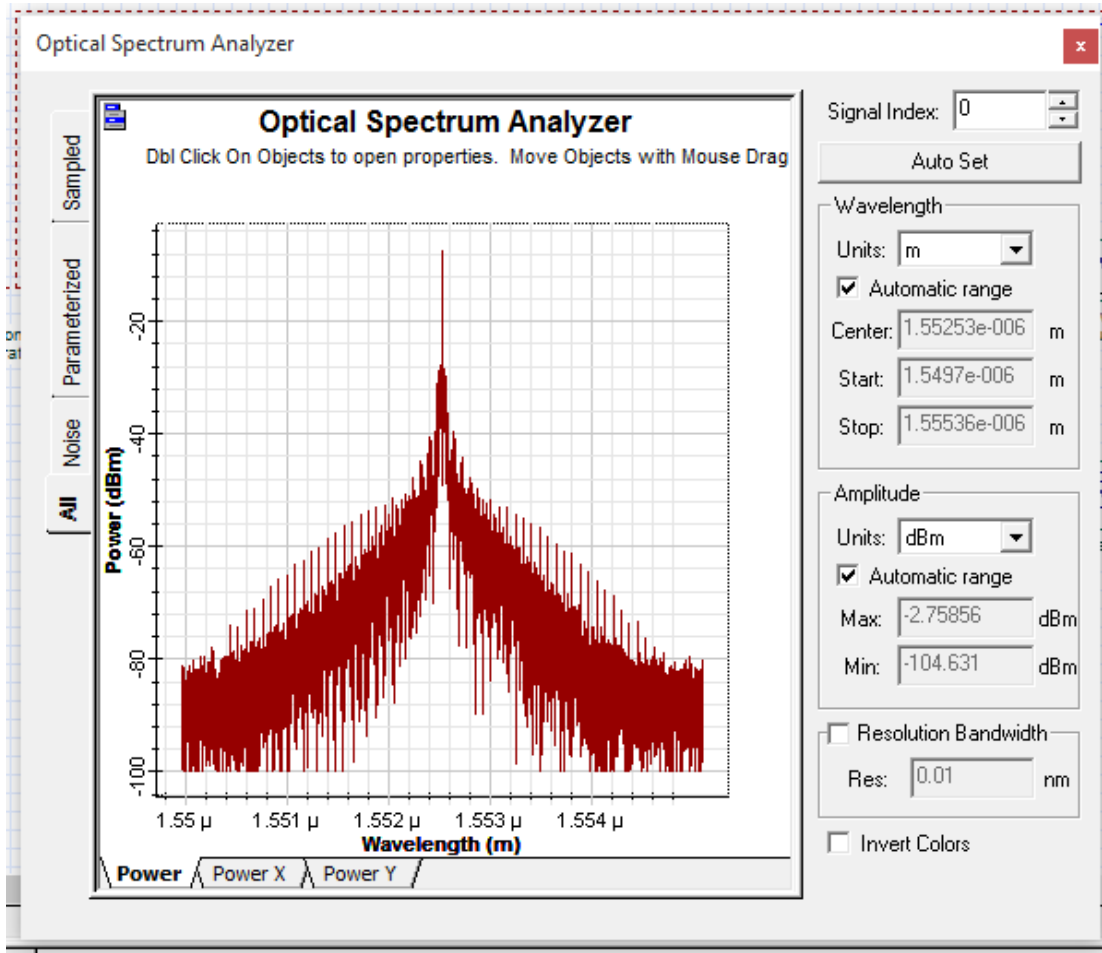


Figure III.20 : optical spectrum analyzer

Après cette simulation on trouve que la bande fournie, la fréquence est entre 1.552μ et 1.553

III.4.3.le taux d'erreurs binaires

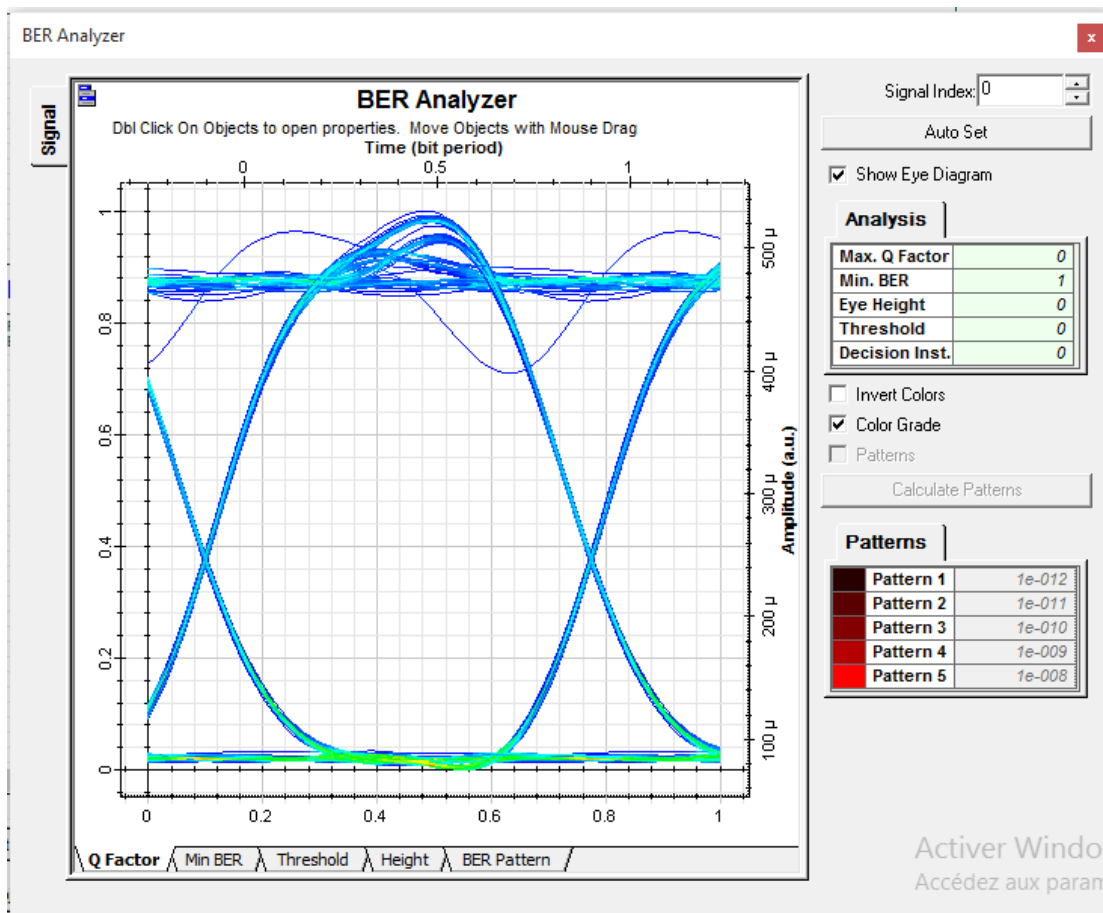


Figure III.21 :BER analyzer

Si

$$\text{BER} = \frac{\text{nombre de bit éronie}}{\text{nombre de bit transmission}}$$

remarquons, Louverture verticale du diagramme en effet L'œil indique une bonne résistivité du système étudié au bruit et Louverture horizontale indique la sensibilité a un décalage de l'instant décha tillage .

Plus L'œil est ouvert plus il est facile de différence entre les 1 et le 0 dans le signal

Donc le bond est bon .

Conclusion générale

Conclusion générale

L'évolution phénoménale des besoins en bande passante, due principalement à l'apparition de nouveaux services internet a entraîné une utilisation de plus en plus massive des réseaux de transport. Exploitant une infrastructure optique, ces réseaux ont connu plusieurs évolutions technologiques majeures pour leur permettre de transporter des volumes de trafic en perpétuelle croissance.

L'état de l'art sur la Radio sur Fibre montre qu'on assiste actuellement à un renouvellement de l'intérêt porté à ce domaine prometteur des télécommunications radio et optiques. Les recherches en cours portent sur les performances des composants, du système complet et sur de nouvelles applications (intégration de nouveaux réseaux radio).

L'objectif majeur de nos travaux est réalisé une liaison de radio sur fibre pour le minimum de
Aux coûts les plus bas possibles et simule la liaison

C'est pourquoi il nous a paru intéressant de commencer ce mémoire par une étude d'une liaison par fibre optique et une description approfondi des composants présents dans les liaisons sur fibre optique ainsi que les différentes limitations connues lors de la propagation du signal.

Au cours du deuxième chapitre, l'étude était portée sur la découverte d'une nouvelle technologie qui permet d'avoir accès au haut débit tout en respectant les techniques de transmission du signal.

Et pour finir nous avons effectué une simulation en agissant sur des facteurs de liaison optique comme les signaux de la fibre .les fréquences et le débit de biner de la liaison. Ceci nous a permis de connaître l'utilité de cette nouvelle technologie.

Bibliographia

- [1] <https://www.techniques-ingenieur.fr/>
- [2] <https://www.mongosukulu.com/index.php/contenu/informatique-et-reseaux/telecommunications/610-les-canaux-de-transmission?showall=1>
- [3] S. Tae Choi *et al*, “A 60-GHz Point-to-Multipoint Millimeter-Wave Fiber-Radio Communication System” in IEEE Transaction on MTT, vol 54, n°5, may 2006
- [4] A. Kim, Y.H. Joo, Y. Kim, “60GHz Wireless Communication Systems with Radio-over-Fiber Links for Indoor Wireless LANs”, in IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 50, n°. 2, may 2004
- [5] S.E. Gunnarsson *et al*, “60-GHz Single-Chip Front-end MMICs and Systems for Multi-Gb/s Wireless Communication”, IEEE Journal of solid-state circuits, vol 42, n°5, may 2007
- [6] K-C. Huang, DJ. Edwards, “Millimeter wave antennas for Gigabit Wireless Communications”, Edition Wiley 2008
- [7] K.C. Gupta, “Microstrip lines and *slotlines*”, Artech house, Boston-London, 1996
- [8] J.J. Lee *et al*, “A GCPW to Waveguide Transition in 60 GHz LTCC Sip”, Radio and Wireless Symposium, 18-22 janv 2009
- [9] Etude d'une liaison radio sur fibre optique, Université Dr. Tahar Moulay–Saida Promotion 2017/2018
- [10] <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Radio-fréquence&oldid=161250066>
- [11] <https://www.blackbox.fr/fr-fr/page/24461/Information/Technique/black-box-explique/Wireless/communication-sansfil>
- [12] <https://www.techno-science.net/definition/6724.html>
- [13] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi>
- [14] BELKADI Salim - ABAIDIA Abdelmadjid , planification des reseaux WIFI par usage d'une approche heuristique :recherche tabou, Soutenu le 29/05/16
- [15] J. Capmany and D. Novak, "Microwave photonics combines two worlds," *Nature Photonics*, vol. 1, no. 6, pp. 319-330, Jun, 2007.
- [16] MALAH SALAH EDDINE, OUAHABI NASR EDDINE «Etude de fonctionnement et des caractéristiques de la fibre optique, Licence en Télécommunication,2014 Université Djillali Liabes De Sidi Bel Abbas.

- [17] N. Noisette, « Remote RF solutions for outdoor scenarios », rap. tech., France Télécom R&D, jan. 2003.
- [18] D.Wake, « A Survey of Current and Emerging Radio-over-Fibre Technologies for Wireless Communications Applications ». Application Note, 2003.
- [19] Laser Diodes, National Instruments. <http://zone.ni.com/devzone/cda/ph/p/id/125>. Site web consulté le 14 mars 2012.
- [20] Cours TELECOM Bretagne, ELP 303. « Transmissions sur fibre optique ».
- [21] Structure du photodétecteur P-I-N, <http://www.tpub.com/neets/tm/111-2.htm>. Site web consulté le 14 mars 2012
- [22] Optiwave , "OptiSystem, Optical Communication System Design," [Online]. Available: <http://optiwave.com/category/products/system-and-amplifier-design/optisystem/>.

