



UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI

Ecole Doctorale des Sciences de l'Ingénieur (ED-SDI)

Master de Recherche Télécommunications et Réseaux Informatiques

Rapport de Stage

Thème :

Implémentation du CDMA dans les réseaux d'accès sur fibre

Présenté par :

Harold Rotimi ADEGNANDJOU

Encadré par :

Dr SANYA Max Fréjus O.

Maître-Assistant (CAMES)

Enseignant-Chercheur à l'UAC/EPAC

Sous la direction de :

Prof. ASSOGBA Kokou

Maître de conférences (CAMES)

Enseignant-Chercheur à l'UAC/EPAC

Dédicaces

Nous dédions ce travail à tous ceux qui ont une place particulière aussi bien dans nos esprits que dans nos cœurs.

Nous pensons avant tout à ces intarissables puits de sagesse, d'affection et de dévouement qui sont nos parents.

A ma femme et mes deux enfants pour leur patience durant mes séances de travail prolongées au laboratoire.

A mes chères sœurs pour tout ce qu'on a vécu.

A tous mes collègues de la station d'atterrissement du câble sous-marin ACE Cotonou.

A mes meilleurs amis

Remerciements

La rédaction de ce mémoire ne serait effective sans l'implication totale et l'aide indéfectible de certaines personnes. C'est le moment d'exprimer nos profondes reconnaissances à l'endroit de ces personnes qui tout au long de notre formation ont eu le mérite de sacrifier leur précieux temps et même parfois leurs ressources pécuniaires pour nous apporter le savoir indispensable, le soutien nécessaire et la franche collaboration essentielle pour la réussite de toute excellente œuvre. Nous voulons tout d'abord dire merci :

- Au Directeur de l'Ecole Doctorale Sciences de l'Ingénieur, nous voulons nommer le Professeur Antoine VIANOU, pour nous avoir accepté dans ce programme d'études et nous espérons avoir été dignes de lui, car c'est à une véritable école que nous sommes allés sous sa direction ;
- Au Professeur Kokou ASSOGBA qui a supervisé ce travail. Nous lui témoignons notre profonde gratitude ;
- Au Docteur Max Fréjus O. SANYA qui a encadré ce travail. Nous en sortons grandement édifiés ;
- Aux Honorables membres du jury qui ont accepté juger de la valeur et de la qualité de ce document et consacrer leur précieux temps pour parfaire cette œuvre malgré leurs multiples occupations ;
- A tout le corps administratif et professoral de l'EDSI ;
- A tous les camarades de la promotion 2018-2019 ;
- A tous nos parents, proches ou amis qui nous ont aidés pour la réalisation de ce document ;

Résumé

Le développement du numérique a entraîné l'apparition des services et autres applications tel que (Vidéo 4k, IOT, online gaming, vidéo conférences, live streaming, WebTV, online Storage) nécessitant des bandes passantes de plus en plus élevées. La République du Bénin ayant pris la mesure de la situation, s'est raccordé au backbone international via deux entrées, les câbles SAT3 (South Africa Transit 3) et l'ACE (Africa Coast to Europe) afin de permettre à notre pays de monter sur l'autoroute du très haut débit. Bien que disposant du haut débit sur les différents câbles sous-marins, les utilisateurs ne bénéficient pas encore d'un débit acceptable. Ceci est dû à l'inadéquation du réseau d'accès en place. Afin d'améliorer la qualité du débit, il importe de repenser les réseaux d'accès notamment en terme de techniques d'accès multiples. Le but de ce travail est de proposer une implémentation de la technique CDMA (Code Division Multiple Access) dans les réseaux d'accès sur fibre. Pour ce faire, nous avons fait une étude des réseaux d'accès optiques. Nous avons également présenté les techniques d'accès multiples à savoir TDMA (Time Division Multiple Access), FDMA (Frequency Division Multiple Access), WDM (Wavelength Division Multiplexing), CDMA (Code Division Multiple Access). Ce qui nous a permis de déboucher sur l'étude du CDMA optique. Un modèle d'OCDMA (Optical Code Division Multiple Access) a été proposé puis simulé sur plusieurs distances en utilisant le logiciel Optisystem 7. Les performances du modèle ont été étudiées en implémentant deux techniques de détection à savoir : la détection directe et la détection équilibrée. Les résultats obtenus sont interprétés et analysés en termes de TEB (Taux d'Erreur Binaire) et de diagrammes de l'œil.

Abstract

Digital evolution led to the development of many technologies that need higher bandwidth to operate optimally. Examples of those are (Video 4k, IOT, online gaming, video conferences, live streaming, WebTV, and online Storage). In order to cope with the continuously increase in bandwidth demand the Republic of Benin had welcomed a new submarine cable namely ACE (African coast to Europe) adding to the previous international backbone SAT3 (South Africa Transit 3). Despite these two submarine cables available it is still difficult to enjoy high speed internet connection in the country. This is due to the inadequacy of access networks. For users to be able to enjoy high speed internet connection it is compulsory to redesign access networks in term of their multiple access techniques. The aim of this research is to develop a CDMA (Code Division Multiple Access) model that can be used in optical fiber access networks. In achieving that we made a study on optical access networks. We also presented multiple access techniques such as TDMA (Time Division Multiple Access), FDMA (Frequency Division Multiple Access), WDM (Wavelength Division Multiplexing), and CDMA (Code Division Multiple Access). This has led us to the study of optical CDMA. An OCDMA (Optical Code Division Multiple Access) model has been proposed and simulated into Optisystem 7 software. We were able to monitor the performances of the system using two detections techniques: direct detection and balanced detection. The results obtained were analyzed and discuss in terms of BER (Binary Error Rate) and eye diagrams.

Table des matières

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
Table des matières	v
Sigles et Abréviations.....	viii
Liste des figures	x
Liste des tableaux	xi
Introduction générale.....	1
1. Chapitre 1: Généralités sur les réseaux d'accès optiques et techniques d'accès multiples.	3
1.1 Description d'une liaison optique.....	3
1.1.1 Emetteur.....	3
1.1.1.1 LED	3
1.1.1.2 Diodes laser	4
1.1.1.3 Techniques de modulation.....	4
1.1.2 Fibre optique	6
1.1.3 Récepteur	7
1.1.3.1 Photo diode PN/PIN	7
1.1.3.2 Photodiode APD.....	8
1.2 Réseaux de télécommunications optiques	8
1.2.1 Réseau de transport	9
1.2.2 Réseau d'accès optique	9
1.2.2.1 Réseaux optiques AON/PON	10
1.3 Techniques d'accès multiple	11
1.3.1 Technique FDMA	12

1.3.2	Technique TDMA	12
1.3.3	Technique WDMA.....	13
1.3.4	Technique CDMA.....	14
	Conclusion.....	15
2.	Chapitre 2: Etude du CDMA pour les communications optiques.....	16
2.1	CDMA : des radiofréquences à l'optique	16
2.1.1	Pourquoi le CDMA optique ?	16
2.1.3	Sécurité et confidentialité	17
2.1.4	Système OCDMA tout-optique.....	18
2.2	Typologie des systèmes OCDMA	19
2.2.1	OCDMA par encodage temporel	19
2.2.2	OCDMA par encodage spectral de phase	20
2.2.3	OCDMA par encodage spectral d'amplitude.....	21
2.2.4	OCDMA par encodage spectral-temporel.....	22
2.3	Codage SAC-OCDMA	24
2.3.1	Paramètres des codes SAC-OCDMA	24
2.3.2	Codes bipolaires.....	26
2.3.2.1	Séquences de Walsh-Hadamard	26
2.3.2.2	Codes m-séquence.....	27
2.3.2.3	Séquence de Gold.....	28
2.3.3	Codes unipolaires:.....	30
2.3.3.1	Codes optiques orthogonaux	30
2.3.3.2	Codes premiers	30
2.3.4	Codes ZCC (Zero Cross Correlation)	32
2.4	OCDMA au moyen d'AWG/FBG	34
2.4.1	OCDMA a base d'AWG (Arrayed Waveguide Grating).....	34
2.4.2	OCDMA à base de réseaux de Bragg	35

Conclusion	36
3. Chapitre 3 : Implémentation du CDMA dans une liaison optique sur fibre : Simulations et résultats.....	37
3.1 Présentation du logiciel Optisystem	37
3.2 Présentation de la chaine OCDMA modélisée	38
3.3 Etude des performances de la liaison OCDMA modélisée : cas de détection directe....	48
3.4 Etude des performances de la liaison OCDMA modélisée : cas de détection équilibrée	50
Conclusion générale et perspectives.....	53
Bibliographie	54

Sigles et Abréviations

ACE	Africa Coast to Europe
AON	Active Optical Network
AWG	Arrayed Waveguide Grating
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BTI	Bénin Telecom Infrastructures
BTS	Bénin Télécoms Services
CDMA	Code Division Multiple Access
DS	Direct Sequence
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
FAT	Fiber Access Terminal
FDT	Fiber Distribution Terminal
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FE	Frequency Encoding
FBG	Fiber Bragg Grating
FFH	Fast Frequency Hopping
FTP	Foiled Twisted Pair
FTTC	Fiber to the Curb
FTTH	Fiber To The Home
FTTN	Fiber to the Node
GPON	Gigabit Passive Optical Network
HDSL	High bit-rate DSL
IP	Internet Protocol
LED	Light-Emitting Diode
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
MEA	Modulateur d'Electro-Absorption
MLL	Mode Lock Laser
MZM	Mach-Zehnder Modulator
OCDMA	Optical Code Division Multiple Access
OLT	Optical Line Terminal
ONU	Optical Network Unit
OOC	Optical Orthogonal Code
PC	Prime Codes
PIN	Positive Intrinsic Negative
PMD	Polarisation Mode Dispersion
PN	Positive Negative
PON	Passive Optical Network
MSTP	Multiservice Transport Platform
MUX/DMUX	Multiplexeur/Demultiplexeur
NRA	Noeud de Raccordement d'abonnés
NRO	Noeud de Raccordement Optique

OCDMA	Optical Code Division Multiple Access
ODN	Optical Data Network
OLT	Optical Line Terminal
ONU	Optical Network Unit
OSN	Optical Switching Node
OTDR	Optical Time Domain Reflectometer
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy
PMD	Polarisation Mode Dispersion
PON	Passive Optical Network
PSTN	Public Switched Telephone Network
RTC	Réseau Téléphonique Commuté
SAT3	South Africa Transit 3
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SDSL	Symetrique Digital Subscriber Line
SFTP	Shielded Foiled Twisted Pair
SPE	Spectral Phase Encoding
STP	Shielded Twisted Pair
TDM	Time Division Multiplexing
TEB	Taux d'Erreur Binaire
THD	Très Haut Débit
TIC	Technologies de l'Information et de la Communication
UTP	Unshielded Twisted Pair
VDSL	Very High bit-rate DSL
WASC	West African Submarine Cable
WDM	Wavelength Division Multiplexing
xDSL	Digital Subscriber Line
ZAA	Zone à Autonomie d'Acheminement
ZCC	Zero Cross-correlation Code
ZL	Zone Locale

Liste des figures

Figure 1.1 : Schéma d'une liaison optique.....	3
Figure 1.2 : Schéma d'une liaison optique à modulation directe:.....	4
Figure 1.3: Schéma bloc d'un modulateur mach-zehnder.....	5
Figure 1.4 : Schéma d'une fibre optique: vue en section et profil d'indice	6
Figure 1.5 : Architecture globale d'un réseau télécom	9
Figure 1.6 : Architecture PON sens descendant	11
Figure 1.7 : Principe du multiplexage FDMA.....	12
Figure 1.8 : Principe du multiplexage TDMA.....	13
Figure 1.9 : Exemple de liaison WDM.....	14
Figure 1.10 : Principe du multiplexage CDMA	15
Figure 2.1 : Schéma de principe d'un codeur CDMA optique.....	18
Figure 2.2: Exemple de système OCDMA tout-optique	18
Figure 2.3 : OCDMA par encodage temporel	19
Figure 2.4 : OCDMA par codage spectral de phase	20
Figure 2.5 : OCDMA par encodage spectral d'amplitude	22
Figure 2.6 : Matrice de Code pour codage spectral-temporel	23
Figure 2.7 : Codage spectral-temporel	23
Figure 2.8 : Génération d'une séquence Walsh-Hadamard.....	27
Figure 2.9 : Générateur de séquences de Gold	29
Figure 2.10 : Encodage au moyen d'AWGs	35
Figure 2.11 : Encodage au moyen de FBG.....	36
Figure 3.1 : Logiciel Optisystem 7 au démarrage	38
Figure 3.2 : Bibliothèque d'Optisystem 7	38
Figure 3.3 : Chaîne OCDMA étudiée.....	39
Figure 3.4: Répartition des longueurs d'onde.....	40
Figure 3.5 : Bloc modélisé du code optique 1	41
Figure 3.6 : Spectre optique caractérisant le « Code 1 »	41
Figure 3.7 : Bloc de génération des données d'un utilisateur de la liaison optique	42
Figure 3.8 : Signal électrique correspondant aux données émises vers un utilisateur.....	42
Figure 3.9 : Schéma d'un émetteur codé « Code 1 ».....	43
Figure 3.10 : Données après codage à l'analyseur de Spectrum	43
Figure 3.11 : Récepteur pour une détection directe.....	44
Figure 3.12 : Schéma globale du système OCDMA avec détection directe.....	45
Figure 3.13: Schéma blocs d'un récepteur à détection équilibrée	46
Figure 3.14: Schéma globale du système OCDMA à détection équilibrée	47
Figure 3.16 : Diagrammes de l'œil obtenus pour différents débits et distances en détection directe	48
Figure 3.17: TEB en fonction du débit pour différentes distances détection directe.....	49
Figure 3.18 : Diagrammes de l'œil obtenus pour différents débits et distances en détection équilibrée	50
Figure 3.19: TEB en fonction du débit pour différentes distances en détection équilibrée.....	51

Liste des tableaux

Tableau 2-1 : Famille de code de longueur 7	24
Tableau 2-2 : Code m-séquence pour $p=4$ ($L=15$, $w=8$, $\mathcal{L}=4$, $\zeta=15$)	28
Tableau 2-3 : Caractéristiques des codes m-séquence	28
Tableau 2-4 : Exemple de 9 codes de Gold.....	29
Tableau 2-5: Code premiers pour $N=5$	32
Tableau 2-6: Code premiers pour $N=3$	32
Tableau 3-1 : Codage ZCC avec $w=4$ et $L=16$	39
Tableau 3-2: Codes optiques avec les diverses longueurs d'onde associées	40

Introduction générale

Depuis quelques années, nous avons constaté l'émergence de nouveaux services qui révolutionnent nos habitudes et exigent une grande largeur de bande, tels que la vidéo à la demande, la voix sur IP (Internet Protocole) ou la télévision haute définition. L'Etat béninois a fait beaucoup d'efforts concernant la promotion des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) grâce à des partenaires habituels comme la Banque mondiale ou EXIMBANK de la Chine. Dans sa vision de faire du Benin le quartier numérique de l'Afrique et l'inclusion sociale d'ici à 2021, l'Etat béninois a en effet œuvré à la réalisation d'infrastructures capables de supporter les services à larges bandes qui sont de véritables vecteurs de développement de l'économie numérique. Grâce à un certain nombre de projets structurants notamment le WARCIP (West African Regional Communication Infrastructure Program), notre pays dispose depuis 2015 d'un second câble sous-marin à fibre optique ACE (Africa Coast to Europe) qui utilise une technologie très avancée et ce, en renfort au câble sous-marin SAT3/WASC/SAFE (South Atlantic Télécommunications 3/West African Submarine Cable/South Africa Far East) déjà existant depuis 2002 pour un déploiement haut débit dans l'accès. Tout ceci vise une plus grande connectivité à internet.

L'accès à internet haut débit et aux services multimédia a pu jusqu'alors être déployé sur les réseaux d'accès à base de cuivre grâce à la technologie xDSL (Digital Subscriber Line). Cependant, l'enjeu de cette technologie en termes d'énergie et de bande passante est devenu un sujet problématique dès le début des années 2000 avec l'explosion d'Internet et des technologies numériques [1].

Pour convenablement bénéficier de services de l'époque moderne, il importe de planifier et introduire de nouvelles technologies dans les réseaux d'accès. Par conséquent, les compagnies de télécommunications ont entrepris de moderniser l'infrastructure réseau en remplaçant la vieille paire de cuivre par la fibre optique. En effet, la fibre optique est le support physique qui offre la plus grande largeur de bande actuellement, en plus de présenter une faible atténuation du signal [2].

Dans les réseaux optiques, le principal challenge se situe au niveau du réseau d'accès où en d'autres termes des derniers kilomètres vers l'abonné final. On se doit donc de faire un choix judicieux de la technique d'accès multiple afin d'optimiser les ressources disponibles en terme de bande passante.

L'utilisation des techniques d'accès multiple sur fibre est donc un enjeu important pour le partage des ressources entre des abonnés qui deviennent de plus en plus nombreux. Différentes méthodes utilisées en communications hertziennes peuvent être considérées pour l'optique notamment la répartition en fréquence (FDMA : Frequency Division Multiple Access), la répartition dans le temps (TDMA : Time Division Multiple Access), la répartition par code (CDMA : Code Division Multiple Access).

Le CDMA est une technique d'étalement de spectre utilisée dans un premier temps par les militaires grâce à sa résistance aux interférences et pour le niveau de sécurité qu'elle offre.

Contrairement aux techniques TDMA et FDMA, dans le CDMA "tout le monde parle en même temps et au même endroit mais chacun dans sa langue. Il permet à plusieurs utilisateurs d'un même réseau de partager le même canal de transmission sans gestion de temps ni de fréquence [3]. Cette technique apporte un accès multiple et un partage de ressource flexible, reconfigurable et sécurisé. De plus, contrairement aux techniques FDMA et TDMA [4] où la capacité en nombre d'utilisateurs est limitée, en CDMA, le nombre d'utilisateurs est déterminé par les propriétés des codes d'étalement utilisés. Le CDMA est donc une alternative aux techniques FDMA et TDMA pour augmenter la capacité de multiplexage et assurer l'accès aux ressources échangées.

L'objectif de ce travail de recherche consiste à proposer un modèle de réseau d'accès optique au moyen du CDMA. Il s'articulera autour des points ci-après :

- Généralités sur les réseaux d'accès optiques et techniques d'accès multiples
- Etude du CDMA pour les communications optiques
- Modèle OCDMA proposé: simulations et résultats

1. Chapitre 1: Généralités sur les réseaux d'accès optiques et techniques d'accès multiples.

1.1 Description d'une liaison optique

L'architecture d'une liaison optique, quel que soit le niveau du réseau auquel elle est destinée, est composée des mêmes éléments, à savoir : un émetteur, une fibre optique et un récepteur (Cf. Figure 1.1). Nous tenterons de décrire leurs rôles et fonctionnements. Nous débuterons par l'émetteur (laser ou LED : Light-Emitting Diode, modulateur,) puis nous poursuivrons par la description de la fibre optique. Enfin, nous terminerons en détaillant les blocs constituant le récepteur (photodiode, démodulateur, etc.).

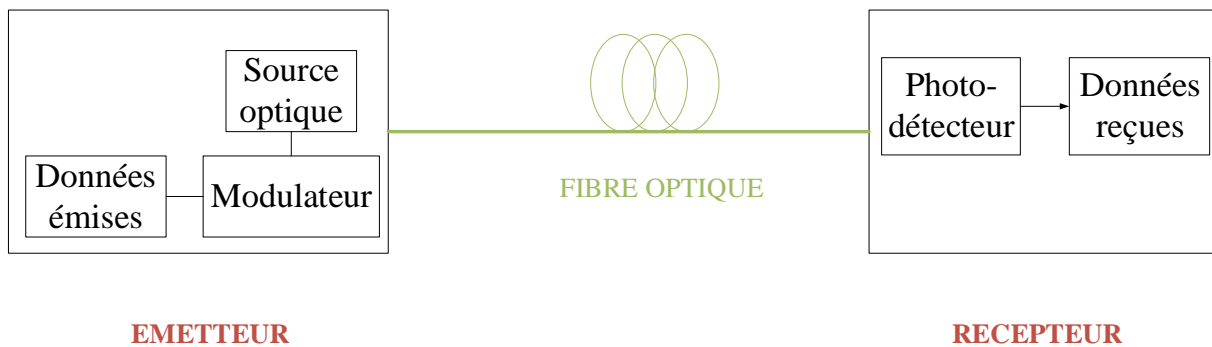


Figure 1.1 : Schéma d'une liaison optique

1.1.1 Emetteur

Dans un système de télécommunications optiques, les informations à transmettre sont inscrites sur la porteuse que constitue la lumière émise par une source optique par exemple (laser ou LED) grâce au principe de la modulation.

1.1.1.1 LED

La diode électroluminescente est utilisée surtout dans les systèmes de communications à fibres optiques multimodes, du fait de leurs faisceaux de sortie à large angle de divergence. Il y a deux configurations de LED : les diodes à émission de surface et les diodes à émission latérale.

La LED délivre une puissance optique de plusieurs centaines de microwatts et offre des débits inférieurs à 5 Mbits/s sur une fibre multimode. Elle est relativement bon marché et ne demande pas de circuit distinct pour la polarisation et la modulation [1].

1.1.1.2 Diodes laser

Les diodes laser produisent une puissance optique beaucoup plus importante que les LED avec un spectre plus fin. Ils peuvent donc coupler plus de puissance dans la fibre. La différence avec les LED est que les lasers disposent de deux miroirs pour obtenir plusieurs aller-retour dans le milieu en constituant ainsi une cavité optique. Une source laser est une source de lumière spatialement et temporellement cohérente (basée effet laser).

L'effet laser est un principe d'amplification cohérente de la lumière par émission stimulée d'où l'acronyme anglais LASER « *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* ».

1.1.1.3 Techniques de modulation

Dans les systèmes de transmissions par fibre optique, les informations à transmettre doivent être imprimées sur le signal à envoyer dans la fibre optique et nécessitent la conversion des données électriques en données optiques [4]. Pour cela il y a deux principales techniques de modulation optique : la modulation directe et la modulation externe.

1.1.1.3.1 Modulation directe

Dans cette technique, la modulation du courant qui traverse le laser entraîne directement la modulation en intensité (puissance optique rayonnée). Le générateur émet les données à transmettre à un débit précis. Le laser est connecté à un circuit de modulation de courant qui permet de moduler la puissance du laser (Cf. Figure 1.2)



Figure 1.2 : Schéma d'une liaison optique à modulation directe:

1.1.1.3.2 Modulation externe

Cette modulation est obtenue en modulant le faisceau lumineux à la sortie du laser opérant en courant continu dans le but de minimiser l'impact du chirp du laser prédominant en modulation directe. Ainsi, le signal optique qui est transmis dans la fibre optique est moins affecté par le chirp [1].

Dans les systèmes de communications optiques, plusieurs types de modulateurs sont utilisés. Les deux types de modulateurs optiques les plus utilisés sont : le modulateur à électro-absorption (MEA) et le modulateur de Mach-Zehnder (MZM).

➤ Modulateur électro-absorbant

Le principe de fonctionnement des modulateurs à électro-absorption repose sur les modifications du spectre d'absorption d'un matériau semi-conducteur soumis à un champ électrique. Leur particularité intéressante est qu'ils peuvent être facilement intégrés avec les diodes lasers pour créer des sources optiques compactes et à très large bande de modulation.

➤ Modulateur Mach-Zehnder

Ce modulateur a deux entrées, une entrée électrique et une autre optique. Il est basé sur le principe d'interférométrie. Un rayon de lumière incident est divisé en deux puis recombinaison après une courte distance (Cf. Figure 1.3). La recombinaison des champs se fait selon la différence de phase, si les deux bras de l'interféromètre sont de la même longueur, il n'y aura aucune différence de phase entre les deux champs et par conséquent ils vont se combiner de façon constructive [5].

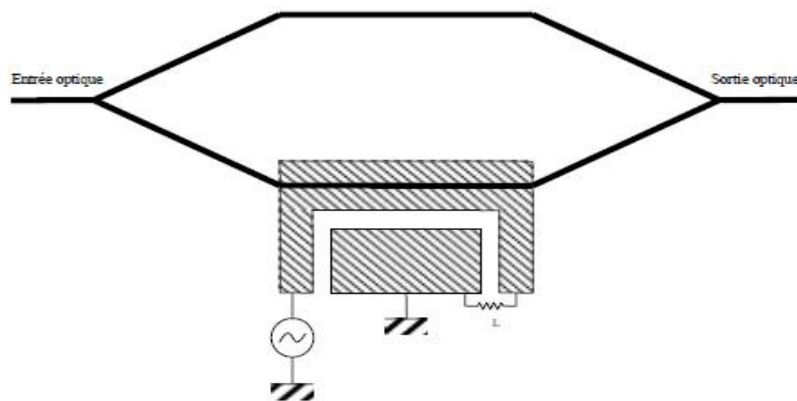


Figure 1.3: Schéma bloc d'un modulateur mach-zehnder [8]

1.1.2 Fibre optique

La fibre optique est constituée d'un fil en verre ou en plastique très fin qui possède la propriété de conduire la lumière. Elle sert dans les transmissions de données terrestres et océaniques et offre un débit d'information nettement supérieur à celui des câbles coaxiaux. Elle supporte un réseau « large bande » par lequel peuvent transiter différents types de services: la télévision, la téléphonie, la visio conférence ou les données informatiques.

La fibre optique est composée de trois parties principales comme illustré à la Figure 1.4 [6]:

- le cœur, composé de silice, est la partie où a lieu la réfraction qui permet le transfert de la lumière et des informations ;
- la gaine emprisonne la lumière dans le cœur en la réfléchissant pratiquement sans perte;
- le revêtement de protection, généralement constitué de plastique, peut réunir plusieurs fibres. Il a pour fonction de protéger les autres parties de la fibre optique et d'assurer sa flexibilité. Il existe deux types de fibre optique : multimode et monomode.

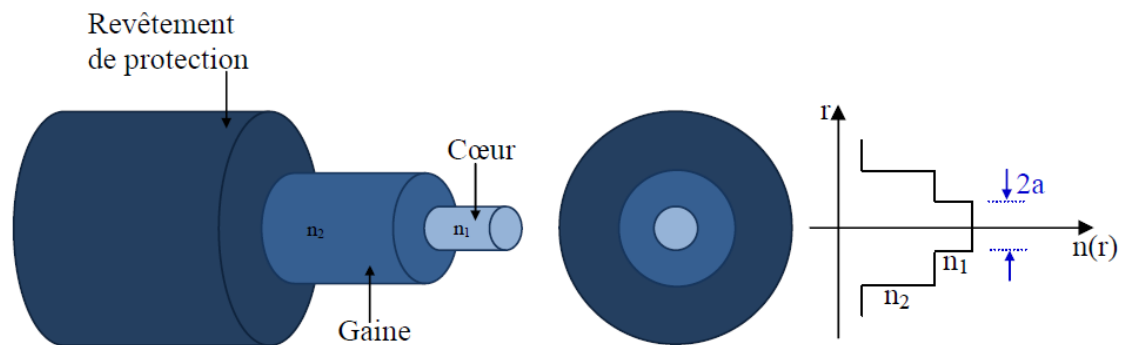


Figure 1.4 : Schéma d'une fibre optique: vue en section et profil d'indice [6]

➤ Fibres multimodes

Les fibres multimodes sont les premiers types de fibres optiques qui ont été fabriquées. Le cœur a une taille qui varie de 50 à 200 μm . Ce type de fibre présente certains inconvénients tels que l'atténuation des signaux plus marquée ou encore une vitesse de propagation des signaux plus faible. Elles sont aujourd'hui utilisées sur de courtes distances. Il existe deux types de fibres multimodes :

- La fibre à saut d'indice;

- La fibre à gradient d'indice.

Leur différence réside dans la variation graduelle de l'indice de réfraction au sein du cœur de la fibre à saut d'indice. La fibre à saut d'indice présente un diamètre de cœur deux à quatre fois plus grand que celui des fibres à gradient d'indice.

➤ **Fibres monomodes**

Ce type de fibre optique a un diamètre de cœur beaucoup plus petit, (10 μm) comparé à ceux des fibres optiques multimodes. Les fibres monomodes, comme le nom l'indique, ne peuvent supporter qu'un seul mode de propagation de la lumière.

À cause de leurs très petits diamètres de cœur, le transport de la lumière s'effectue sans réflexion et de manière quasi-rectiligne. L'avantage de ce type de fibre est qu'il produit peu de dispersion, ce qui fait qu'une impulsion lumineuse polychromatique transmise dans la fibre n'est alors que très peu déformée. L'inconvénient de ce type de fibres est qu'il est relativement coûteux.

1.1.3 Récepteur

Le récepteur est chargé de convertir au mieux le signal optique en signal électrique en lui apportant le minimum de dégradation. Ce module est composé de plusieurs blocs fonctionnels:

- le premier bloc est composé du photodétecteur. Il peut être accompagné d'un préamplificateur, qui a pour but de rendre le photo-courant généré suffisamment fort malgré le faible signal optique reçu ou la faible sensibilité du photodétecteur.
- le second bloc est composé d'un démodulateur pour récupérer les données transmises.

1.1.3.1 Photo diode PN/PIN

Une Photodiode PN est une jonction PN (Positif Négatif) polarisée en inverse. Lorsque elle est exposée à la lumière, les électrons minoritaires de P absorbent les photons lumineux et passent vers N où ils seront extraits à l'extérieur par le champ électrique du générateur, créant ainsi un faible courant électrique. Quant à la Photodiode PIN (Positif Intrinsèque Négatif) c'est une jonction PN intercalée par une couche intrinsèque I, dans le but de diminuer le dopage de N pour augmenter davantage le courant électrique généré par la jonction.

1.1.3.2 Photodiode APD

La Photodiode à effet d'avalanche (APD : Avalanche PhotoDiode) est une jonction PN polarisée en inverse, de manière à ce que, la tension de polarisation soit proche de celle de claquage de la jonction. Ceci crée ainsi un champ électrique important dans la zone de charge, qui accélère les électrons passant par la zone de recombinaison, créant à leur tour d'autres électrons dans la région N.

1.2 Réseaux de télécommunications optiques

La fibre optique est un support privilégié pour les télécommunications à haut débit. Comparée à d'autres supports de câbles conducteurs, elle présente de nombreux avantages en performance de transmission tels qu'une très faible atténuation, une très grande bande passante et des possibilités de multiplexage qui permettent d'atteindre de très hauts débits sur une très grande portée. Des avantages de mise en œuvre sont aussi à relever : sa toute petite taille (quelques μm), sa grande souplesse, son faible poids, sa sécurité électrique et électromagnétique (isolation). Ses atouts en font un support privilégié pour le câblage en informatique, en aéronautique et diverses applications industrielles mais surtout pour les réseaux de télécommunications à très haut débit.

Ce support est largement utilisé par les réseaux très longue distance (sous-marins, réseau cœur) et apparaît depuis quelques années dans le réseau d'accès optique pour permettre aux abonnés "haut débit" de profiter de performances plus élevées que d'autres supports filaires tels que le cuivre ou le coaxial.

Dans la structure hiérarchique des réseaux publics de télécommunications, on distingue différentes portions du réseau correspondant à différents niveaux de cette hiérarchie (Cf. Figure 1.5). Une première distinction est opérée entre le réseau d'accès et le réseau de transport.

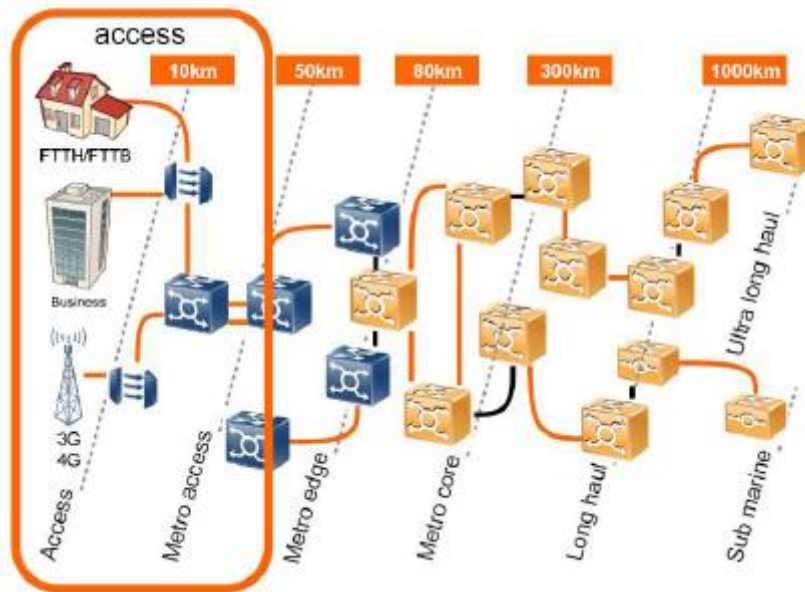


Figure 1.5 : Architecture globale d'un réseau télécom [7]

1.2.1 Réseau de transport

Les commutateurs de télécommunications reliés entre eux constituent le premier niveau du réseau de transport. On peut y distinguer principalement au niveau national, des réseaux maillés formés de plusieurs sous-réseaux ayant une structure en boucle. Au-delà des réseaux nationaux, on trouve des réseaux s'étendant sur plusieurs milliers de kilomètres à l'échelle des pays plus grands ou de continents. On parle alors de réseaux continentaux ou (très) longues distances ou encore de réseaux sous-marins.

Le réseau de transport permet de réaliser des transmissions de données à des débits atteignant des centaines ou milliers de Gigabit/s aujourd'hui, en partie grâce au multiplexage en longueur d'onde qui existe depuis une vingtaine d'années.

1.2.2 Réseau d'accès optique

Encore appelé réseau local optique, il est encore souvent constitué d'une partie en fibre optique suivie selon l'architecture, d'une partie en conducteur métallique qui va jusqu'au terminal de l'abonné. Selon la localisation de la terminaison de réseau optique, différentes configurations sont envisageables :

- FTTH : Fiber To The Home (Fibre jusqu'au domicile),
- FTTN : Fiber To The Neighbourhood (Fibre jusqu'au quartier) ou Fiber To The Node (Fibre jusqu'au répartiteur),
- FTTC : Fiber To The Curb (Fibre jusqu'au trottoir),
- FTTS : Fiber To The Street (Fibre jusqu'à la rue - bâtiment),

- FTTB : Fiber To The Building (Fibre jusqu'au bâtiment),
- FTTA: Fiber To The Antenna (Fibre jusqu'à l'Antenne)
- FTTCab : Fiber To The Cab (Fibre jusqu'au sous-répartiteur),
- FTTP : Fiber To The Premises (Fibre jusqu'aux locaux - entreprises),
- FTTH : Fiber To The Home (Fibre jusqu'au domicile),
- FTTE : Fiber to The Entreprise (Fibre pour les entreprises),
- FTTO : Fibre to The office (Fibre jusqu'au bureau - entreprises),
- FTTLA : Fiber To The Last Amplifier (Fibre jusqu'au dernier amplificateur) consiste à amener la fibre optique au plus près de l'utilisateur, afin d'augmenter la qualité de service (en particulier le débit) dont celui-ci pourra bénéficier.

1.2.2.1 Réseaux optiques AON/PON

Il existe globalement deux catégories de réseaux à base de fibre optique à savoir : les réseaux actifs et les réseaux passifs. Le réseau est dit actif lorsqu'entre le central office (CO) et l'abonné nous avons un composant (amplificateur, répéteur, etc.) qui a besoin d'énergie électrique pour son fonctionnement. Dans ce cas, on parle de réseau AON (Active Optical Network). S'il n'y a aucun composant actif placé entre le CO et l'abonné, le réseau est dit PON (Passive Optical Network ou Réseau Optique passif) [8].

Un réseau optique PON est un réseau dont le câblage entre le prestataire et le consommateur est uniquement réalisé à base d'équipements optiques passifs. En effet cette approche évite le besoin de courant électrique entre le nœud central de distribution et l'abonné, et réduit les coûts de matériel, d'installation, d'opération et d'entretien de réseau. Un PON est un réseau point to multipoint (P2MP) dans lequel le médium est la fibre optique. Les PON ont attiré l'attention par leur potentiel qui entraîne une réduction du coût de distribution des signaux par l'intermédiaire des fibres optiques. Ils divisent le signal d'un émetteur central Optical Line Terminal (OLT), sur plusieurs fibres sortantes n'utilisant que des composants passifs (coupleur passif ou splitter en Anglais), chacune des fibres est liée à un récepteur spécifique pour un client spécifique (Cf. Figure 1.6). Les différents clients renvoient des signaux au point central de distribution, ainsi les utilisateurs ou « end-users » partagent toute la capacité du système de transmission.

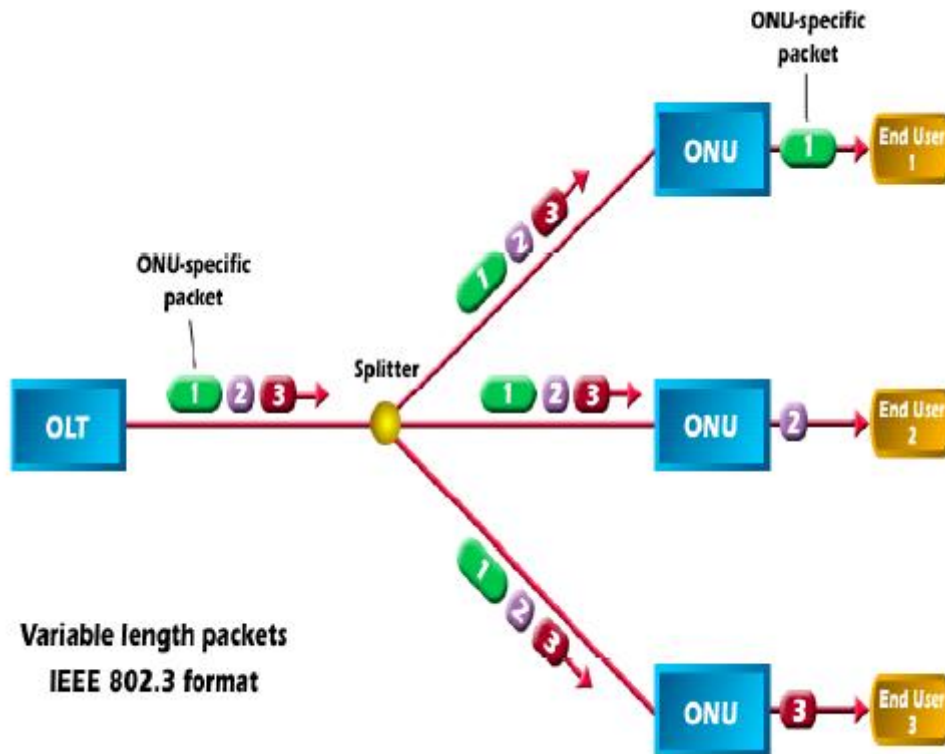


Figure 1.6 : Architecture PON sens descendant [7]

La Figure 1.6 montre que l'OLT est localisé dans le nœud central et transmet les données dans le sens descendant (nœud central vers utilisateur) vers les différentes unités optiques du réseau (Optical Networking Unit : ONU). Chaque paquet de données contient un paquet en-tête qui indique l'ONU destinataire.

1.3 Techniques d'accès multiple

La bande passante des fibres optiques permet théoriquement l'établissement de systèmes de transmission à débits très élevés. Cependant, le traitement électronique des données, à l'émission et à la réception, impose des limitations en termes de débit, dues aux composants électroniques dont la bande passante reste bien en dessous de celle permise par l'optique. L'augmentation du nombre d'utilisateurs et de la quantité d'informations échangées dans les réseaux de communication a poussé au développement de solutions pour augmenter la capacité des réseaux, et profiter de l'avantage en bande passante qu'offre la fibre optique.

Des techniques de multiplexage ont ainsi été développées, chacune permettant de transmettre N signaux de débit D sur un même canal : ce qui équivaut à la transmission d'un signal global de débit $N \cdot D$.

Ces techniques de multiplexage doivent néanmoins respecter la condition nécessaire de pouvoir restituer les données propres à chaque utilisateur après leur transmission sans créer d'interférences entre les données des différents utilisateurs. Pour cela, le signal physique représentant les données de chaque utilisateur se distingue des autres signaux par sa bande spectrale, sa propre fenêtre temporelle ou encore son propre code. Ceci permet alors de les séparer finalement avec des techniques de démultiplexage appropriées.

Les recherches menées depuis plusieurs années permettent de distinguer essentiellement les méthodes d'accès multiples : TDMA, FDMA, CDMA et WDM [9].

1.3.1 Technique FDMA

La technique FDMA (Frequency Division Multiple Access) est la plus ancienne et était la seule employée lorsque le téléphone était purement analogique. Cette méthode consiste à allouer une ou des bandes de fréquences à chaque utilisateur (Cf. Figure 1.7). L'ensemble est juxtaposé et transmis sur un même canal de transmission.

A la réception, un filtre sélectif accordé à la bande de fréquences de l'utilisateur désiré permet de récupérer les données.

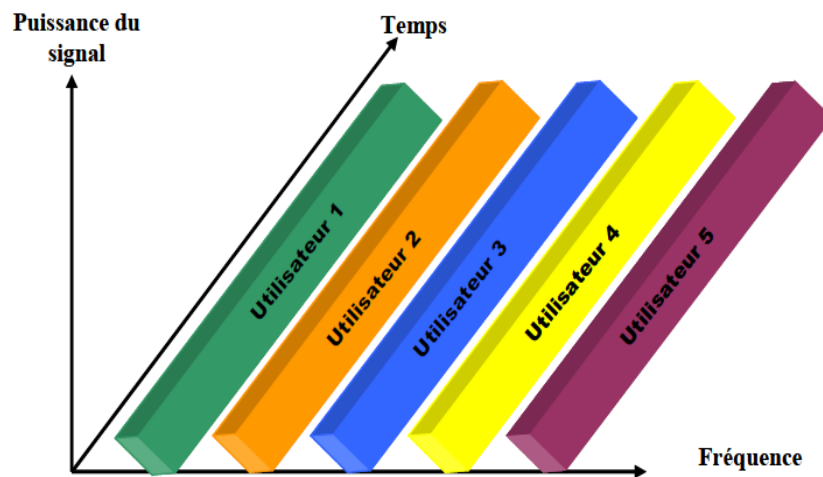


Figure 1.7 : Principe du multiplexage FDMA [6]

1.3.2 Technique TDMA

Le TDMA est basée sur la répartition des ressources en temps. Les utilisateurs disposent d'une même bande passante et émettent les données dans différents intervalles de temps ou « time slot » qui leur sont alloués (Cf. Figure 1.8). Le récepteur effectue l'opération de démultiplexage pour récupérer les données. Une synchronisation temporelle est nécessaire pour ce type de

multiplexage. Le TDMA permet de regrouper plusieurs canaux de communication à bas débit en un seul canal à un débit N fois plus élevé, N étant le nombre d'utilisateurs dans le système.

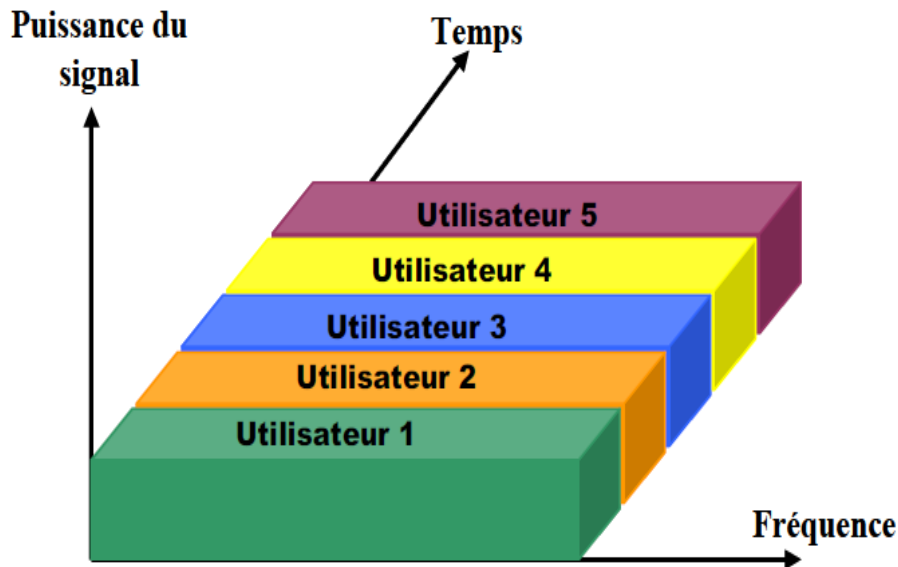


Figure 1.8 : Principe du multiplexage TDMA [6]

1.3.3 Technique WDMA

Le WDMA permet de multiplexer plusieurs signaux modulant des longueurs d'onde différentes dans une seule fibre optique. Le mélange est fait à l'entrée par un multiplexeur (MUX) et à la sortie la séparation est faite au moyen d'un démultiplexeur (DEMUX). Le WDMA permet ainsi l'utilisation optimale de la bande passante optique. Les données électriques de chaque utilisateur sont appliquées à l'entrée de modulateurs optiques émettant des longueurs d'onde différentes. Les signaux en sortie des modulateurs sont multiplexés et émis sur la fibre. A la réception, le signal optique reçu est démultiplexé puis appliqué à l'entrée d'un filtre optique qui permet d'extraire le signal à la longueur d'onde correspondant au destinataire. Une photodiode permet d'effectuer la conversion optique-électrique [9].

La bande de fréquence la plus utilisée est la bande C (1530 - 1565 nm), Afin d'augmenter la capacité totale d'un système WDM, il est possible de jouer sur le débit transporté par chaque canal ou sur le nombre de canaux, voire les deux en même temps. La Figure 1.9 présente un exemple de liaison WDM.

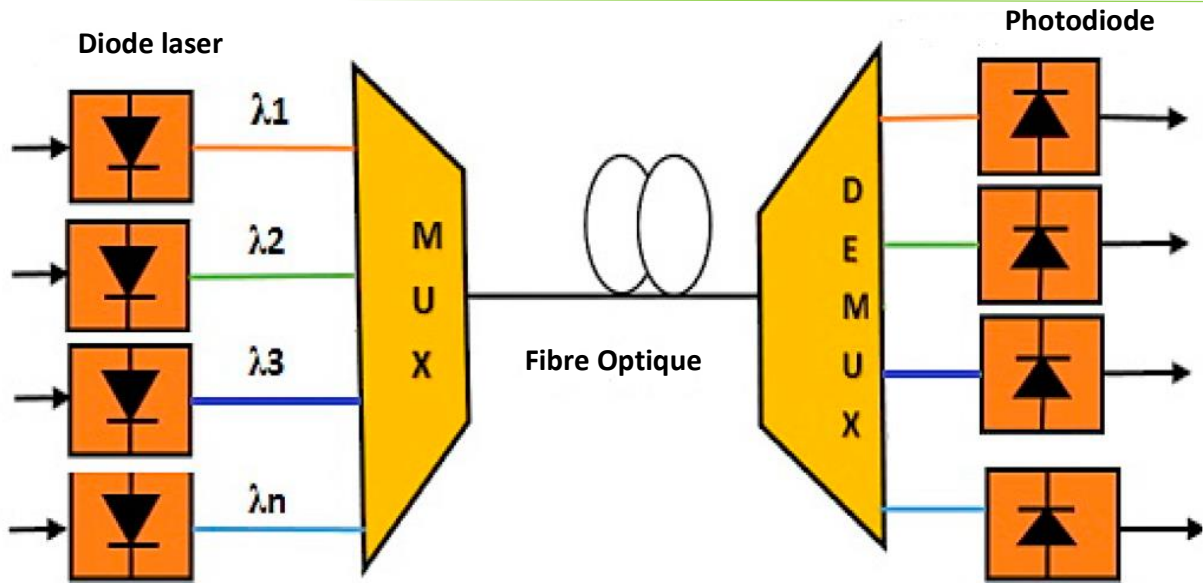


Figure 1.9 : Exemple de liaison WDM

1.3.4 Technique CDMA

Cette technique permet la transmission des données des utilisateurs sur la même bande de fréquence et en même temps. Tous les utilisateurs ont accès simultanément à la totalité des bandes de fréquence et du temps. Ils sont distingués à la réception par des codes distincts associés à chacun d'entre eux (Cf. Figure 1.10). Ceci permet d'éviter les interférences d'accès multiple, à condition que les codes utilisés soient orthogonaux.

Cette technique permet de multiplexer des informations sur un seul support de communication de manière synchrone ou asynchrone.

Le débit après codage est celui des données utilisateurs divisé par la longueur de la séquence de code. Le multiplexage par répartition de code (CDMA) permet d'étaler de manière spectrale le signal transmis sur une bande N fois plus large que celle du signal initial, N étant la longueur de la séquence de code.

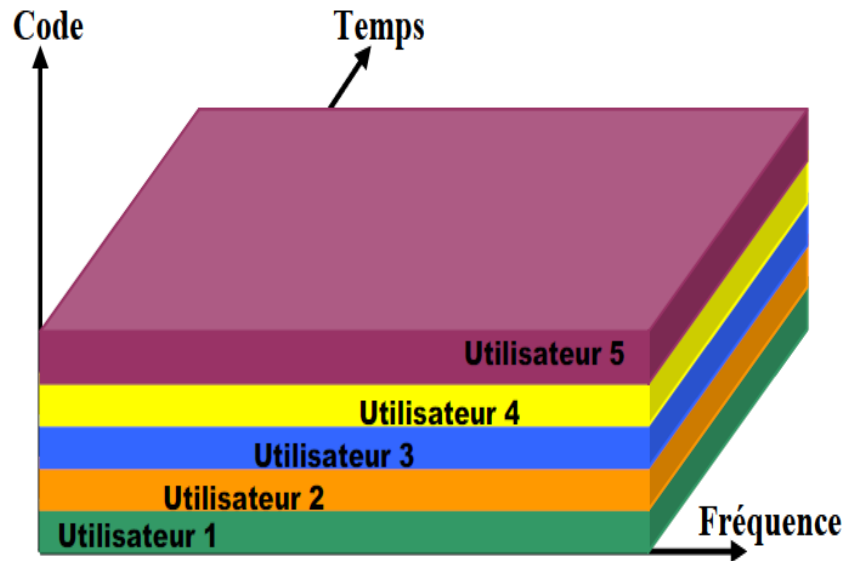


Figure 1.10 : Principe du multiplexage CDMA [6]

Conclusion

Dans ce premier chapitre nous avons présentés les généralités sur les réseaux de télécommunications optiques et en particulier les réseaux d'accès optiques. Nous nous sommes également intéressés aux différentes techniques d'accès multiple régissant le partage de ressources dans les réseaux d'accès sur fibre notamment le TDMA, FDMA, CDMA et WDMA. Le chapitre suivant nous permettra d'entrer dans le vif du sujet et d'aller en profondeur dans la compréhension du CDMA optique sur fibre.

2. Chapitre 2: Etude du CDMA pour les communications optiques

2.1 CDMA : des radiofréquences à l'optique

Le CDMA optique est basé sur les concepts de base du CDMA radiofréquence. Les différents utilisateurs partagent le même canal optique et chacun dans le réseau dispose de sa propre séquence d'étalement. L'implémentation du CDMA optique est différente du CDMA radio. Cette différence se situe principalement au niveau du milieu de propagation. Pour appliquer le CDMA aux communications optiques, certains éléments doivent être adaptés aux contraintes du canal de transmission optique. Les effets qui perturbent le canal optique (dispersion chromatique et effets non-linéaires) sont différents de ceux du canal radio (atténuation et multi-trajets).

2.1.1 Pourquoi le CDMA optique ?

L'application du CDMA aux systèmes de télécommunications optiques a pour but de surmonter les limites des systèmes d'accès TDMA et FDMA en termes de capacité de multiplexage, de débit et de flexibilité. L'utilisation des convertisseurs optoélectriques est un verrou technologique à lever lors de l'utilisation de la technique CDMA électrique appliquée aux réseaux d'accès optique. Une manière de surmonter cette limitation et de minimiser le coût élevé d'implémentation : celle-ci consiste à réaliser le codage et le décodage dans le domaine optique en utilisant que des composants optiques. Il s'agit là, des systèmes CDMA "tout-optique" ou OCDMA. La réalisation de tels systèmes OCDMA pour les réseaux d'accès optique a vu le jour grâce au développement des composants optiques passifs [9]. L'application de la technique CDMA aux réseaux d'accès optiques haut débit présente de nombreux avantages tels que :

- usage flexible et équitable de la bande passante, des débits de transmission variables allant jusqu'au Gb/s ;
- traitement "tout-optique" : le codage et le décodage sont réalisés dans le domaine optique sans faire appel à des convertisseurs optoélectriques grâce à des composants optiques passifs faciles à intégrer dans les réseaux PON ;
- fonctionnement asynchrone du CDMA optique ;

- augmentation de la capacité de multiplexage en fonction des systèmes OCDMA (Optical Code Division Multiple Access) considérés;
- distribution simultanée de différents services "triple play" (données, voix et vidéo) ;
- réseau optique à coût réduit grâce à l'utilisation de composants passifs ;
- possibilité de l'encodage de services : différents services peuvent être multiplexés sur la même fibre optique, l'utilisateur récupérera le service qu'il a choisi.

2.1.3 Sécurité et confidentialité

Dans un système OCDMA, chaque utilisateur se voit attribuer une séquence de code propre. A la réception, le même code doit être utilisé pour le décodage des informations relatives à l'utilisateur concerné. Sans aucune information préalable sur le code utilisé, il est très difficile à un "pirate" de démoduler correctement le signal OCDMA en particulier si d'autres utilisateurs partagent le même réseau. La première mesure de sécurité et de confidentialité offerte par certains systèmes OCDMA réside dans la possibilité de générer un nombre important de séquences de codes permettant une capacité de multiplexage importante. On définit quatre (04) techniques OCDMA [14]:

- Direct Sequence (DS) OCDMA ou OCDMA temporel : le code est unipolaire. Il est unidimensionnel et temporel ;
- Frequency Encoding (FE) OCDMA ou Spectral Amplitude Coding (SAC) OCDMA : le code est unipolaire. Il est unidimensionnel et fréquentiel (modulation en tout ou rien du spectre des bits d'informations) ;
- Spectral Phase Encoding (SPE) CDMA ou OCDMA par encodage spectrale de phase : le code est bipolaire. Il est unidimensionnel et de façon très sélective. Certaines composantes spectrales des bits d'information ne sont pas transmises suivant les sauts de phase du code à implémenter ;
- Fast Frequency Hopping (FFH) OCDMA ou encodage spectral-temporel: le code est unipolaire. Il est bidimensionnel et à chaque chip, on associe un intervalle temporel et une longueur d'onde.

Un codeur et un décodeur OCDMA peuvent être modélisés comme un système linéaire invariant dans le temps. Par exemple (Cf. Figure 2.1), lorsqu'une impulsion $S_i(t)$ est injectée à l'entrée du codeur, le signal codé $S_o(t)$ (signal OCDMA) résulte du produit de convolution de la fonction de transfert du codeur $h(t)$ avec l'impulsion d'entrée [9].

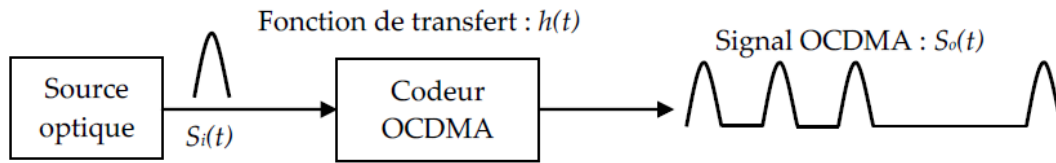


Figure 2.1 : Schéma de principe d'un codeur CDMA optique

2.1.4 Système OCDMA tout-optique

La Figure 2.2 montre un exemple de schéma synoptique d'un réseau CDMA "tout-optique". Il est constitué de N paires d'émetteur-récepteur. Chaque émetteur est constitué d'une source optique modulée par de l'information à transmettre. Ensuite un codage optique approprié à chaque émetteur y est appliqué. Les différents signaux résultant des émetteurs sont superposés et le signal CDMA induit propagé dans le réseau. A la réception, le signal CDMA reçu va être diffusé vers tous les récepteurs. Indépendamment du type de détection utilisé, chaque récepteur doit posséder la séquence de code utilisée lors du codage afin de pouvoir reconstituer l'information émise.

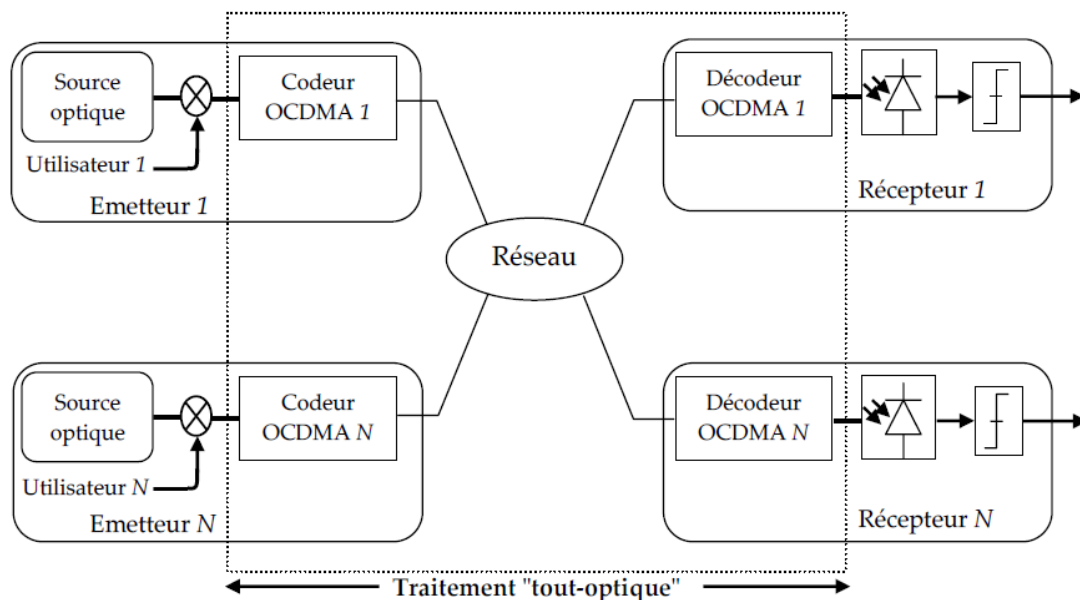


Figure 2.2 : Exemple de système OCDMA tout-optique [10]

2.2 Typologie des systèmes OCDMA

En OCDMA, le code peut être implémenté de différentes manières. Par exemple, il peut être à la fois fréquentiel, temporel, spatial et basé sur les polarisations ou la phase. Il existe également un choix à faire en ce qui concerne la source optique à utiliser. Les principales sources utilisées en OCDMA sont les sources incohérentes à large bande, les lasers à impulsions courtes ou encore des sources lasers continues multi longueurs d'onde. Dans cette section, nous présentons brièvement les méthodes qui suscitent le plus d'intérêt dans la littérature par leurs possibilités d'implémentation et par leurs efficacités [11].

2.2.1 OCDMA par encodage temporel

L'OCDMA par encodage temporel (DS) consiste à représenter un bit en plusieurs impulsions optiques courtes dans le temps représentant le code (Cf. Figure 2.3). Les codeurs optiques temporels sont réalisés avec des longueurs de fibre de longueur variable ou lignes à retard temporel. L'impulsion optique est divisée en utilisant un coupleur optique comportant N branches. Chacune de ces branches se voit imposer un délai particulier et un autre coupleur disposé à l'inverse du précédent recombine les impulsions retardées. Pour des taux de transmission élevés, la génération de plusieurs impulsions par bit ne peut se faire dans le domaine électrique avec un niveau de complexité et un coût raisonnables : d'où l'approche encodage tout-optique. Le décodeur suit aussi la même organisation hiérarchique que l'encodeur. Les délais imposés à l'encodeur sont donc compensés au niveau du décodeur. On note que de tels encodeurs et décodeurs peuvent être intégrés sur des circuits photoniques planaires dans la silice [12].

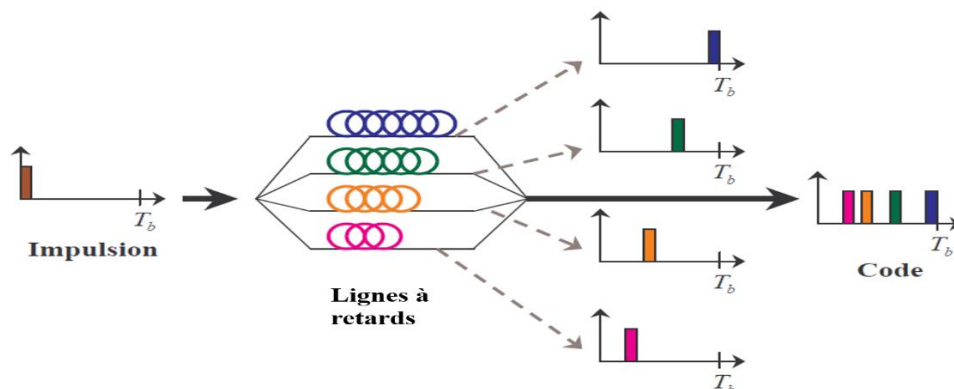


Figure 2.3 : OCDMA par encodage temporel

Des codes particulièrement adaptés au DS-OCDMA sont appelés codes optiques orthogonaux (OOC) en raison de leurs propriétés d'autocorrélation et de corrélation croisée.

Les codes OOC sont dits orthogonaux lorsque la valeur maximale de la corrélation croisée et des lobes d'autocorrélation est bornée, et ce, entre tous les codes de la famille.

La méthode d'encodage par réseaux de Bragg inscrits dans une fibre optique (FBG) est l'une des plus populaires en DS-OCDMA [12]. Les réseaux de Bragg utilisés pour ce type d'OCDMA prennent généralement l'appellation dans la littérature de réseaux de Bragg super structurés. Ils sont typiquement inscrits sur plusieurs centimètres dans la fibre et comportent des changements d'amplitude ou de phase. L'amplitude de la modulation d'indice de ces réseaux est généralement faible, de sorte que l'impulsion ne soit pas complètement réfléchiée au début du dit réseau. Elle se propage plutôt à travers le réseau en étant partiellement réfléchiée à différentes positions selon les variations d'amplitude et de phase qui constituent le code DS-OCDMA.

2.2.2 OCDMA par encodage spectral de phase

Cette méthode utilise des sources cohérentes à impulsions courtes. Il s'agit d'OCDMA par encodage spectral de phase (SPE). Les sources MLL (Mode Lock Laser) émettent des impulsions de manière cyclique. Le laser à verrouillage de mode produit à sa sortie, un flux d'impulsions optiques courtes dans le domaine temporel. Le flux d'impulsions laser à verrouillage de mode est ensuite modulé avec les données de l'utilisateur. Ensuite le signal modulé est envoyé dans un codeur de phase spectrale qui applique un code de phase OCDMA particulier au spectre. Les codes de phase pourraient être de simples codes binaires tels que 0 ou π des ou d'autres types de codes plus avancés.

Pour l'encodage SPE, les composantes spectrales sont encodées avec des phases particulières. Au décodage, les phases appropriées sont appliquées (Cf. Figure 2.4).

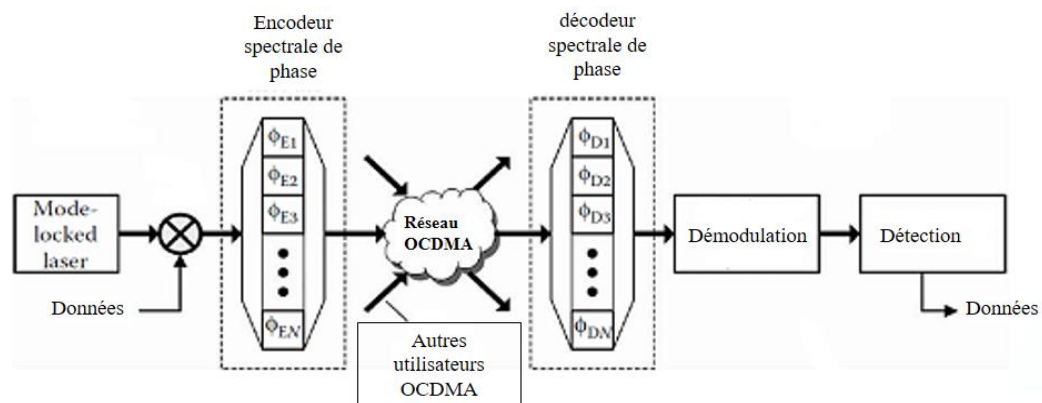


Figure 2.4 : OCDMA par codage spectral de phase [13]

Différentes solutions existent pour implémenter ce type d'encodage. Les composantes fréquentielles sont séparées spatialement par un réseau de diffraction, puis leurs phases sont encodées. En utilisant cette technique d'encodage, on parvient à transmettre quatre usagers à 2.5 Gb/s, chacun avec un code comportant 31 cases fréquentielles [13]. Tout comme en DS-OCDMA, un seuil optique non-linéaire peut être utilisé en SPE-OCDMA afin de tenter d'isoler l'impulsion d'autocorrélation, le composant optique hautement non-linéaire utilisé pour y arriver est fait de Lithium-Niobate. Le signal est aussi étalé spatialement pour réaliser l'encodage et quatre données utilisateurs à 2.5 Gb/s sont transmis et entièrement recouverts. La largeur de bande nécessaire est de 80GHz, pour une efficacité spectrale de 0.125 bit/s/Hz. Plutôt que d'utiliser un seuil optique non-linéaire, on utilise un fenêtrage temporel tout-optique préalablement appelé TOAD (*Terahertz Optical Asymmetric Demultiplexer*). Cette technique consiste en un élément optique non-linéaire, tel un amplificateur optique à semi-conducteur, placé asymétriquement dans une courte boucle optique. Un train d'impulsions sert de signal de contrôle et permet d'isoler les signaux périodiques sur une mince fenêtre temporelle.

2.2.3 OCDMA par encodage spectral d'amplitude

Une autre manière de réaliser un système OCDMA est d'utiliser un encodage spectral d'amplitude (SAC). Dans ce type d'encodage, chaque utilisateur émet un ensemble de plusieurs longueurs d'ondes obtenues par exemple par une batterie de filtres placés en sortie d'une source large bande (Cf. Figure 2.5). En réception il faut disposer d'un filtre identique. Avec cette méthode, chaque usager se voit assigner une partie du spectre optique comme code. Les usagers ont généralement un nombre fixe de longueurs d'onde en commun. La combinaison d'un décodeur identique à l'encodeur et d'un décodeur complémentaire permet théoriquement d'obtenir des codes parfaitement orthogonaux par l'utilisation d'une détection équilibrée. Cependant, plus le nombre d'utilisateurs est important, plus le nombre de longueurs d'ondes requis est important et plus le système d'encodage devient complexe, et ce d'autant plus que le poids du code augmente. Afin de réaliser l'encodage spectral, des sources larges en spectre telles des sources incohérentes ou lasers multi-longueurs d'onde sont utilisées.

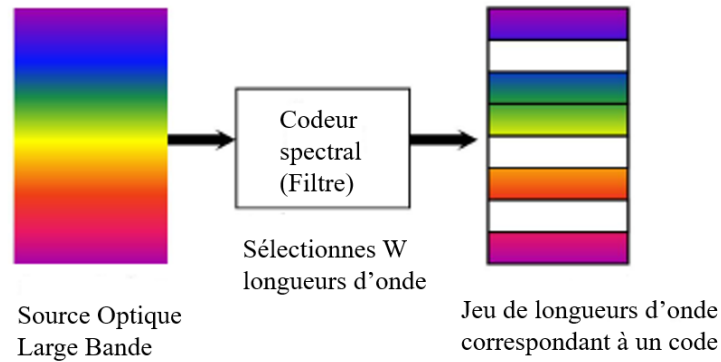


Figure 2.5 : OCDMA par encodage spectral d'amplitude

Différentes méthodes permettent de réaliser l'encodage spectral en amplitude, l'une d'elle propose d'utiliser un réseau de diffraction dans l'air libre afin de séparer spatialement les composantes spectrales et ainsi bloquer les fréquences non désirées du code. Une autre méthode est l'utilisation des interféromètres Mach-Zehnder et des lasers Fabry-Pérot afin de découper le spectre. Parmi les autres suggestions de systèmes SAC-OCDMA, on utilise l'encodage à base de multiplexeurs et de démultiplexeurs en longueur d'onde ou celui à base de réseaux de Bragg comme codeurs et décodeurs : ces composants vont permettre d'assigner un code unique à chaque utilisateur.

Le bruit d'intensité intrinsèque aux sources incohérentes généralement utilisées en SAC-OCDMA constitue un problème majeur qui limite le taux de transmission atteignables ainsi que le nombre d'utilisateurs [14], [21].

2.2.4 OCDMA par encodage spectral-temporel

Les systèmes OCDMA par encodage spectral et temporel utilisent un codage en deux dimensions et permettent d'augmenter grandement la cardinalité des codes. Dans le processus d'encodage, une impulsion temporelle à large bande optique est divisée en chips temporellement distincts et de longueur d'onde spécifique. On peut donc exprimer un code particulier en une matrice ayant comme dimensions le temps et le spectre (Cf. Figure 2.6). Ceci permet de diminuer la longueur du code sans en diminuer la cardinalité. Un système OCDMA par encodage spectral-temporel effectue à l'émission un codage par étalement à la fois en temporel et en longueur d'onde (Cf. Figure 2.7). Une approche qui est appelée codage 2D par opposition au codage spectral ou temporel qui est un codage 1D. Au récepteur, le décodeur correspondant effectue également un décodage à la fois en temporel et en longueur d'onde

Afin de réaliser l'encodage de manière passive et tout optique, on fait usage d'encodeurs qui sont des Fiber Bragg Gratings (FBG) inscrits en série dans la fibre et qui réfléchissent chacun une longueur d'onde particulière. Lorsqu'une impulsion de grande largeur de bande entre dans l'encodeur, ses longueurs d'onde sont réfléchies avec différents délais selon les positions des FBGs correspondants [15], [20].

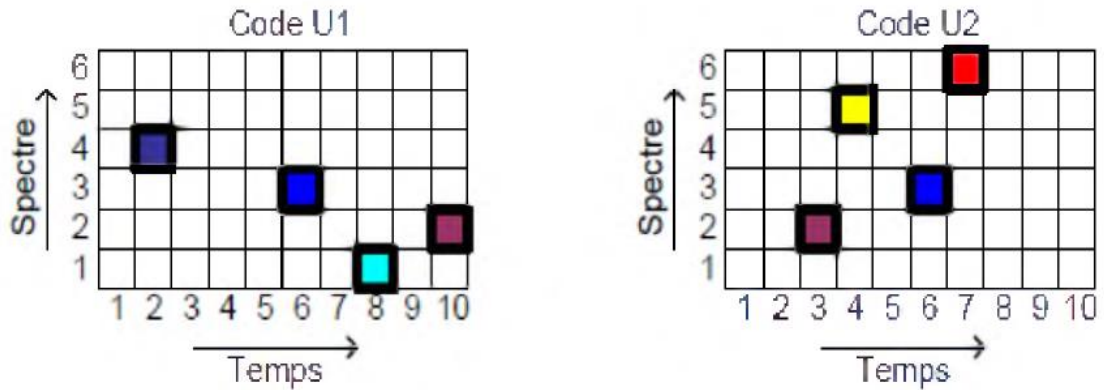


Figure 2.6 : Matrice de Code pour codage spectral-temporel

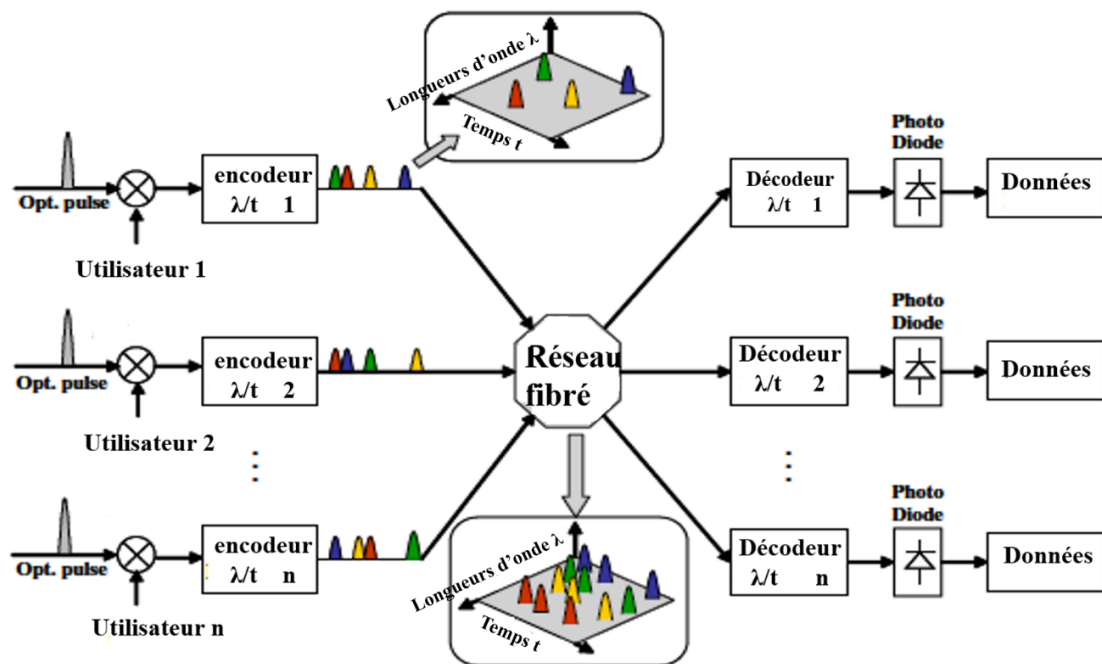


Figure 2.7 : Codage spectral-temporel

2.3 Codage SAC-OCDMA

2.3.1 Paramètres des codes SAC-OCDMA

Les différents paramètres nécessaires pour définir un code en systèmes SAC-OCDMA sont :

- la longueur du code (L).
- le poids du code (w).
- la corrélation croisée (\mathcal{L}).
- la cardinalité (ζ).

Nous ferons souvent référence à une famille de codes en la désignant par son nom et l'ensemble (L, w, \mathcal{L}) ou de manière plus précise (L, w, \mathcal{L}, ζ).

La longueur du code est notée L n'est rien d'autre que le nombre de « 1 » et de « 0 » qui figurent dans le code. Pour la famille de codes du Tableau 2-1, la longueur L est 7. Nous ne considérons que les familles de codes ayant une longueur constante.

Tableau 2-1 : Famille de code de longueur 7

	1	2	3	4	5	6	7
Code 1	0	1	0	1	0	1	0
Code 2	1	0	0	1	1	0	0
Code 3	0	0	1	1	0	0	1
Code 4	1	1	1	0	0	0	0
Code 5	0	1	0	0	1	0	1
Code 6	1	0	0	0	0	1	1
Code 7	0	0	1	0	1	1	0

Le poids du code est simplement le nombre de « 1 » contenu dans le code. Dans l'exemple du tableau 1 w vaut 3 (constant pour n'importe quel code).

Quant à la corrélation croisée désignée par \mathcal{L} , c'est la somme du résultat d'une opération logique AND entre deux codes différents pris parmi une famille de codes. De façon plus explicite, on peut dire que c'est le nombre de « 1 » en commun à la même position entre deux codes différents. Une définition plus mathématique serait ainsi faite en posant x_{ij} la valeur du j^{eme}

bit dans le i^{eme} code. x_{ij} vaut soit 1 ou 0. Le résultat de la corrélation croisée entre le i^{eme} et k^{eme} code sera calculé de la façon suivante :

$$\mathcal{L}_{i,k} = \sum_{j=1}^L x_{i,j} \cdot x_{k,j} \quad i \neq k \quad (2.1)$$

$$\text{Avec } x_{i,j} \text{ et } x_{k,j} \in [0,1]$$

L'équation (2.1) présente un produit scalaire de deux vecteurs représentant les deux codes différents tel que :

$$\mathcal{L}_{i,k} = (x_{i,1} \ x_{i,2} \ \dots \ x_{i,j-1} \ x_{i,j}) * \begin{pmatrix} x_{k,1} \\ x_{k,2} \\ \vdots \\ x_{k,j-1} \\ x_{k,j} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Par exemple avec le Tableau 2-1 , si nous calculons le produit scalaire de n'importe quelle combinaison de deux codes différents parmi la famille, nous observons qu'il n'y a qu'un seul bit « 1 » en commun.

Donc $L = 1$; $\forall j \neq k$ pour la famille de codes du Tableau 2-1. Nous ne considérons que les familles de codes ayant une corrélation \mathcal{L} croisée constante pour qu'elles soient compatibles avec l'utilisation d'une détection équilibrée.

Concernant la cardinalité ζ , elle correspond tout simplement le nombre d'utilisateurs maximum qu'un code peut supporter. En reprenant encore une fois l'exemple du Tableau 2-1 , on voit que la cardinalité ζ est égale à sept puisque nous avons sept codes disponibles. Ce paramètre est important, car lors du choix d'une famille de code, il faut s'assurer que ζ soit la plus élevée possible et supérieure ou égale à la longueur L du code. Il y a trois conditions nécessaires qu'une famille de code doit respecter pour pouvoir être utilisée dans un système SAC-OCDMA [16] :

- avoir une longueur L constante pour tous les codes de la famille.
- avoir un poids w constant.
- avoir une corrélation croisée \mathcal{L} constante pour tous les codes de la famille.

Tous les codes présentés dans la section suivante respectent ces trois conditions essentielles.

2.3.2 Codes bipolaires

Une séquence bipolaire (antipodale) est définie comme étant une suite d'impulsions pouvant prendre deux états distincts (+1 ou -1) par rapport à un niveau de référence transmis. L'utilisation de ces codes bipolaires dans un système CDMA, optique ou radiofréquence, est déterminée par leurs propriétés d'auto et intercorrélations tant pour les systèmes synchrones que pour les systèmes asynchrones.

Les séquences de type bipolaire "Walsh-Hadamard", "Pseudo Noise" (PN) ou "Gold", sont les principaux exemples qui prennent en compte, dans leur construction, tout ou une partie des conditions et limites posées sur les propriétés de corrélation [17] et discutées, dans ce chapitre.

2.3.2.1 Séquences de Walsh-Hadamard

Walsh-Hadamard est constitué du vecteur (ligne) d'un code de Walsh (matrice) disposé selon l'ordre de Hadamard. Les séquences de Walsh-Hadamard sont parmi les structures orthogonales les plus simples à construire. Une séquence de code est représentée par les lignes de la matrice de Hadamard. Une fonction de Walsh d'ordre n peut être définie, récursivement, par :

$$W(n) = \begin{bmatrix} W(n/2) & W(n/2) \\ W(n/2) & W'(n/2) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

W' représentant le complément logique de W , $W(1) = 0$ et

$$W(2) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Les codes sont donnés par les lignes de la matrice. Il en résulte de cette définition par exemple que :

$$W(4) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

La représentation bipolaire de ces séquences (Cf. Figure 2.8) consiste à remplacer simplement les valeurs [0,1] par les valeurs [-1, +1].

On peut voir que deux rangées quelconques k et m de la matrice représentent des séquences dont la version bipolaire présente des fonctions d'intercorrélation égales à 0, ce qui est le critère de définition de séquences orthogonales.

$$w_k(n) = \{w_{k,j}(n)\}, j = 1, \dots, n \quad (2.4)$$

$$w_m(n) = \{w_{m,j}(n)\} \quad (2.5)$$

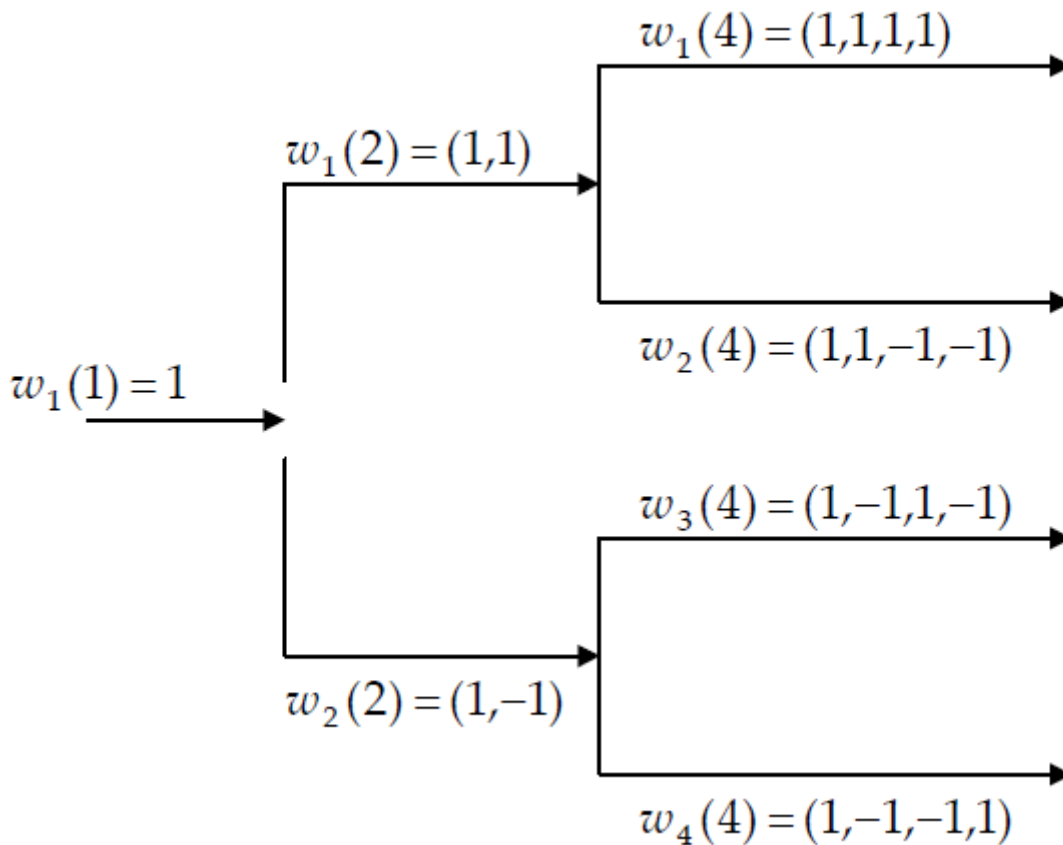


Figure 2.8 : Génération d'une séquence Walsh-Hadamard.

2.3.2.2 Codes m-séquence

Les m-séquences existent pour tout nombre p entier. Le Tableau 2-2 présente un exemple de code m-séquence supportant 15 usagers ($p = 4$) et le Tableau 2-3 présente les propriétés des codes m-séquence.

Tableau 2-2 : Code m-séquence pour $p=4$ ($L=15$, $w=8$, $\mathcal{L}=4$, $\zeta=15$)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Code 1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1
Code 2	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1
Code 3	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1
Code 4	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1
Code 5	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0
Code 6	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0
Code 7	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0
Code 8	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1
Code 9	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0
Code 10	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0
Code 11	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1
Code 12	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1
Code 13	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0
Code 14	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1
Code 15	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0

Tableau 2-3 : Caractéristiques des codes m-séquence

L	W	\mathcal{L}	ζ
$2^p - 1$	$2p$	$2p$	$2^p - 1$

2.3.2.3 Séquence de Gold

Les séquences de Gold sont une famille de codes qui découle des séquences PN. Elles sont particulièrement utilisées dans les structures CDMA dites "non-orthogonales" en raison de leurs propriétés de corrélation. L'exemple qui suit présente la façon dont on génère un ensemble de séquences de Gold.

$$\begin{cases} h(x) = x^3 + x + 1 \\ h'(x) = x^3 + x^2 + 1 \end{cases} \quad (2.6)$$

Avec des états initiaux 100 et 111, les séquences $h(x)$ et $h'(x)$ génèrent, respectivement, les m-séquences noté u et v :

$$\begin{cases} u = 0011101 \\ v = 1110010 \end{cases} \quad (2.7)$$

En configurant le générateur de séquences de Gold, (Cf. Figure 2.9), il en résulte les séquences données par le Tableau 2-4.

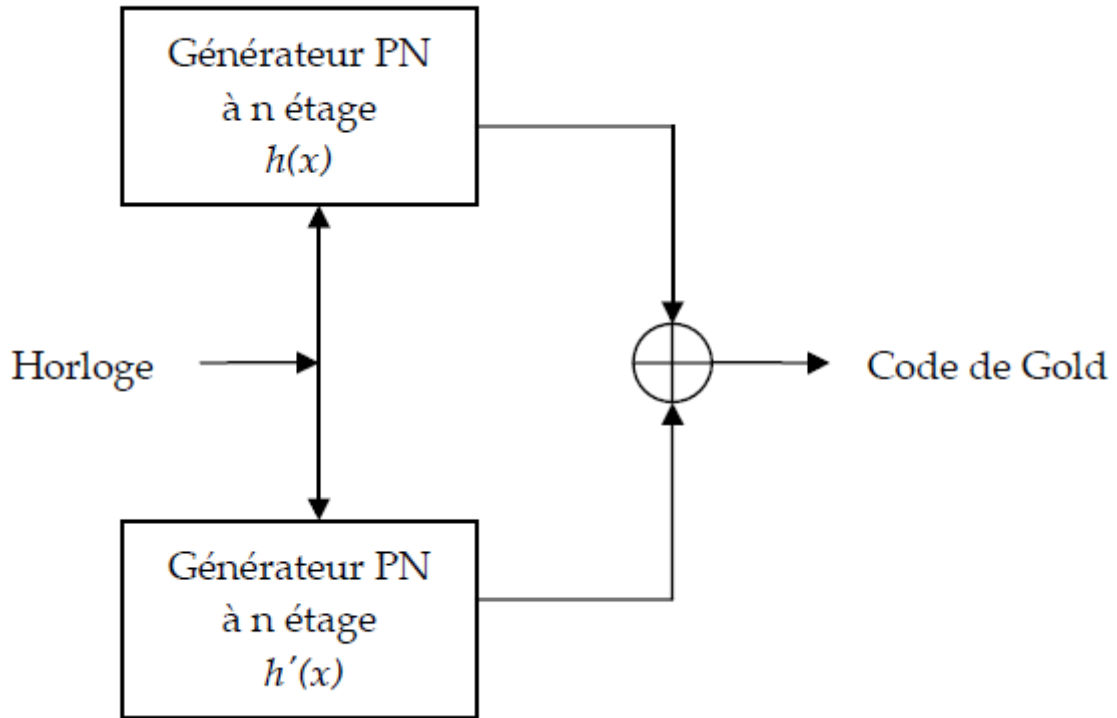


Figure 2.9 : Générateur de séquences de Gold

Tableau 2-4 : Exemple de 9 codes de Gold

$G_1 = 0011101$	$G_2 = 1110010$
$G_3 = 1101111$	$G_4 = 0100100$
$G_5 = 1000001$	$G_6 = 0110011$
$G_7 = 0001011$	$G_8 = 1010110$
$G_9 = 1111000$	

2.3.3 Codes unipolaires:

Il existe deux familles de code unipolaires: les plus connues et régulièrement employées sont les codes optiques orthogonaux, aussi appelés (OOC : Optical Orthogonal Codes) et les codes premiers (PC : Prime Codes).

2.3.3.1 Codes optiques orthogonaux

Les codes optiques orthogonaux (OOC) ont été présentés en 1989 par Salehi afin de résoudre les problèmes rencontrés par l'utilisation, dans le domaine optique, de séquences bipolaires et de système à détection cohérente. Ces codes sont généralement notés (L, W, h_a , h_c) [11], [18].

- L est la longueur de la séquence.
- W est le poids du code, qui représente le nombre de chips à « 1 ».
- h_a , h_c sont respectivement les contraintes d'auto et inter corrélation.

Afin de pouvoir distinguer les impulsions longues qui constituent le signal informatif et celles plus courtes, qui composent une séquence de code, les premières seront appelées "bits" d'informations tandis que les secondes seront nommées "chips".

Le choix des paramètres d'un code OOC peut être arbitraire. Cependant, dans une application CDMA on cherche à avoir le plus d'utilisateurs actifs dans le réseau ; ce qui veut dire qu'on cherche à obtenir le plus grand nombre de mots de code dans une famille donnée. On veut aussi respecter au mieux les contraintes d'auto et d'intercorrélation.

Il existe plusieurs façons de représenter mathématiquement ces codes OOC :

- Avec un vecteur donnant les positions des chips à 1 ;
- Avec un vecteur donnant les retards relatifs ;
- Avec un vecteur donnant la valeur de chaque chip.

2.3.3.2 Codes premiers

Contrairement aux codes OOC, les codes premiers ou séquences premières sont générés à partir d'algorithmes prédéfinis. Leurs constructions ne se fait donc pas de manière exhaustive, ce qui facilite leur génération. Ils permettent aussi d'obtenir des séquences plus courtes avec une capacité de multiplexage plus grande et ce pour des codes de taille inférieure ou identique aux OOC.

Comme pour les codes optiques orthogonaux, les codes premiers sont unipolaires permettant le multiplexage d'un certain nombre d'utilisateurs tout en observant une limitation des niveaux des interférences multi-utilisateurs résultant de ce multiplexage.

Les codes premiers sont comme les codes optiques orthogonaux, définis par leur taille ou longueur L , leur poids ω et leur capacité de multiplexage N . La particularité de ces séquences est que leurs algorithmes de construction se basent sur le choix d'un nombre premier p .

Considérons i et j comme deux nombres compris entre 0 et $p-1$. Une série de séquences est calculée par l'équation (2.8) :

$$\begin{cases} S_{i,j} = \{s_{i,0}, s_{i,1}, \dots, s_{i,j}, \dots, s_{i,p-1}\} \\ s_{i,j} = i \cdot j \text{ mod } (p) \end{cases} \quad (2.8)$$

Les séquences de codes premiers $C_i = \{c_{i,0}, c_{i,1}, \dots, c_{i,j}, \dots, c_{i,L-1}\}$ qui seront utilisées pour coder et multiplexer les signaux associés aux différents utilisateurs, sont générées par:

$$c_{i,k} = \begin{cases} 1 & \text{pour } k = s_{i,j} + j \cdot p \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (2.9)$$

Nous pouvons définir

$$\begin{cases} N = p & \text{Capacité de multiplexage d'une famille de codes premiers.} \\ L = p^2 & \text{Taille ou longueur d'une sequence de code premier.} \\ w = p & \text{Poids d'une sequence de code premier.} \end{cases} \quad (2.10)$$

L'une des spécificités de cet algorithme est de permettre la génération de codes plus courts que les OOC "classiques". Les Tableau 2-5 et Tableau 2-6 présentent deux exemples de familles de codes premiers générés par l'algorithme décrit (Cf. Equations (2.8) et (2.9)), pour des valeurs de $p = 5$ respectivement $p = 3$.

Ces deux familles de codes premiers (ou séquences premières) correspondent respectivement à des capacités de multiplexage $N=5$ et $N = 3$ et à des tailles respectivement égales à $L = 25$ et $L= 9$.

Tableau 2-5: Code premiers pour N=5

i	S_i	C_i
0	00000	10000 10000 10000 10000 10000
1	01234	10000 01000 00100 00001 00000 1
2	02413	10000 00100 00000 101000 000010
3	03142	10000 00010 01000 00001 00100
4	04321	10000 00001 00010 00100 01000

Tableau 2-6: Code premiers pour N=3

i	S_i	C_i
0	000	100 100 100
1	012	100 010 001
2	021	100 001 010

Si les codes premiers permettent une nette amélioration de la capacité de multiplexage par rapport aux codes OOC, cette amélioration n'est obtenue que grâce à un assouplissement des contraintes concernant les niveaux tolérés pour les fonctions d'auto et intercorrélations.

2.3.4 Codes ZCC (Zero Cross Correlation)

Les codes ZCC sont des codes avec une intercorrélations nulle [23]. Ces codes respectent les critères ci-après :

- le code doit être unique pour chaque utilisateur.
- pas de chevauchement de bit '1' entre les utilisateurs.
- si le nombre d'utilisateurs augmente, l'intercorrélations nulle doit être maintenue.
- le code doit être aléatoire.
- le nombre d'utilisateurs et le poids doivent être flexibles et facilement augmentable.
- le code peut être mis en œuvre à l'aide des dispositifs optiques.

Le code ZCC est représenté selon une matrice $K \times C$ où K représente le nombre de lignes ou nombres d'utilisateurs et C le nombre de colonnes ou longueur du code. Un paramètre

supplémentaire est le poids w du code c'est-à-dire le nombre de bits à 1 présent dans le code.

Ces codes se construisent selon la méthode ci-après :

$$Z_w = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Où :

- A est une matrice de dimensions $[2, 2*w]$. La matrice A est une réplique de la matrice

$$Z_{w=1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

- B est une matrice zéro de dimensions $[2, w*(K-2)]$.
- C est une matrice zéro de dimensions $[(K-2), (w*2)]$.
- D est une matrice $[(K-2), (w*(K-2))]$ composé d'une rotation de la diagonale $[(K-2), (K-2)]$ avec w réplique de chaque colonne. Sauf pour la matrice $K=3$, D est une matrice unité de dimensions $[1, w]$.

On a donc par ce processus :

$$Z_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Z_2 a un poids de $w=2$ et $K=3$ lignes donc utilisables pour 3 utilisateurs tout en ayant une longueur de code $C=6$.

$$Z_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Z_3 a un poids de $w=3$ et $K=4$ lignes donc utilisables pour 4 utilisateurs tout en ayant une longueur de code de 12.

La relation entre les paramètres K , C et W est $C= W*K$.

Pour notre travail de recherche nous utiliserons un code ZCC avec pour valeurs :

$K=4$, $W=4$, et $C=16$

$$Z_4 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

2.4 OCDMA au moyen d'AWG/FBG

L'intégration des composants optiques pour réaliser la fonction de codage et de décodage dans les réseaux d'accès optiques a permis de rendre les systèmes CDMA entièrement optique. Parmi les dispositifs les plus utilisés en OCDMA nous avons :

- Les réseaux de guides d'ondes matriciels (Arrayed Waveguide Gratings : AWG)
- Les réseaux de Bragg (Fiber Bragg Grating : FBG)

2.4.1 OCDMA a base d'AWG (Arrayed Waveguide Grating)

Le principe des réseaux de guides d'ondes matriciels est d'utiliser en cascade deux AWG (1xN) (Cf. Figure 2.10). A la sortie de chaque branche du premier AWG, on retrouve une tranche spectrale déterminée.

En branchant uniquement certaines fibres aux N entrées du deuxième AWG, il est ainsi possible d'obtenir un code spectral. Pour obtenir un code ajustable dynamiquement, on peut choisir de connecter les N sorties du premier AWG avec les N entrées du second AWG mais en insérant dans chaque branche un atténuateur variable contrôlable électroniquement ou bien encore en intégrant directement ces atténuateurs.

Cette technique est intéressante, car elle utilise des composants déjà disponibles sur le terrain dans les systèmes WDM mais nécessite tout de même deux AWGs à l'encodage, des atténuateurs et quatre AWGs avec un intervalle spectral libre supérieur à une centaine de gigahertz. Cependant, ce problème n'est que purement technologique et peut être résolu par une architecture optimal pour le SAC-OCDMA.

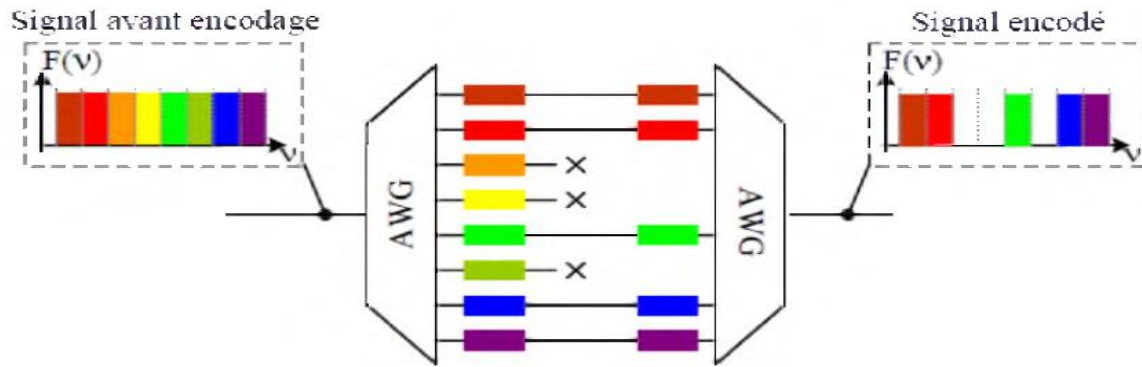


Figure 2.10 : Encodage au moyen d'AWGs

2.4.2 OCDMA à base de réseaux de Bragg

Le nom Bragg vient de Sir William Henri Bragg qui a découvert la loi de Bragg en 1915. Un réseau de Bragg (FBG) est une modulation périodique de l'indice de réfraction du cœur d'une fibre optique [12]. La photo-inscription des réseaux de Bragg est due principalement au phénomène de photosensibilité des fibres.

La modulation d'indice est induite par exposition du cœur de la fibre à une intense lumière provoquée par l'interférence de deux faisceaux créés à partir d'un faisceau laser ultraviolet (Cf. Figure 2.11). Cette exposition a pour effet d'augmenter légèrement l'indice de réfraction de l'ordre de 10^{-4} dans ces régions.

La lumière se propageant dans la fibre est partiellement réfléchi à chacune des variations d'indice (les interfaces agissant comme des miroirs partiellement réfléchissants). Ces réflexions peuvent interférer de façon constructive dans la direction contre-propagative.

La lumière est réfléchi sur une plage spectrale très étroite, centrée sur une longueur d'onde bien spécifique. Autrement dit, la réflectivité est maximale à cette longueur d'onde appelée la longueur d'onde de Bragg λ_B .

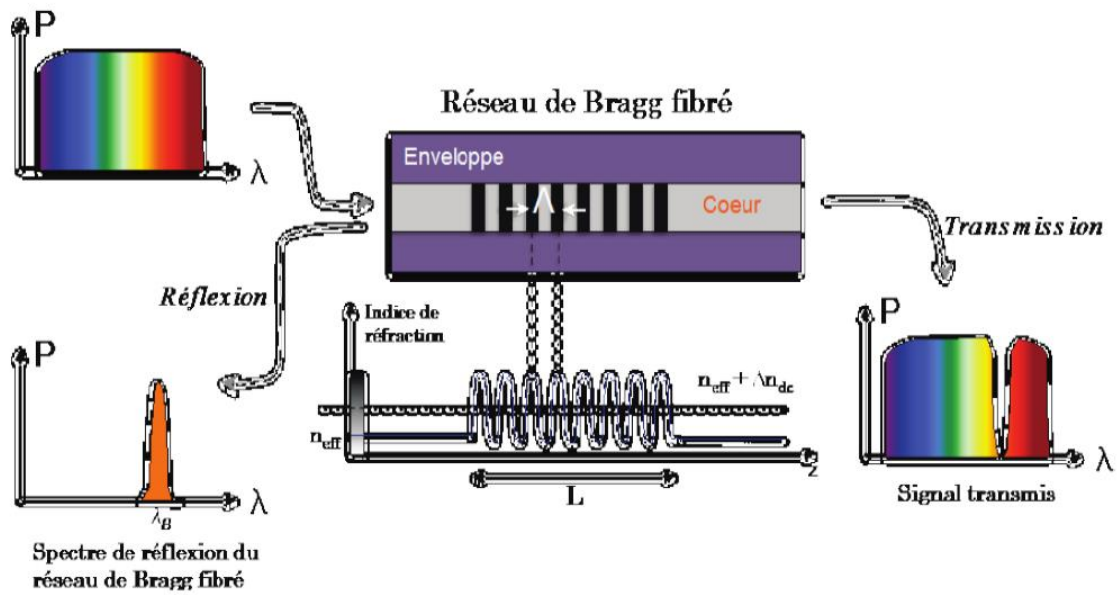


Figure 2.11 : Encodage au moyen de FBG [12]

La fibre à réseau de Bragg peut donc agir comme un miroir sélectif en longueur d'onde, réfléchissant une longueur d'onde particulière. C'est donc ce miroir qui est utilisé comme un filtre optique en ligne pour bloquer certaines longueurs d'onde (Cf. Figure 2.11).

Les FBG permettent de coupler la lumière entre le mode fondamental qui se propage dans la fibre optique (mode propagatif) et un mode contre-propagatif. Ce couplage efficace satisfait le principe de conservation de la quantité du mouvement en présence du réseau et celle de la conservation d'énergie.

Conclusion

Ce chapitre nous a permis de rentrer dans le vif du sujet de notre thème de recherche. En effet nous avons parcouru de long en large toutes les thématiques liées au CDMA optique. Nous avons évoqué les raisons qui motivent l'implémentation du CDMA, des diverses méthodes d'implémentation du CDMA sans oublier les divers codes utilisés. Ce chapitre permet d'asseoir les bases solides de connaissances pour l'implémentation du CDMA optique. Le prochain et dernier chapitre consistera à implémenter le CDMA dans une liaison optique fibrée puis d'effectuer quelques simulations et enfin analyser les différents résultats obtenus.

3. Chapitre 3 : Implémentation du CDMA dans une liaison optique sur fibre : Simulations et résultats

Dans ce chapitre, nous allons présenter notre implémentation du CDMA dans une liaison fibrée ainsi que les différents résultats obtenus à l'issue des simulations effectuées. Dans le cadre de ce mémoire nous allons recourir au logiciel Optisystem comme outil de simulation et de MATLAB pour permettre une meilleure analyse des résultats.

3.1 Présentation du logiciel Optisystem

OptiSystem (Cf. Figure 3.1) est un outil interactif développé par la société canadienne Optiwave Systems Inc. qui permet aux chercheurs et aux ingénieurs de concevoir, modéliser, simuler et analyser tout module et/ou système optique allant du dispositif le plus élémentaire au système complet de communication décrit sous la forme de schéma blocs. C'est un environnement interactif qui allie donc des outils numériques à des fonctionnalités graphiques.

Optisystem dispose d'une bibliothèque assez fournie qui contient un large panel de modèles permettant de réaliser différents schémas, circuits, régénérateurs, codeurs, modulateurs, filtres, etc. comme illustrés à la Figure 3.2.

Pour cette étude, nous avons opté pour la version Optisystem7 du fait qu'elle soit non seulement disponible mais aussi parce qu'elle dispose de toutes les fonctionnalités dont nous avons besoin pour l'implémentation du CDMA en liaison optique sur fibre.

Dans la section suivante, nous allons présenter la liaison OCDMA sur fibre modélisée qui sera ensuite discutée.

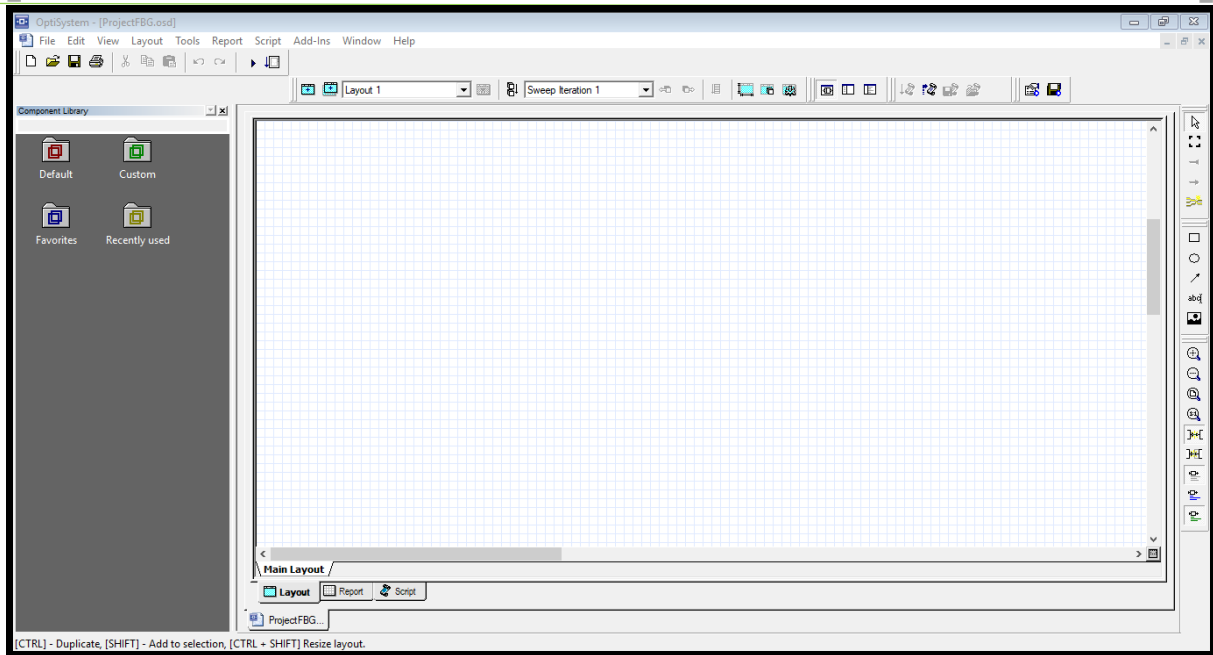


Figure 3.1 : Logiciel Optisystem 7 au démarrage

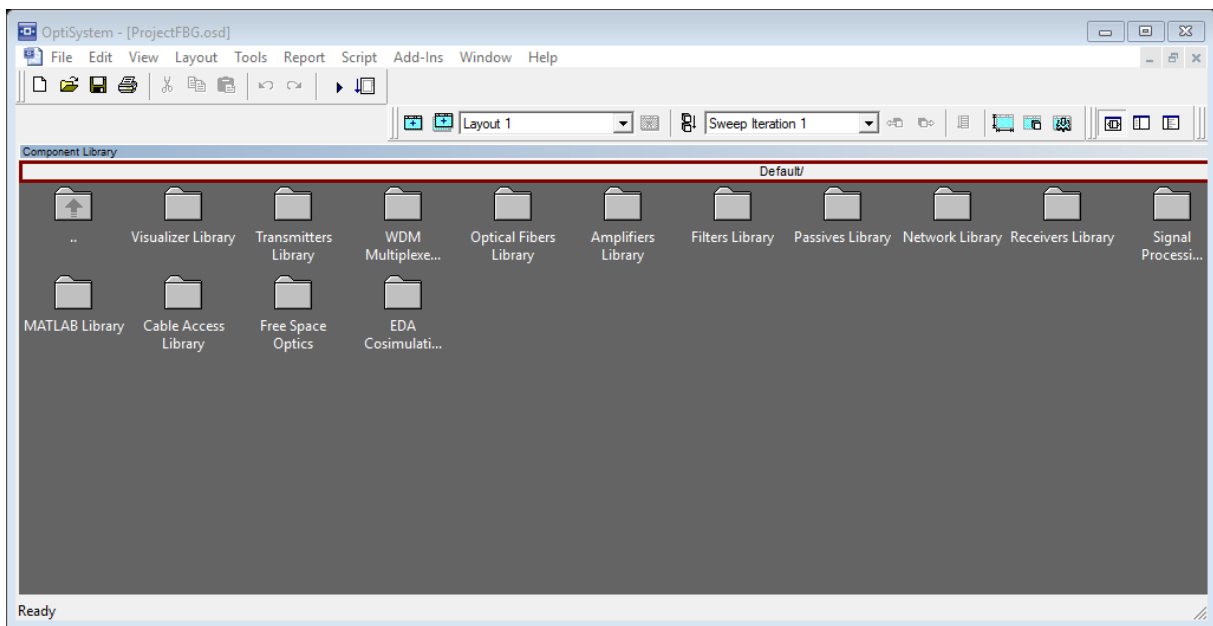


Figure 3.2 : Bibliothèque d'Optisystem 7

3.2 Présentation de la chaîne OCDMA modélisée

La Figure 3.3 présente le schéma simplifié du principe de base sous-tendant notre modélisation de la liaison OCDMA sur fibre. Il s'agit d'une liaison descendante où du côté opérateur (à l'OLT : Optical Line Terminal), k émetteurs optiques codés CDMA (Code 1 à Code k) sont multiplexés. Le signal résultant est transmis dans une fibre de distribution pour être ensuite

démultiplexé au point d'éclatement vers les différents récepteurs (ou utilisateurs). A chaque récepteur, le même code utilisé à l'émission est nécessaire pour réaliser le décodage CDMA.

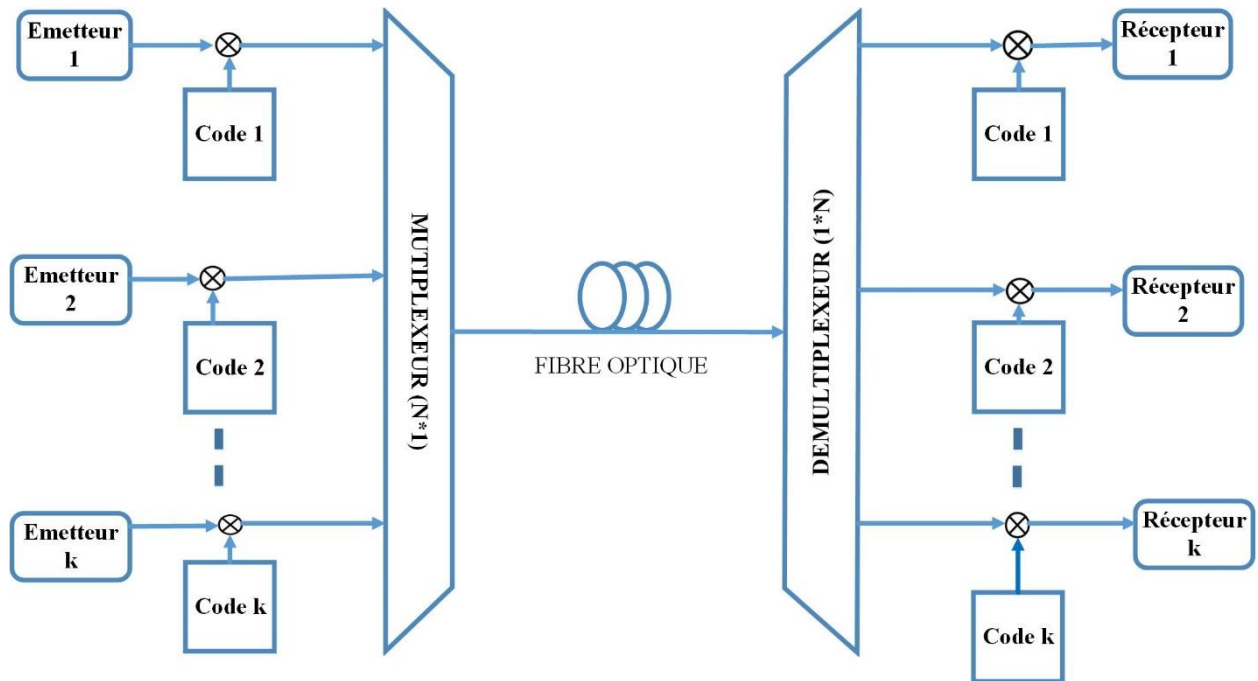


Figure 3.3 : Chaîne OCDMA étudiée

Les codes utilisés à la Figure 3.3 sont de type ZCC [24] et sont présentés au Tableau 3-1.

Tableau 3-1 : Codage ZCC avec $w=4$ et $L=16$

Codes	Chips															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
C_1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
C_2	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C_3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
C_4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1

Pour obtenir ces codes optiques C_1 ; C_2 ; C_3 et C_4 pour notre solution nous avons procédé à un morcellement de la bande C (1530-1565) en de petites bandes de largeur $\Delta\lambda = 0.4\text{nm}$. Comme nous utilisons dans le cas d'espèce un code de longueur 16 nous aurons donc besoin d'une bande optique $B= 0.4*16=6.4 \text{ nm}$ pour implémenter le système. La Figure 3.4 et le Tableau 3-2 présentent les diverses longueurs d'ondes utilisées ainsi que les divers codes

optiques associés. Quant à la répartition des longueurs d'onde, $\lambda_i = \lambda_1 + (i - 1) * \Delta\lambda$, $\forall i = 1,2, \dots$ et $\lambda_1 = 1548 \text{ nm}$ pour notre implémentation.

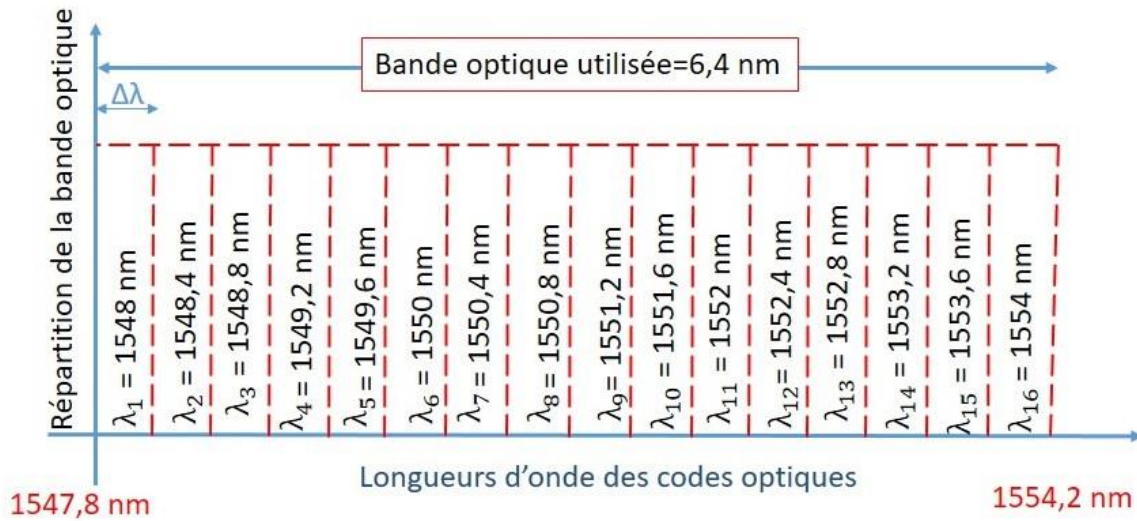


Figure 3.4: Répartition des longueurs d'onde

Tableau 3-2: Codes optiques avec les diverses longueurs d'onde associées

Codes	Longueurs d'ondes (nm)			
	λ_2	λ_4	λ_6	λ_8
1	λ_2	λ_4	λ_6	λ_8
2	λ_1	λ_3	λ_5	λ_7
3	λ_9	λ_{10}	λ_{11}	λ_{12}
4	λ_{13}	λ_{14}	λ_{15}	λ_{16}

Les séquences de codes sont générées avec quatre longueurs d'ondes fournies par quatre diodes lasers conformément à $w=4$. Les Figure 3.5 et Figure 3.6 montrent le modèle simulé du code 1 sous Optisystem 7. On y voit effectivement 04 sources lasers émettant chacune une des

longueurs d'onde caractérisant le « Code 1 » simulé. Le tout est multiplexé WDM pour illustrer le « Code 1 » du Tableau 3-2.

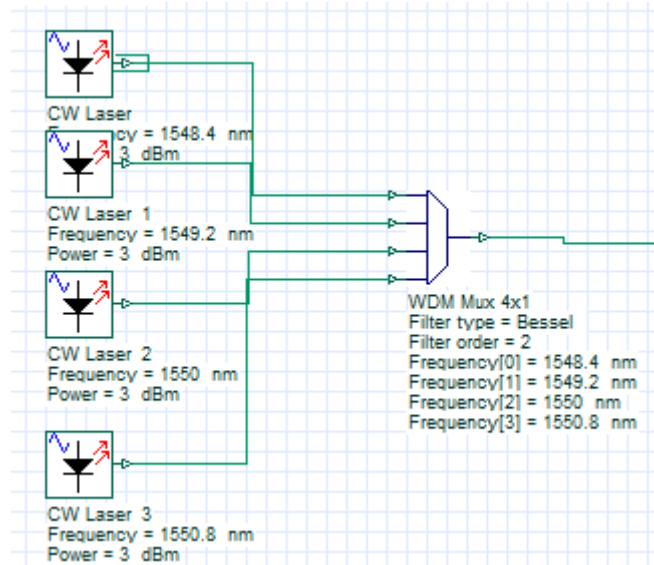


Figure 3.5 : Bloc modélisé du code optique 1

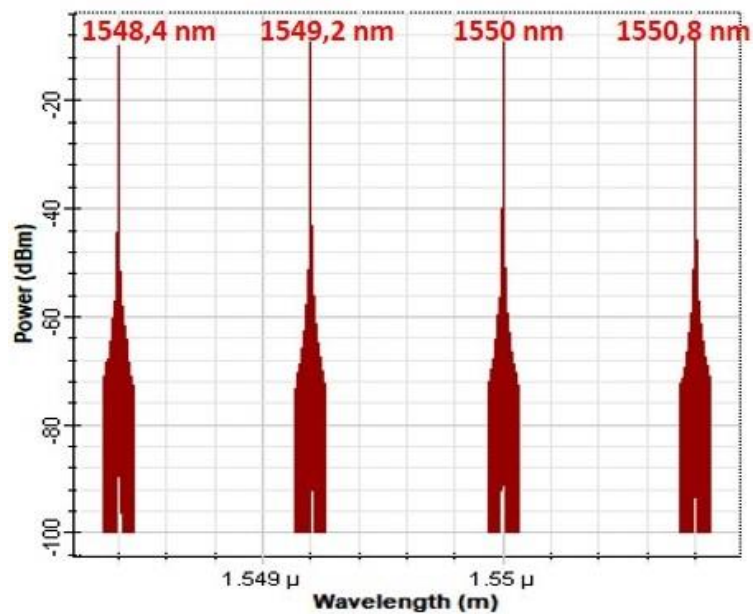


Figure 3.6 : Spectre optique caractérisant le « Code 1 »

En effet pour émettre les données correspondant à l'utilisateur 1 (Récepteur 1 de la Figure 3.3 par exemple), il sera question dans notre modèle, de moduler le bloc optique (ou Code 1 de la Figure 3.5) par le biais du signal électrique correspondant. Ainsi la Figure 3.7 présente la liaison établie pour générer le signal correspondant aux données à transmettre vers chaque utilisateur

de la liaison modélisée. Elle est composée d'un générateur de données binaires ou PRBS (Pseudo Random Bit Sequence) suivi d'un modulateur NRZ (pour validation du modèle avec un format numérique simple). Le signal électrique généré (Figure 3.8) servira à moduler le code optique correspondant à l'utilisateur au moyen d'un modulateur mach-zehnder (Cf. Figure 3.9). Dans le cadre de cette étude nous avons effectué des simulations pour une liaison CDMA sur fibre optique visant à desservir quatre (04) utilisateurs. Les sorties des différents modulateurs sont ensuite combinées par le biais d'un coupleur optique (ou un additionneur optique) et le signal optique résultant envoyé dans la fibre monomode ayant une atténuation de 0.2db/km autour de 1550 nm.

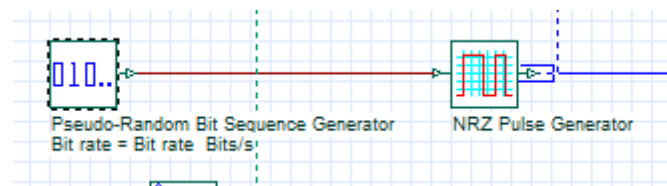


Figure 3.7 : Bloc de génération des données d'un utilisateur de la liaison optique

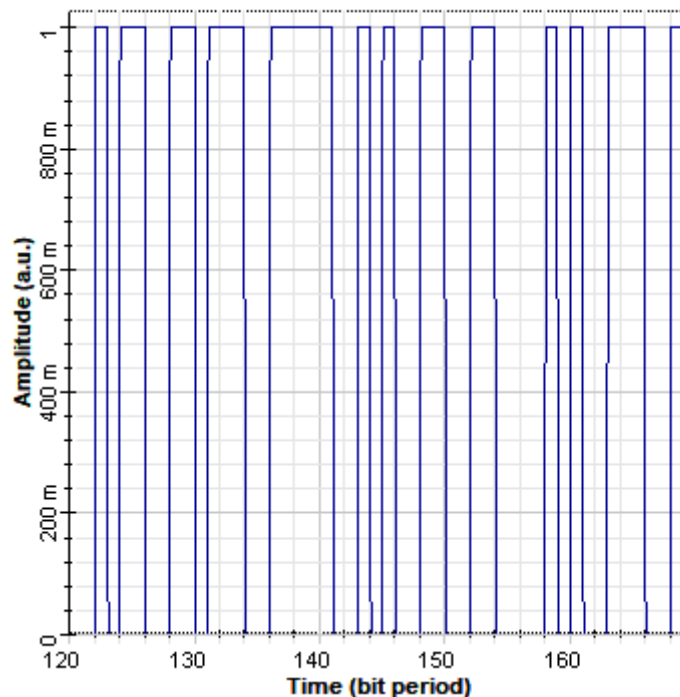


Figure 3.8 : Signal électrique correspondant aux données émises vers un utilisateur

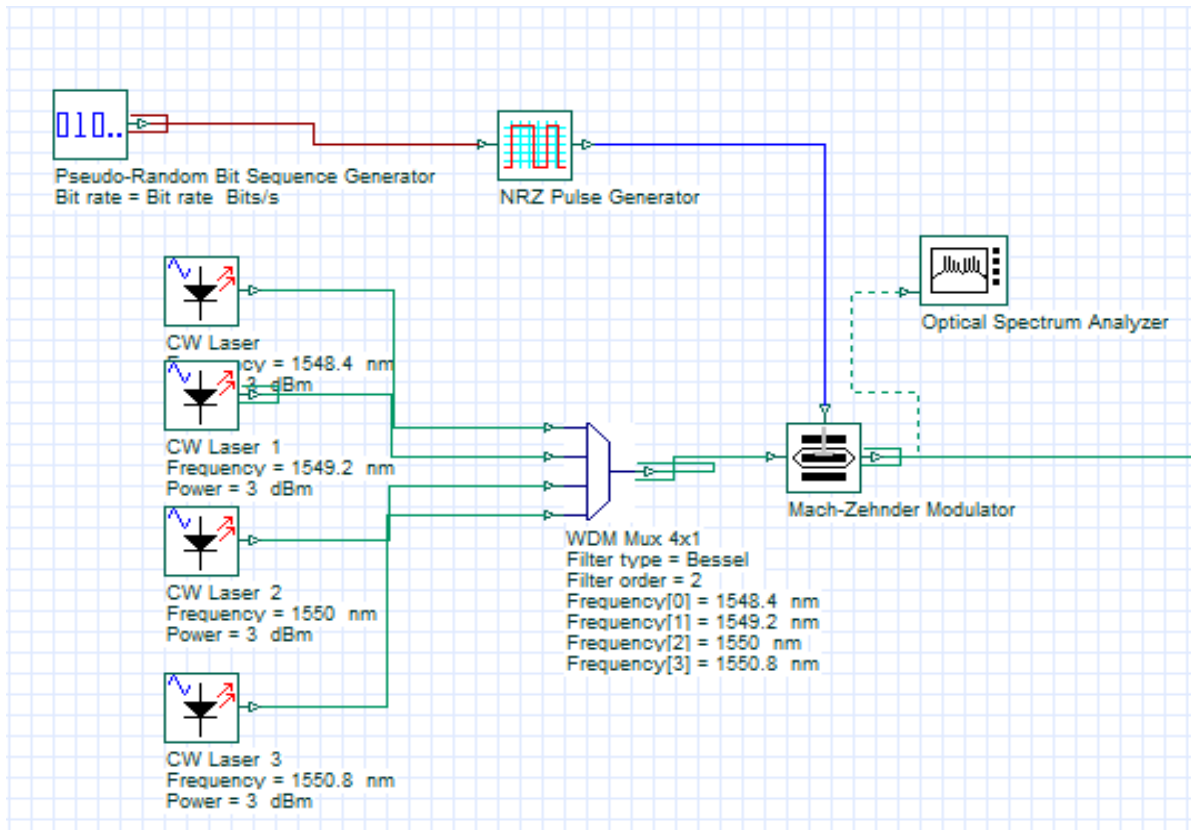


Figure 3.9 : Schéma d'un émetteur codé « Code 1 »

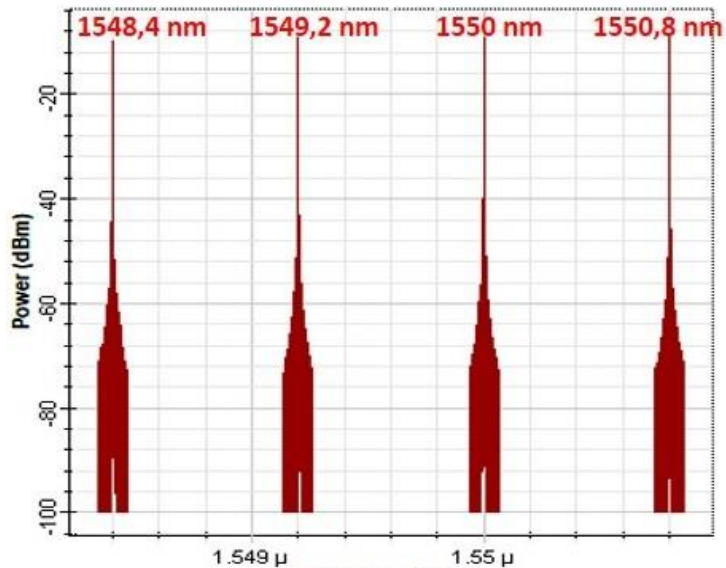


Figure 3.10 : Données après codage à l'analyseur de Spectrum

Du côté du récepteur un répartiteur optique divise le signal reçu en un nombre de sorties correspondants au nombre de codes optiques utilisés (Cf. Figure 3.11). Dans ce travail nous essayons de simuler deux types de détections : La détection directe et la détection équilibrée.

- La détection directe** est fondée sur le fait que l'information doit être suffisamment récupérable sur un seul chip à 1 du code [25]. Donc il suffit de récupérer l'information émise sur une seule longueur d'onde du code pour récupérer l'information émise. Pour ce faire, nous avons utilisé un filtre optique passe-bande (BPF : Optical Band Pass Filter) permettant de sélectionner une des longueurs d'ondes parmi celles constituant le code optique traité. Ensuite une photodiode PIN est ensuite utilisée pour convertir le signal optique en signal électrique. L'ensemble de la liaison OCDMA simulée est présentée à la Figure 3.12.

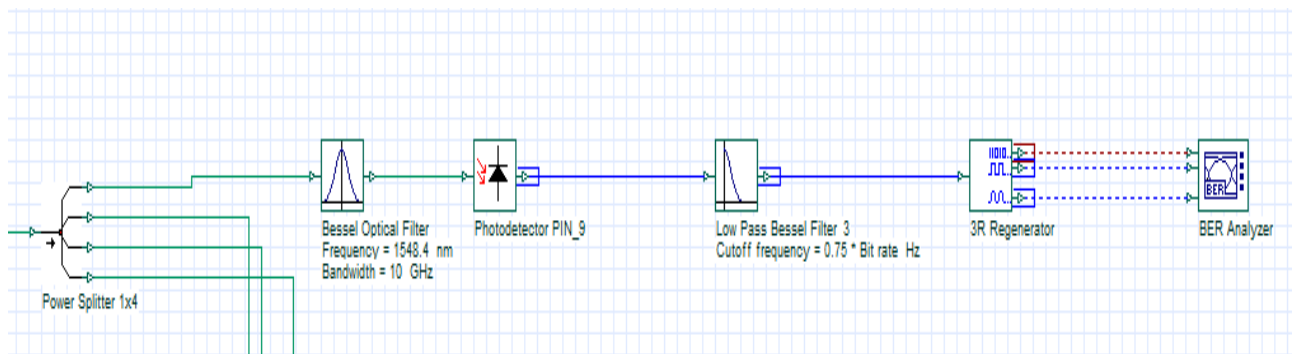


Figure 3.11 : Récepteur pour une détection directe

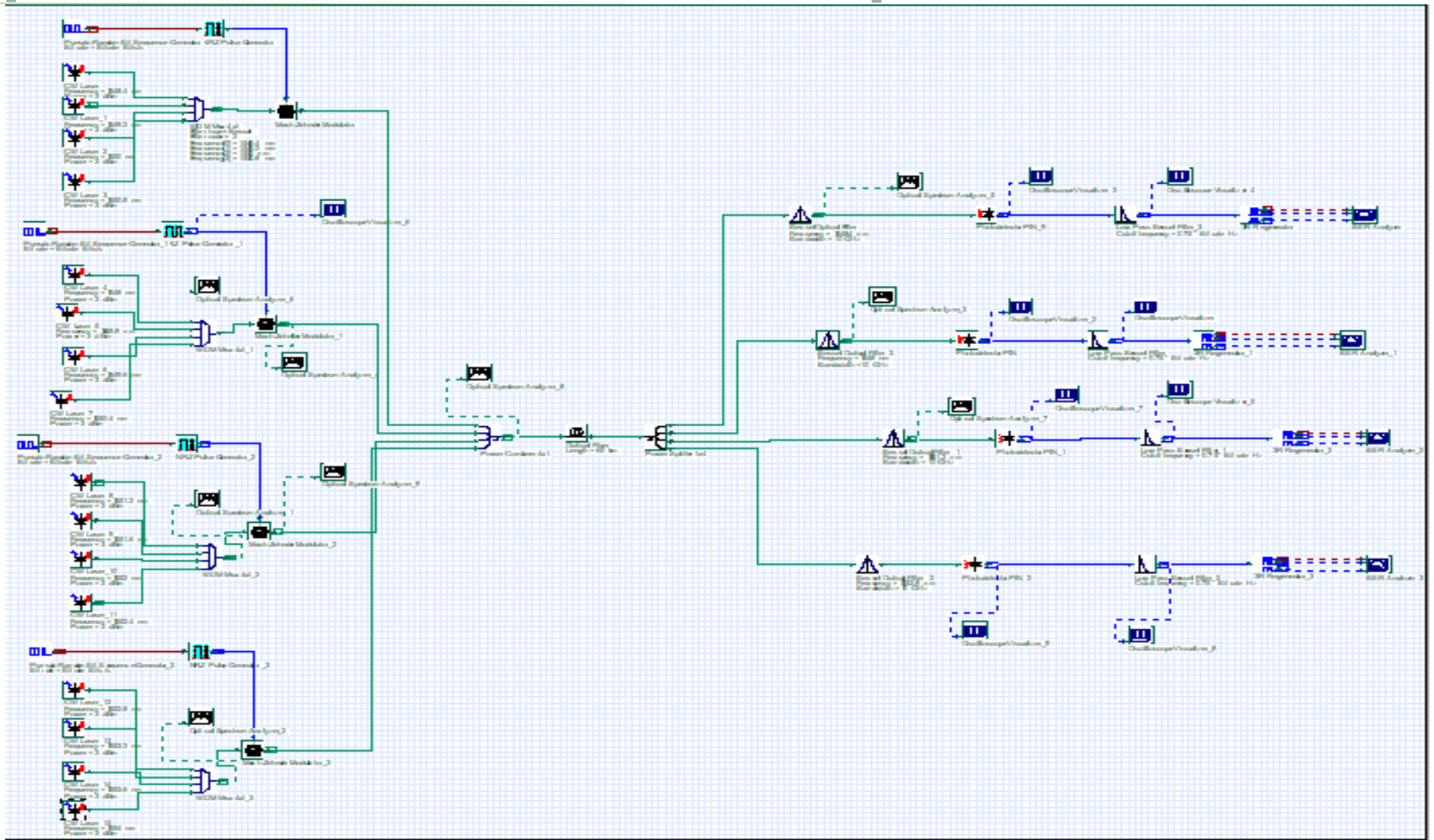


Figure 3.12 : Schéma globale du système OCDMA avec détection directe.

- Dans le cas d'une **détection équilibrée** toutes les longueurs d'ondes du code sont considérées contrairement à une détection directe qui ne prend en compte qu'une seule longueur d'onde [26]. Globalement dans une détection équilibrée le signal à la sortie du répartiteur optique est envoyé dans un démultiplexeur optique WDM qui comportent les mêmes longueurs d'ondes que le code. Ensuite chaque bras du démultiplexeur est retardé selon un délai bien précis puis le tout additionné au moyen d'un additionneur optique. En sortie de l'additionneur optique, un photodétecteur PIN détecte le signal électrique suivi du circuit de démodulation pour la récupération des données utilisateurs (Cf. Figure 3.13 et Figure 3.14).

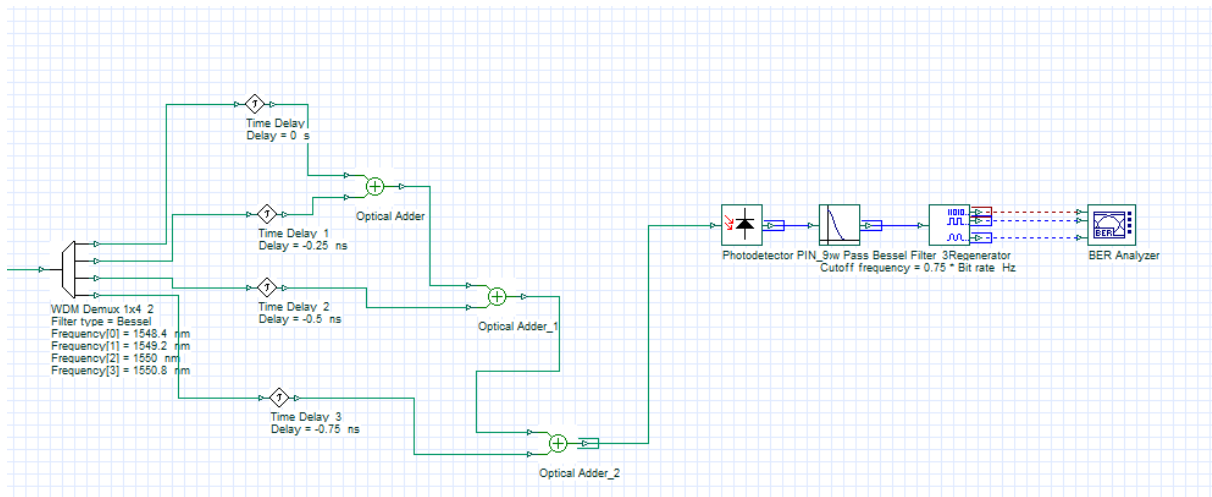


Figure 3.13: Schéma blocs d'un récepteur à détection équilibrée

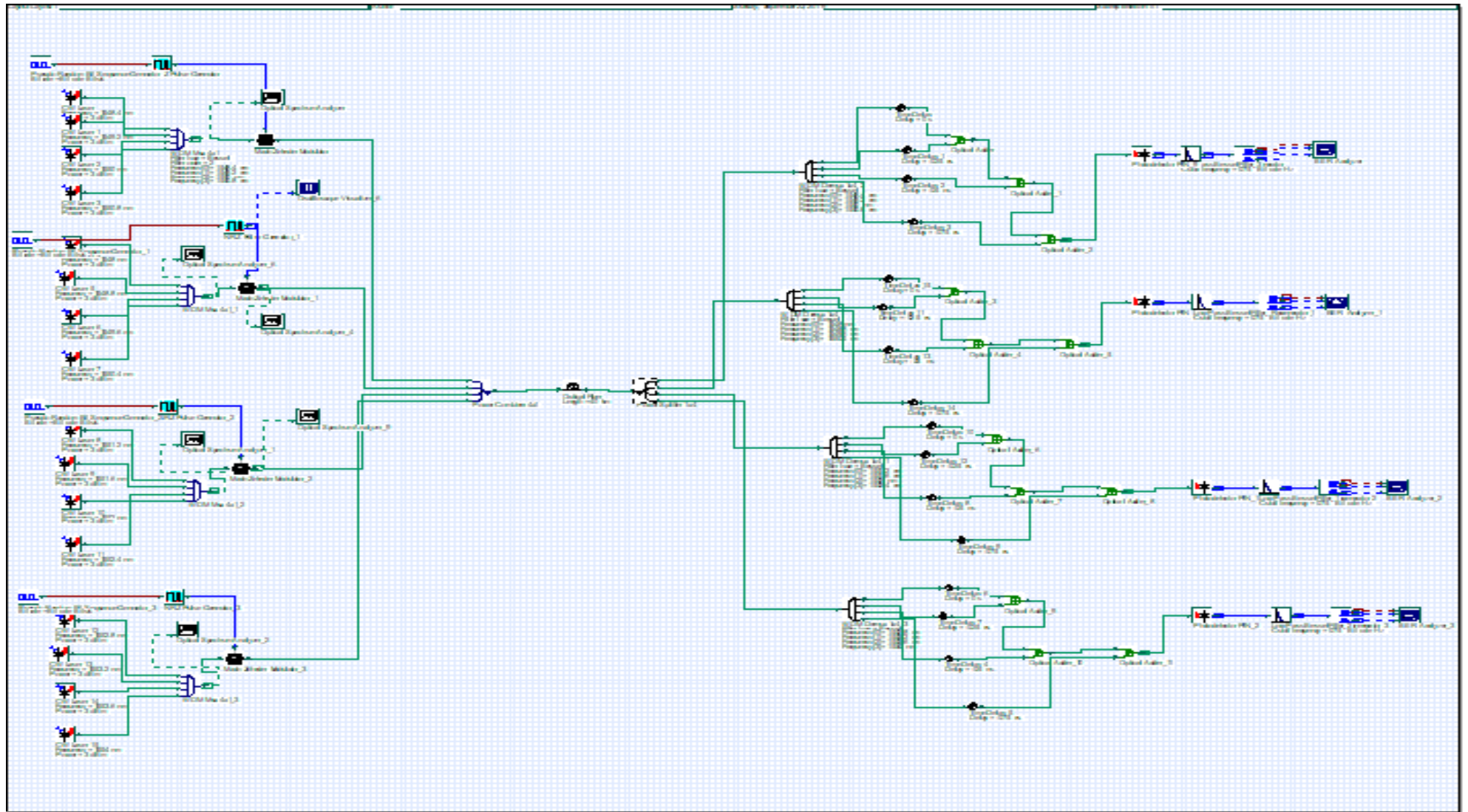


Figure 3.14: Schéma globale du système OCDMA à détection équilibrée

Dans ce qui suit nous allons simuler la liaison modélisée et dans les différents cas de détection proposée.

3.3 Etude des performances de la liaison OCDMA modélisée : cas de détection directe

Les simulations ont été réalisées pour des distances de 20,40 et 60 km. Nous faisons varier le débit et analysons le TEB (Taux d'Erreur Binaire). La Figure 3.15 présente les divers diagrammes de l'œil obtenu pour différents débits et distances de fibre.

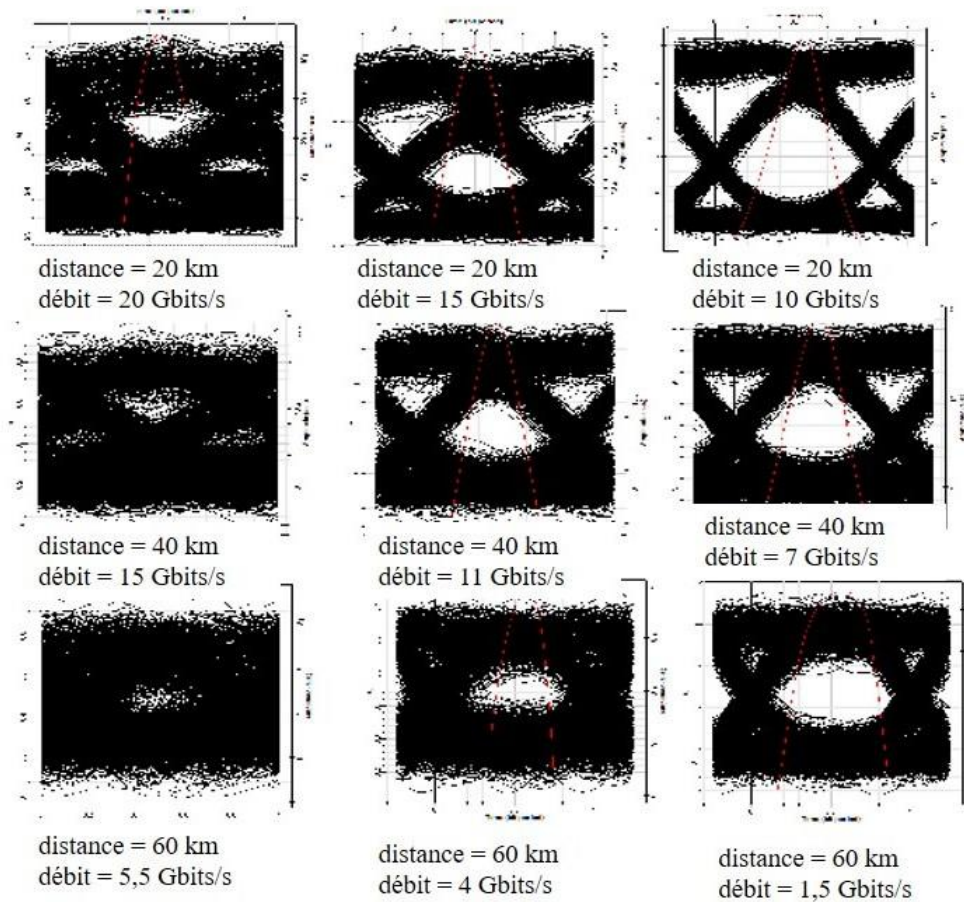


Figure 3.15 : Diagrammes de l'œil obtenus pour différents débits et distances en détection directe

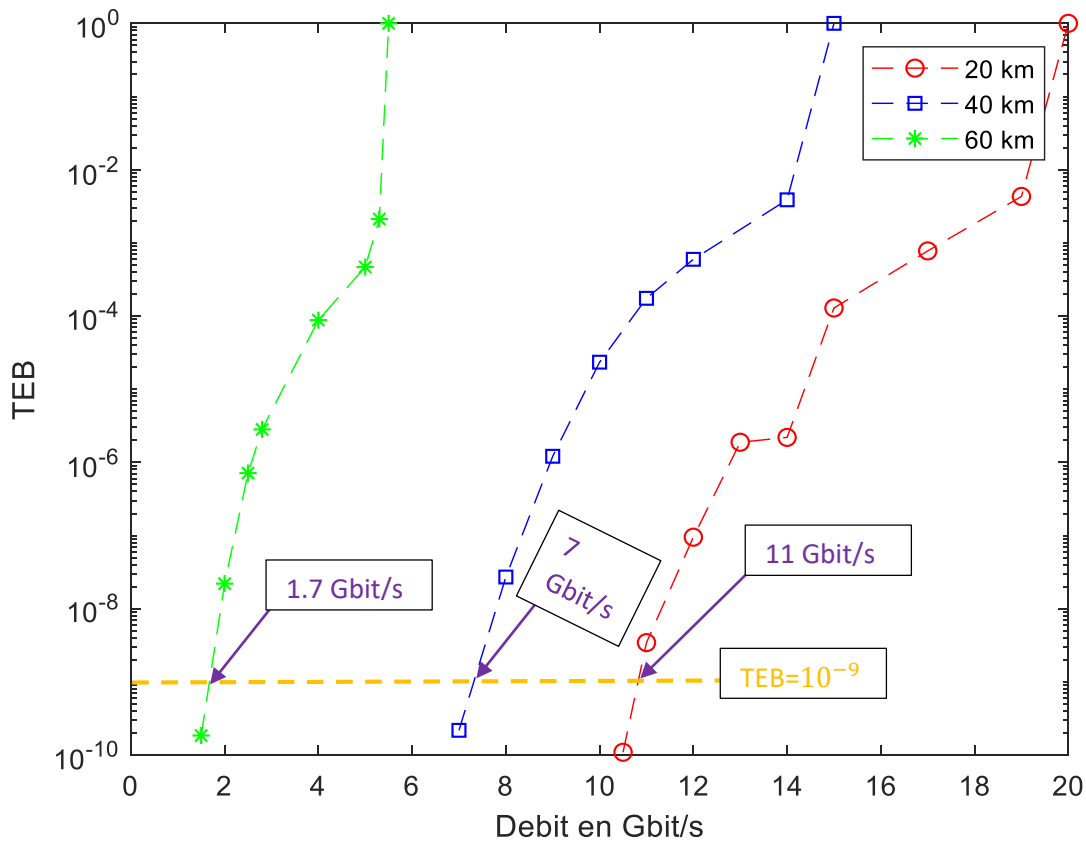


Figure 3.16: TEB en fonction du débit pour différentes distances de fibre

La Figure 3.16 illustre la variation du TEB en fonction du débit de simulation pour différentes valeurs de distance de fibre pour une simulation en détection directe.

Pour une simulation effectuée sur une distance de 20 km, afin de garantir un TEB de 10^{-9} il est possible de réaliser un débit de 11 Gbits/s.

Pour une simulation effectuée par contre sur une distance plus grande de 40 km, afin de garantir un TEB de 10^{-9} il est possible de réaliser un débit de 7 Gbits/s. Dès que la distance de simulation est doublée, cela correspond à une perte de débit de 4 Gbits/s

Si la distance de simulation est portée à 60 km, pour garantir un TEB est de 10^{-9} il est possible de réaliser un débit de 1.7 Gbits/s. Dès que la distance de simulation est triplée, cela correspond à une perte en débit de 2.3 Gbits/s.

L'analyse des résultats obtenus à la Figure 3.16 permet d'observer que plus le débit augmente le TEB se dégrade (augmente également) pour toutes les distances. Ceci se justifie par le fait qu'à haut débit, les effets dus essentiellement à la dispersion chromatique de la fibre dégradent

fortement la réception : ce qui occasionne des erreurs de transmission, donc une augmentation du TEB.

On constate aussi que plus la distance augmente le débit de transmission baisse.

3.4 Etude des performances de la liaison OCDMA modélisée : cas de détection équilibrée

Les simulations ont été réalisées pour des distances de 20,40 et 60 km. Nous faisons varier le débit et analysons le TEB. La Figure 3.17 présente les divers diagrammes de l'œil obtenu pour différents débits et distances.

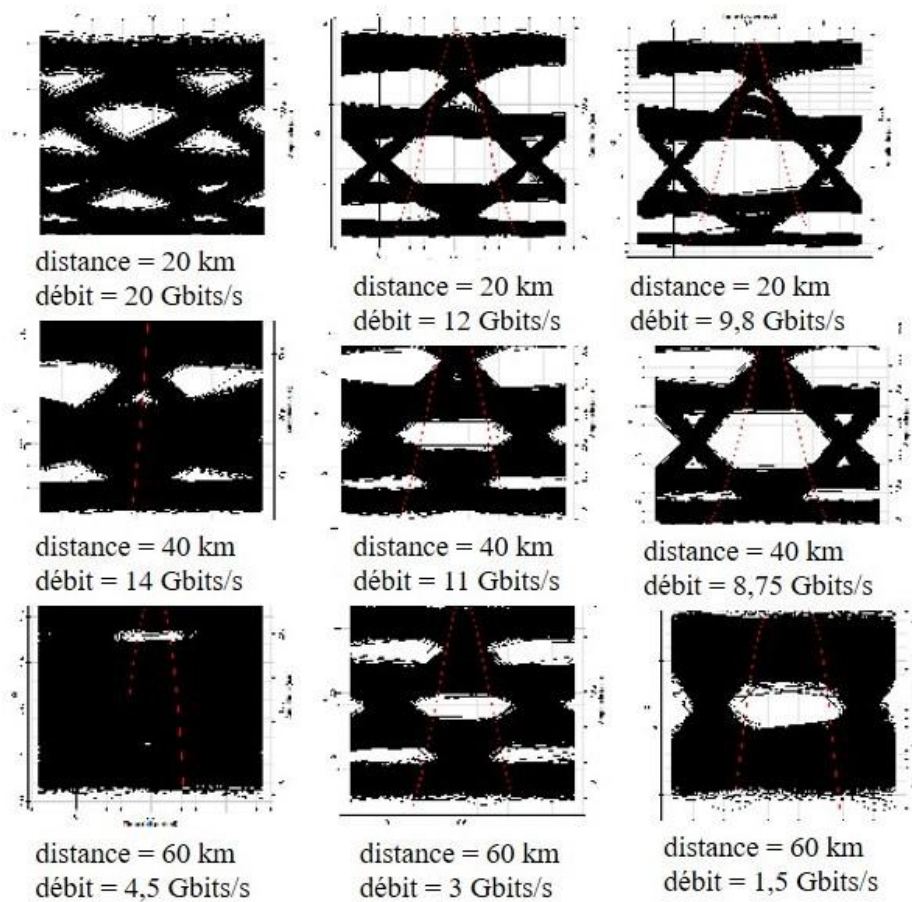


Figure 3.17 : Diagrammes de l'œil obtenus pour différents débits et distances en détection équilibrée

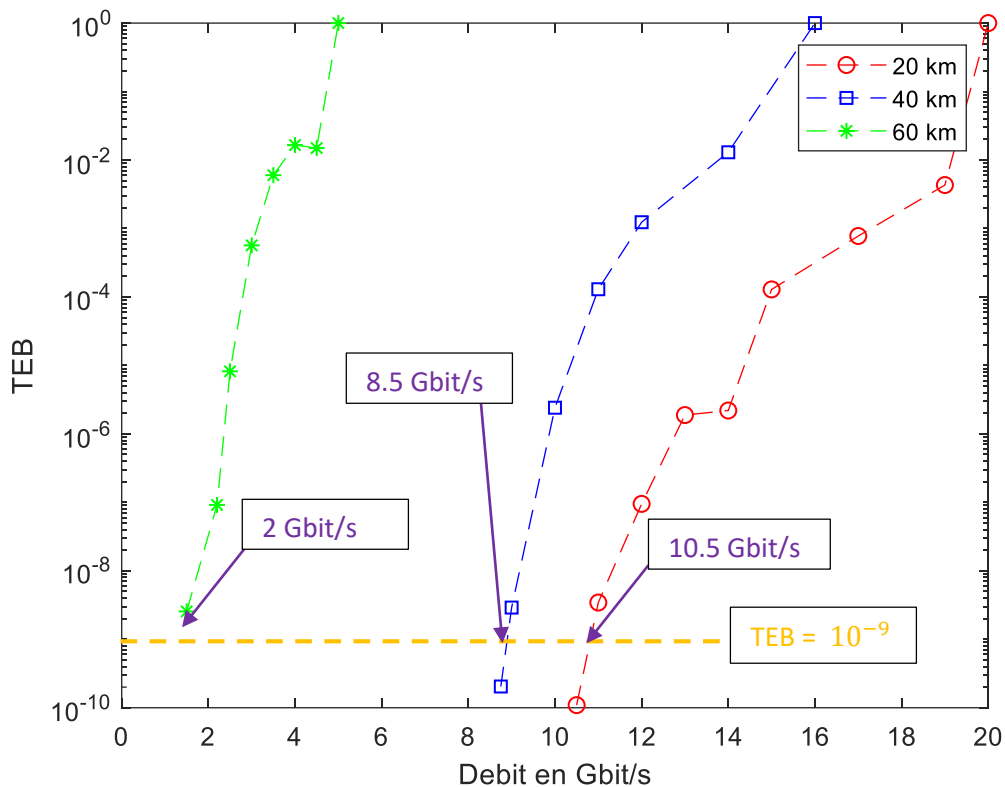


Figure 3.18: TEB en fonction du débit pour différentes distances en détection équilibrée

Le graphe de la Figure 3.18 illustre la variation du TEB en fonction du débit de simulation pour différentes valeurs de distance de fibre pour une simulation en détection équilibrée.

Pour une simulation effectuée sur une distance de 20 km, afin de garantir un TEB de 10^{-9} il est possible de réaliser un débit de 10.5 Gbits/s.

Pour une simulation effectuée par contre sur une distance plus grande de 40 km, afin de garantir un TEB est de 10^{-9} il est possible de réaliser un débit de 8.5 Gbits/s. Dès que la distance de simulation est doublée, cela correspond à une perte de débit de 2 Gbits/s.

Si la distance de simulation est portée à 60 km, pour garantir un TEB est de 10^{-9} il est possible de réaliser un débit de 2 Gbits/s. Dès que la distance de simulation est triplée, cela correspond à une perte en débit de 6.5 Gbits/s.

L'analyse du graphe de la Figure 3.18 permet d'observer que plus le débit augmente le TEB se dégrade (augmente également) pour toutes les distances. Ceci se justifie par le fait qu'à haut débit, les effets dus essentiellement à la dispersion chromatique de la fibre dégradent fortement la réception : ce qui occasionne des erreurs de transmission, donc une augmentation du TEB.

On constate aussi que plus la distance augmente le débit de transmission diminue

Globalement après implémentation des deux méthodes (détection directe et équilibrée), il ressort que les résultats sont concluants en terme de relation distance-débit et débit-TEB.

La distance affecte la qualité de la transmission. Plus la distance évolue plus le débit auquel nous sommes capables de transmettre baisse.

Parmi les facteurs qui détériorent la transmission nous pouvons évoquer les facteurs intrinsèques aux propriétés de la fibre en elle-même. Il s'agit principalement de :

- La dispersion chromatique : c'est le processus par lequel les impulsions optiques sont rallongées à mesure qu'ils se propagent au sein de la fibre optique. Si l'élargissement de l'impulsion est excessif, les impulsions individuelles ne pourront plus être distinguées par le récepteur.
- La PMD (Dispersion de mode de polarisation) : de façon naturelle la lumière se propage dans la fibre sous deux modes de polarisation, chaque mode voyageant à vitesses différentes. La différence de vitesse de propagation entre les deux modes entraîne un élargissement du signal émis. Ce qui entraîne une dégradation de la transmission induisant un TEB élevé.
- L'atténuation dans la fibre est phénomène limitatif des performances de transmission.
- Les effets non linéaires comme la fluctuation de l'indice de réfraction de la fibre ou les diffusions stimulés le long de la fibre induisent une dégradation de la transmission et de surcroit une augmentation d TEB.

Il convient de dire qu'il a été possible d'implémenter le CDMA sur une distance de 20 km à 60 km. Ce qui serait intéressant pour les réseaux d'accès. La méthode dite de détection directe est plus facile à implémenter car elle n'impose qu'au récepteur lors du décodage du signal reçu la prise en compte d'une seule des longueurs d'onde du code de l'émetteur. Les résultats obtenus utilisant cette technique sont globalement satisfaisants.

La méthode dite de détection équilibrée est plus complexe en implémentation car elle impose au récepteur la prise en compte de toutes les longueurs d'onde du code de l'émetteur. Son implémentation a pu être possible et les résultats concluants.

Conclusion générale et perspectives

L'objectif de ce mémoire de recherche était de proposer une implémentation de la technique d'accès CDMA non limitée en terme de ressources fréquentielles et temporelles comme solution alternative et/ou complémentaire pour les réseaux d'accès optiques.

Dans un premier temps, nous nous sommes évertués à introduire les réseaux optiques ce qui nous a permis de déboucher sur les différentes techniques d'accès multiple utilisées dans les communications en général et dans les systèmes optiques en particulier.

Le CDMA optique est considéré aujourd'hui comme un candidat potentiel pour les réseaux d'accès optiques c'est pourquoi cette technique continue de faire l'objet de nombreux travaux de recherche.

Dans ce mémoire, nous avons choisi d'implémenter un système OCDMA avec codage d'amplitude utilisant des codes ZCC.

Une évaluation des performances du système OCDMA a été réalisée à l'aide du logiciel Optisystem 7. Les résultats ont été concluants pour les simulations effectuées et ont été évalués en termes de diagramme de l'œil et de taux d'erreur binaire.

L'implémentation du CDMA dans les réseaux à base de fibre optique est un champ de recherche assez vaste. Ce thème pourrait être approfondi lors d'un sujet de doctorat si nous en avons l'opportunité. Il peut s'agir par exemple de :

- mener une étude approfondie en termes de nombres d'utilisateurs du réseau d'accès optiques OCDMA traité.
- proposer une implémentation d'une autre variante de l'OCDMA offrant de meilleurs débits sur des distances plus longues c'est-à-dire au-delà des 60 km
- l'associer à une autre méthode d'accès multiple et d'en étudier les performances.

En somme les possibilités d'ouverture du thème sont multiples et variées.

Bibliographie

- [1] M. F. O. SANYA, *Déploiement de réseaux optiques d'accès NGPON dans les métropoles de pays en développement : proposition de nouvelles techniques d'implémentation de l'OFDM*. Thèse de Doctorat, Université de Limoges and Université d'Abomey-Calavi, Octobre 2015.
- [2] NTAREME, *Planification du réseau d'accès pour l'amélioration de la rentabilité de l'infrastructure d'un réseau FTTN*. Thèse de master, Ecole polytechnique de Montréal, Décembre 2010.
- [3] A. JARRAY, *Planification et dimensionnement des réseaux optiques longues distances*. Thèse de Doctorat, Université de Montréal, Août 2009
- [4] F.B. OUAMBO, *"Optimisation d'un banc de test amplifier a10Gbits/s pour l'étude des technologies avancées de transmission par fibre optique"* Thèse de Master école supérieure de technologie, Université du QUEBEC. 15 Janvier 2008.
- [5] S. BENAMEUR *"La mise en œuvre, dans une chaîne de transmission optique, à haut débit, de filtres optiques à longueur d'onde centrale réglable"* Thèse de Doctorat, Universités de Limoges Juin 2015
- [6] D.S. LOUM, *Transmission radio haut débit multiservices sur fibre optique-application à l'optimisation de la capacité utilisateurs en emprises de transport*. Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes, Février 2012
- [7] F. SALIOU, *Etude des solutions d'accès optique exploitant une extension de portée*. Thèse de Doctorat, Paris-tech Télécom, Juin 2010
- [8] Y. ZOUINE, *Contribution par la simulation système à l'étude des contraintes des composants optoélectroniques sur la transmission optique en utilisant la technologie CDMA*. Thèse de Doctorat, Université de limoges Octobre 2005
- [9] J.L VERNEUIL, *Simulation de systèmes de télécommunication par fibre optique à 40 Gbits/s*. Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes, Novembre 2003

- [10] I FSAIFES, *Encodage et décodage temporels tout optique a réseaux de Bragg pour l'accès multiple* Thèse de Doctorat. Ecole Doctorale d'Informatique, Télécommunications et Electronique de Paris, Juin 2007
- [11] J. SALEHI, "Code division multiple-access techniques in Optical fibre networks. I. Fundamentals principles", IEEE Transactions. 37, no. 8, pp 824- 833, 1989.
- [12] C.SAIDA, *Etude des propriétés spectrales des réseaux de Bragg pour codeurs/décodeurs optiques*. Thèse de Doctorat, Université Badji Moktar Annabar, Juin 2018.
- [13] S. CORDETTE *Continuum de fréquences optiques pour l'application optique OCDMA*. Thèse de Doctorat Paris Tech. Juillet 2010
- [14] D. SAMIA, *Contribution à l'étude du système Hybride SCM SAC OCDMA*. Thèse de Doctorat. Université Sidi Bel Abes Juin 2018
- [15] S.AYOTTE. *Systèmes Optiques à accès multiple par répartition de codes : Etude des performances et de l'impact du bruit d'intensité* Université Laval Québec 2007
- [16] BOUREGGA, *Etude et caractérisation des composants tout optique pour l'accès multiple*. Thèse de Doctorat. Université de Tlemcen, 2015
- [17] P. GALLION, "Basics of Digital Optical Communication", Undersea Fiber Systems, Edited by J. Chesnoy, pp. 51-93, Academic Press, NewYork, 2002
- [18] M. LOURDIANE "CDMA à séquence directe appliqué aux systèmes de communication optique" Thèse de Doctorat Ecole nationale supérieure des Télécommunications 2005.
- [19] T.HUSSEIN, SA ALJUNID, HA FADHIL, RA AHMAD, N.M SAAD Development of a new code family based on SAC OCDMA system with large cardinality for OCDMA Network Article. Mai 2011

- [20] M.S.HEMDAN, TAHER M. BAZAN, K.M. HASSAN, “*Simulation of time-spreading wavelength-hopping OCDMA Systems*” International journal of light and electron optics vol 183 pp 1075-1084 fevrier 2019
- [21] J.KHAN, Y KHAN, F KHAN, W IMTIAS “*Implementation of spectral amplitude coding OCDMA system based on multicarrier optical signal*” Journal of applied emerging science 7(2) Février 2017
- [22] K UPADHYAY, S N Kumar, S Chaudhary, “A High Speed 100 Gbps MDM-SAC-OCDMA Multimode Transmission System for Short Haul Communication”, International journal of light and electron optics (October 2019),
- [23] RIMA. MATEM, S. A. ALJUNID, M. N JUNITA, C. B. M RASHIDI, ISRAA. SHIHAB AHMED “*A novel two-dimensional spectral/spatial hybrid code for optical code division multiple access system*” Journal of Theoretical and Applied Information Technology · Vol 97 no 3 February 2019
- [24] G. AHMED, A. DJEBBARI “New technique for construction of a zero cross correlation code” Optik 123 (2012) 1382– 1384 Juillet 2012
- [25] K. RAHIL, T. TOUTOU “*Analyse des performances des codes SAC-OCDMA dans la liaison de télécommunications optiques*” Thèse de master Département de génie électrique Université amira-bejaia Juin 2019
- [26] G. KAUR A. BHARDWAJ M. GANGWAR D. Srivastava “*Simulation and Analysis of Optimum Golomb Ruler based 2D Codes for OCDMA System*” International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 7, No. 7, 2016