



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université de Mostaganem Abdelhamid Ibn Badis (UMAB)
Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Electrique



UNIVERSITE
Abdelhamid Ibn Badis
MOSTAGANEM

Mémoire de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme de
Master en Télécommunications
Spécialité : Systèmes des Télécommunications

THEME

**Simulation sous Scilab d'un système hybride
OFDM /OCDMA**

Présenté par :

MAMAN LOURWANA ELHADJI ISSAKA Harouna

ABDOULAYI HAROUNA Abdoukarim

Président : M. ABED Mansour MCA UMAB

Examineur: Madame. BENOUDNINE Hadjira Professeur UMAB

Rapporteur : M. YAGOUBI Benabdellah Professeur UMAB

Année Universitaire 2023-2024

Remerciements

Premièrement, nous rendons grâce à Allah de nous avoir donné la santé, la force ainsi que le courage de faire face à toute difficulté.

Ce travail a été effectué au sein du département des sciences et technologies de l'université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem.

Nous ne saurions continuer sans témoigner notre vive reconnaissance à l'encontre de notre encadrant Mr YAGOUBI Benabdellah de nous avoir honoré par sa disponibilité, ses conseils et son engagement qui nous ont aidé à bien mener ce travail.

A tout le corps professoral de l'université Abdel Hamid Ibn Badis, particulièrement du département génie électrique, nous disons un grand merci de nous avoir transmis ce bagage intellectuel qui nous est d'une grande importance pour la suite de notre carrière.

Nos sincères remerciements et gratitudeux au président et membres du jury pour avoir accepté de diriger et de faire partie de notre jury malgré vos multiples occupations, veuillez trouver ici notre haute considération.

Dédicace

Je dédie ce travail à ...

Mes parents, pour leur amour inconditionnel et leur soutien indéfectible. Leurs sacrifices, et leurs orientations m'ont permis de surmonter chaque obstacle et de poursuivre mes rêves avec détermination. Ils sont le socle de ma réussite et l'inspiration constante dans ma vie.

Aux coépouses de ma mère pour leur soutien moral, sans oublier ma tante qui m'a toujours encouragé et n'a jamais cessé de croire en moi. Leurs présences rassurantes et leurs paroles bienveillantes ont été une source de force inestimable pour moi.

Mes frères et sœurs, pour l'amour et l'affection qu'ils m'apportent, leur complicité et leurs soutiens ont été essentiels tout au long de ce parcours.

À mon binôme, avec qui ce fut un honneur et un plaisir de mener ce travail. Notre collaboration a été enrichissante et marquante.

À tous les professeurs qui m'ont enseigné durant mon cursus, que je ne saurais tous citer mais que je n'oublierai jamais. Leurs dévouements et leurs passions pour l'enseignement m'ont inspiré à donner le meilleur de moi-même. Qu'Allah les récompense.

Enfin, à tous mes amis et à tous ceux qui ont été là pour moi, merci pour votre soutien et votre encouragement.

Maman Lourwana E.I Harouna

Dédicace

Je dédie cet ouvrage

A ma maman qui m'a soutenu et encouragé durant toutes ces années d'études.

Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

A mes grands-parents, particulièrement à ma grand-mère qui nous a qui quitté (Qu'Allah lui face miséricorde). Ils ont partagé avec moi tous les moments d'émotions et m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours

A mes tantes, mes frères et sœurs et toute ma famille qui m'ont donné de l'amour et de la vivacité

A tous mes professeurs et à tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès

A tous ce que j'aime

Merci !

ABDOULAYI HAROUNA Abdoulkarim

Résumé

Dans ce travail, nous simulons la technique hybride de Multiplexage par Division de Fréquence Orthogonale (OFDM) et d'Accès Multiple par Répartition en Code (CDMA) pour un réseau de communication par fibre optique. L'objectif de cette simulation est d'étudier la qualité du canal de transmission ainsi que de proposer une technique pour améliorer les débits afin de satisfaire la demande croissante en débits plus élevés. Il est bien connu que la combinaison de toute sous-porteuse multiplexée non orthogonale (SCM) avec (CDMA) nécessite une large bande passante, ce qui limite le nombre de sous-porteuses et, par conséquent, le nombre d'utilisateurs ainsi que les débits de données. En revanche, les sous-porteuses orthogonales, comme dans le cas de l'OFDM, qui sont étroitement espacées en raison de leur propriété d'orthogonalité ainsi que de leur faible évanouissement sélectif en fréquence, sont donc cruciales pour augmenter le nombre de sous-porteuses et, par conséquent, les débits de données ainsi que le nombre d'utilisateurs. Pour décrire plus en détail la technique OFDM/CDMA, nous avons réalisé une simulation avec le logiciel Scilab 5.5.2. Dans cette simulation, nous traitons un exemple simple d'un certain nombre d'utilisateurs utilisant un code orthogonal unipolaire pour la division de code, et l'algorithme de transformée de Fourier rapide (fft) pour la division de fréquence. Pour une simulation plus réaliste, nous avons introduit un bruit blanc gaussien centré (BBGC) dans le canal optique et étudié l'effet de ce bruit sur le diagramme de l'œil ainsi que sur la constellation. Enfin, nous avons calculé le taux d'erreur binaire (BER) en fonction de la puissance du BBGC pour étudier la qualité du système de canal optique OFDM/CDMA.

Mot clés : OFDM , OCDMA, BBGC, Code Optique, fft, BER, Scilab

Abstract:

In this work, we simulate the Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM) and the Code Division Multiple Access (CDMA) hybrid technique for optical fiber communication network. The aim of this simulation is to study the transmission channel quality as well as to suggest a technique to enhance the data-rates in order to try to satisfy the increasing demand in higher data-rates. It is well known that the combination of any non orthogonal subcarrier multiplexed (SCM) with (CDMA) needs a large bandwidth, hence a limited number of subcarriers and thus a limited number of users as well as a lower data rates. In contrast, orthogonal subcarriers such as the case of OFDM which are closely spaced due to their orthogonality property as well as to their reduced frequency selectivity fading are, therefore, crucial for increasing subcarriers and thus, increasing the data rates as well as the number of users. To describe in more detail the OFDM/CDMA technique, we have performed a simulation under the software Scilab 5.5.2. In this simulation, we treat a simple example of a certain number of users using a unipolar orthogonal code, for the code division, and the fast Fourier transform (fft) algorithm for the frequency division. For more realistic simulation, we have introduced a centered additive white noise (AWGN) in the optical channel and studied the effect of this noise on the eye-diagram as well as on the constellation. Finally, we have computed the BER with respect to the AWGN power to study the OFDM/CDMA Optical channel system quality.

ملخص:

في هذا العمل، قمنا بمحاكاة التقنية الهجينة لتعدد الإرسال بتقسيم التردد المتعامد (OFDM) والوصول المتعدد بتقسيم الشفرة (CDMA) المطبق على شبكات اتصالات الألياف الضوئية. الهدف من هذه المحاكاة هو دراسة جودة قناة الإرسال بالإضافة إلى اقتراح تقنية لتحسين معدلات التدفق من أجل تلبية الطلب المتزايد على معدلات تدفق أعلى. من المعروف أن دمج أي موجة حاملة فرعية متعددة الإرسال غير متعامدة (SCM) مع (CDMA) يتطلب مساحة طيفية كبيرة، مما يحد من عدد الموجات الحاملة الفرعية، وبالتالي عدد المستخدمين وكذلك سرعة تدفق المعطيات. على النقيض من ذلك، فإن الموجات الحاملة الفرعية المتعامدة، كما في حالة OFDM، تكون متباعدة بشكل أكثر ترابطاً. كما أنه نظراً لخاصية التعامد وكذلك التخميد الانتقائي للتردد المنخفض، فإن ذلك يعد أمراً بالغ الأهمية لزيادة عدد الموجات الحاملة الفرعية، وبالتالي الرفع من قيم التدفقات بالإضافة إلى عدد المستخدمين. لوصف تقنية OFDM/CDMA بمزيد من التفصيل، أجرينا محاكاة باستخدام برنامج Scilab 5.5.2 في هذه المحاكاة، نتعامل مع مثال بسيط لعدد من المستخدمين الذين يستخدمون الشفرات المتعامدة أحادية القطب لتقسيم القناة تشفيرياً بين عدة مستخدمين، وتحويل فوربييه السريع (fft) لتقسيم التردد. للحصول على محاكاة أكثر واقعية، أدخلنا الضوضاء الغوسية البيضاء المركزة (BBGC) على المعلومات المرسله عبر القناة البصرية ودرسنا تأثيرها على مخطط العين وكذلك رسومات الكوكبة. أخيراً، قمنا بحساب معدل الخطأ في البتات (BER) بدلالة طاقة الضوضاء لدراسة جودة نظام القنوات الضوئية من نوع OFDM/CDMA

Sommaire

Remerciement.....	i
Dédicace.....	ii
Dédicace.....	iii
Résumé	iv
Sommaire.....	vii
Table des illustrations.....	viii
Liste des abréviations.....	x

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre 1 : Modulations Numériques, M-QAM.....	2
--	----------

1.1. Introduction	3
1.2. Rappels et définitions.....	3
1.2.1. Signal Analogique	3
1.2.2. Signal Numérique	4
1.2.3. Quelques définitions des paramètres :	4
1.3. Principes de Modulation Numérique	5
1.3.1. Critères de choix d'une modulation numérique	7
1.4. Modulation QAM	7
1.4.1. Quelques propriétés de la QAM.....	8
• L'efficacité spectrale de la QAM :	8
• La bande passante	9
1.5. Principe de la QAM.....	9
1.6. Les Constellations M_QAM	11
1.7. MODULATION ET DEMODULATION DE LA QAM	12
1.8. APPLICATIONS DE LA MODULATION D'AMPLITUDE EN QUADRATURE	13
1.9. Conclusion	14

Chapitre2 : ACCES MULTIPLE PAR REPARTITION DE CODE OPTIQUE (OCDMA)	15
---	-----------

II.1. INTRODUCTION.....	16
II.2. TECHNIQUE DE L'ETALEMENT DE SPECTRE : CDMA	16
II.2.1. Principe de l'étalement de spectre	16

II.2.2.	Avantage de l'étalement de spectre	18
II.3.	LE CDMA OPTIQUE	18
II.3.1.	Avantage du CDMA optique	19
II.3.2.	ARCHITECTURE DU OCDMA.....	20
II.4.	Classification des systèmes OCDMA	20
II.4.1.	OCDMA cohérent	20
II.4.2.	OCDMA non cohérent	20
II.4.3.	OCDMA Synchrone et Asynchrone.....	21
II.5.	Les différentes méthodes d'encodage OCDMA	21
II.5.1.	OCDMA par encodage temporel	21
II.5.2.	OCDMA par encodage spectral de phase.....	22
II.5.3.	OCDMA par encodage spectral d'amplitude.....	23
II.6.	DÉFINITION DU SAC-OCDMA	23
II.7.	ENCODAGE ET DÉCODAGE D'UN SIGNAL SAC-OCDMA	24
II.7.1.	ENCODAGE	24
•	Encodage avec masque d'amplitude	24
•	Encodage avec de réseaux de Bragg	24
•	Encodage à l'aide de démultiplexeurs et multiplexeurs optiques.....	25
II.7.2.	Décodage en SAC OCDMA.....	25
II.8.	LE MULTIPLEXAGE DE SOUS-PORTEUSES OU SUB-CARRIER MULTIPLEXING (SCM)	26
II.8.1.	Les avantages de multiplexage de sous porteuses SCM	26
II.8.2.	Le Système Hybride SCM/OCDMA	26
II.9.	Construction de codes optiques unipolaires.....	27
II.9.1.	Les codes optiques orthogonaux OOC	27
•	Représentation.....	27
II.10.	CONCLUSION	28
CHAPITRE 3 :	OFDM	29
III.1.	INTRODUCTION	30
III.2.	Historique.....	30
III.3.	EFFETS DES MULTI TRAJETS	30
III.3.1.	Effet positif des multi trajets.....	31
III.3.2.	Effet négatif des multi trajets.....	31
III.4.	Principe et fonctionnement de l'OFDM :	32
III.4.1.	Modulation OFDM.....	32
III.4.2.	DÉMODULATION OFDM	33
III.5.	Problème Des Interférences	35

III.5.1.	Interférence entre symboles (ISI)	35
III.5.2.	Interférence entre sous porteuses (ICI)	36
III.5.3.	Intervalle de garde	36
III.5.4.	Préfixe cyclique.....	37
III.6.	Notion d'orthogonalité	37
III.7.	LA CHAINE DE TRANSMISSION OFDM.....	38
III.8.	Avantages et inconvénients de l'OFDM	38
	• Avantages	38
	• Les inconvénients	39
III.9.	CONCLUSION	39
CHAPITRE 4 : Simulation sous Scilab d'un système OFDM/OCDMA		40
IV.1.	INTRODUCTION	41
IV.2.	LOGICIEL SCILAB	41
IV.3.	DESCRIPTION DU SYSTEME.....	42
IV.4.	TRANSMISSION.....	43
IV.4.1.	La constellation.....	43
IV.4.2.	La modulation 16-QAM	44
IV.4.3.	Encodage du signal	45
	• Signal transmis	46
IV.5.	Réception.....	47
IV.5.1.	Démodulation QAM	47
	• Diagramme de l'œil de la constellation : canal idéal	48
	• Bruit d'écart type=0,01	48
	• Bruit d'écart type=0,1	50
	• Bruit d'écart type=0,27	51
IV.6.	Evolution du BER en fonction de l'écart type.....	52
IV.7.	Conclusion	52
Conclusion générale		53
Bibliographies		54

TABLE DES ILLUSTRATIONS :

<i>Figure 1 : Signal analogique</i>	3
<i>Figure 2: Exemple d'un signal numérique</i>	4
<i>Figure 3:Forme générale d'un modulateur</i>	6
<i>Figure 4: Position d'un symbole dans le plan de Fresnel</i>	6
<i>Figure 5: Définition d'une constellation numérique</i>	7

Figure 6: Bande passante	9
Figure 7: Schéma synoptique d'un modulateur en quadrature.....	9
Figure 8:: Exemple de codage.....	10
Figure 9: La constellation de points.....	11
Figure 10: Constellation de la 16QAM ET 32QAM.....	12
Figure 11: Mappage de séquence de bits pour un signal 16QAM.....	12
Figure 12: Modulateur M-QAM.....	13
Figure 13: Démodulateur M-QAM.....	13
Figure 14: Principe de l'étalement de spectre	17
Figure 15: Diagramme du codage des données d'un utilisateur	17
Figure 16: Architecture OCDMA	20
Figure 17: Représentation schématique du DS-OCDMA	22
Figure 18: Représentation schématique du SPE-OCDMA [11]	22
Figure 19:: Principe de l'encodage spectral SAC-OCDMA.....	23
Figure 20:: Technique de codage spectral en SAC – OCDMA	23
Figure 21: Encodage SAC-OCDMA effectué avec un masque d'amplitude.....	24
Figure 22: Réseaux de Bragg utilisés en transmission pour encodage SAC-OCDMA.....	25
Figure 23: Encodage SAC-OCDMA pour 2 utilisateurs à base d'un démultiplexeur et de deux multiplexeurs	25
Figure 24: Diagramme de bloc du système SCM/OSCDM avec technique de décodage direct	27
Figure 25: Effet positif de la propagation multi trajets	31
Figure 26: Effet négatif de la propagation multi trajets.....	31
Figure 27: Représentation fréquentielle et temporelle d'un signal OFDM.....	32
Figure 28: Schéma de principe de la modulation OFDM	33
Figure 29: Modulateur OFDM	33
Figure 30: Occupation de la bande passante	34
Figure 31: Schéma du principe d'un démodulateur OFDM	34
Figure 32: Démodulateur OFDM	35
Figure 33: Interférence inter-porteuse en OFDM dans le domaine fréquentiel	36
Figure 34: Illustration de l'effet de l'intervalle de garde précédent chaque symbole OFDM.....	37
Figure 35: Préfixe cyclique	37
Figure 36: Logo du logiciel Scilab.....	41
Figure 37: Bloc du système OFDMA/OCDMA	42
Figure 38: Les données à transmettre (signal binaire) =512bits	43
Figure 39: Représentation des symboles binaire par la constellation à la transmission.....	44
Figure 40:: Signal modulé 16-QAM	44
Figure 41: Le signal encodé après la IFFT	46
Figure 42: Signal transmis	46
Figure 43: la constellation De-QAM en canal idéal	47
Figure 44: Diagramme de l'œil dans le cas idéal.....	48
Figure 45: (x) constellation a la transmission et (o) constellation reçue bruité : écart type de 0,01. ...	49
Figure 46: diagramme de l'œil : écart type du bruit= 0,01.....	49
Figure 47: (x) constellation a la transmission et (o) constellation reçue bruité : écart type de 0,1	50
Figure 48: diagramme de l'œil : écart type du bruit= 0,1.....	50
Figure 49: (x) constellation a la transmission et (o) constellation reçue bruité : écart type de 0.27 ...	51
Figure 50: diagramme de l'œil : écart type du bruit= 0,27.....	51
Figure 51: Courbe de l'évolution du BER en fonction de la variance du bruit	52

Listes des abréviations

AMRCO : Accès Multiple par Répartition de Codes optiques

A/N : Convertisseur analogique-Numérique

CDMA : Code Division Multiples Access

CP: Cyclic Prefix

FBG: Fiber Bragg Grating

FDM: Frequency Division Multiplexing

FDMA : Frequency Division Multiple Access

FFT: Fast Fourier Transform

FHSS: Frequency Hopping Spread Spectrum

IAM: Interférence d'Accès Multiple

ICI : Interference inter-carrier

IFFT : Inverse Fast Fourier Transform

ISI : Interference inter-symboles

MC : Multi Carrier

N/A : Convertisseur Numérique-Analogique

OCDMA : Optical Code Division Multiple Access

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access

OOC: Optical Orthogonal Codes

PSK: Phase-Shift Keying

QAM: Quadrature Amplitude Modulation

RF : Radio Fréquence

SAC: Amplitude Spectral Coding

SCM: Subcarrier Multiplexing

TDMA: Time Division Multi Access

TEB : Taux d'Erreurs Binaires

TFD : Transformée de Fourier Discrète

TPE: Temporal Phase Encoding

WDM: Wavelength Division Multiplexing

WDMA : Wavelength Division Multiple Access


Introduction générale

Face à la demande croissante en termes de vitesse et de capacité de communication dans les réseaux optiques, la diversité des techniques d'accès devient nécessaire. Les réseaux optiques offrent la possibilité de partager la même bande passante de la fibre optique entre plusieurs utilisateurs. Parmi ces innovations, le multiplexage par division orthogonale de la fréquence (OFDM) et l'accès multiple par répartition en code optique (OCDMA) se distinguent par leur potentiel à optimiser la transmission des données. L'OCDMA peut permettre à plusieurs utilisateurs de partager simultanément le même canal optique sans interférences significatives à l'aide des propriétés de la transmission optique et l'utilisation des codes optiques orthonormés.

Compte tenu des inconvénients de capacité de multiplexage de l'OCDMA et la confrontation continue à des interférences de la part des utilisateurs non désirés dont elle fait face, le multiplexage par répartition orthogonale de fréquence s'installe comme solution à ce problème. L'OFDM permet de répartir un signal de données à haut débit en plusieurs sous-signaux à faible débit, transmis simultanément sur des sous-porteuses orthogonales. Cette approche réduit les interférences inter symboles et améliore la fiabilité contre les distorsions du canal. Cet avantage a conduit à de nombreuses applications de l'OFDM dans des réseaux large bande sans fil à débit binaire.

Notre travail se concentre sur la conception et la simulation d'un système hybride OFDM/OCDMA.

L'objectif principal est d'exploiter les avantages que nous offrent les techniques de l'OFDM et de l'OCDMA ensemble pour développer un système de communication plus efficace et capable de gérer des débits de données élevés. Pour ce cela, nous avons utilisé une simulation sous Scilab, un logiciel libre, afin d'analyser les performances du système proposé. Nous avons inclus des niveaux de puissances de bruit pour évaluer la résistance du système dans des conditions réalistes.



Chapitre 1 : Modulations Numériques, M-QAM

I.1. Introduction

L'évolution vers le numérique a engendré une grande transformation des communications qui nous renvoie vers une multitude de technologies à la pointe de l'ère numérique. Elle nous a permis d'avoir des réseaux à haut débit et des communications sans fil, grâce à la modulation numérique qui est un élément essentiel de chaque chaîne de transmission. Au cœur de cette technologie se trouve la modulation d'amplitude en quadrature (QAM), une technique émergente se vantant d'une efficacité de largeur de bande inégalée parmi les signaux numériques de câble, ce qui fait de cette dernière la plus répandue.

Dans ce chapitre, il est essentiel de comprendre les fondements de la modulation numérique, préalable à l'étude de la QAM. D'explorer en profondeur la QAM et ses performances dans le cadre plus large de la modulation numérique et préciser leurs performances, et comparer les caractéristiques de ces différents types

Ainsi, ce chapitre vise à éclairer les voies par lesquelles la QAM pourrait évoluer pour devenir un format dominant de modulation du multiplex numérique, tout en répondant aux défis et aux exigences croissantes des systèmes de communication modernes.

I.2. Rappels et définitions

I.2.1. Signal Analogique

Un signal est la représentation physique d'une information à transmettre.

Par définition, un signal analogique est une fonction continue dans le du temps ($x(t)$). Il est également continu en amplitude, ainsi il peut prendre toute les valeurs possibles.

Un signal analogique périodique est caractérisé par la période T (nombre de cycles par seconde), son amplitude A , sa fréquence $f = 1 / T$ et de formule : $s(t) = A \sin(2\pi ft + \varphi)$ [3]

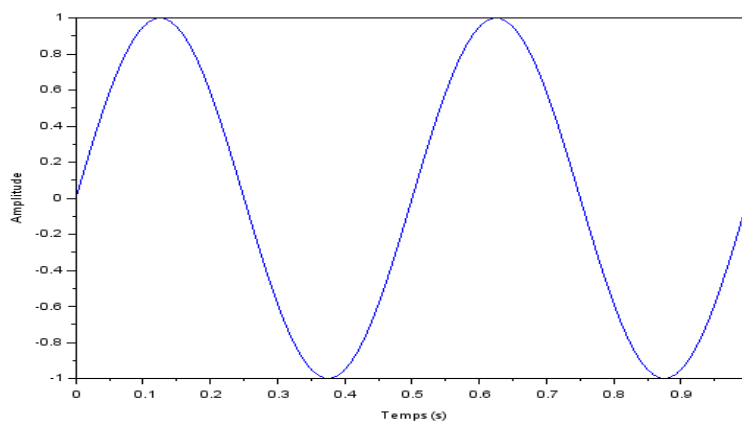


FIGURE 1 : SIGNAL ANALOGIQUE

I.2.2. Signal Numérique

Un signal numérique est un ensemble discret (discontinu) d'informations. Il varie de manière discrète au cours du temps et représente des données en utilisant une série sous forme de séquences de nombres binaires (0 et 1).

Les ordinateurs ne comprenant que du binaire, un signal analogique doit être converti en signal numérique binaire par discrétisation afin de pouvoir être utilisé et étudié d'où le signal numérique est au centre de notre étude.

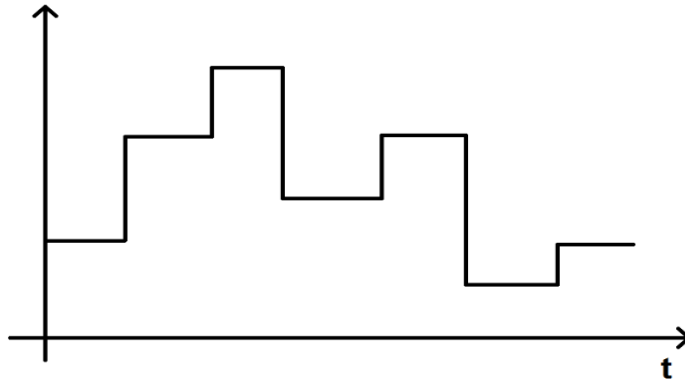


FIGURE 2: EXEMPLE D'UN SIGNAL NUMERIQUE

I.2.3. Quelques définitions des paramètres :

- Un symbole est un élément d'un alphabet. Si M est la taille de l'alphabet, le symbole est alors dit M -aire. Le symbole est dit binaire lorsque $M=2$. En groupant, sous forme d'un bloc, n symboles binaires indépendants, on obtient un alphabet de $M=2^n$ symboles M -aire. Ainsi un symbole M -aire véhicule l'équivalent de $n=\log_2 M$ bits. [1]
- La rapidité de modulation (R) se définit comme étant le nombre de changements d'états par seconde d'un ou de plusieurs paramètres modifiés simultanément.

$$R=1/T_s \text{ [BAUDS]}. \quad \text{AVEC } T_s : \text{ DUREE D'UN SYMBOLE} \quad (1)$$

- Le débit binaire (D) se définit comme étant le nombre de bits transmis par seconde. Il sera égal ou supérieur à la rapidité de modulation selon qu'un changement d'état représentera un bit ou un groupement de bits. [1]

$$D=1/T_b \text{ [BITS PAR SECONDE]}. \quad (2)$$

- La qualité d'une liaison est liée au taux d'erreur par bit :

$$\text{BER} = \frac{\text{nombre de bits erronés}}{\text{nombre de bits total}} \quad (3)$$

- L'efficacité spectrale d'une modulation se définit par le paramètre η :

$$\eta = \frac{D}{B} \quad [\text{bit/sec/Hz}] \quad (4)$$

Avec D: débit binaire et B : largeur de la bande occupée par le signal modulé.

Pour un signal utilisant des symboles M-aires, on aura :

$$\eta = \frac{1}{T_b \cdot B} \log_2 M \quad [\text{bit/sec/Hz}] \quad (5)$$

Remarque: Pour B et T_b donnés, l'efficacité spectrale augmente ce qui est logique, avec le nombre de bit/symbole $n = \log_2 M$. C'est en effet la raison d'être de la modulation M-aire.

La qualité d'une transmission sera définie par le rapport signal sur bruit, Ce rapport peut être également donné en décibels (dB) par la formule:

$$SNR_{dB} = 10 \cdot \text{LOG} \frac{\text{Puissance du signal}}{\text{Puissance du bruit}} \quad (6)$$

I.3. Principes de Modulation Numérique

Dans la modulation numérique, le signal se présente sous la forme d'une onde de base régulière tel que : $s(t) = A \sin(2\pi f t + \varphi)$

Le message à transmettre est issu d'une source binaire. Le signal modulant, obtenu après codage, est un signal en bande de base, éventuellement complexe, qui s'écrit sous la forme

$$C(t) = \sum_k c_k \cdot g(t - kT) \rightarrow C_k(t) = \sum_k (a_k(t) + j b_k(t)) g(t - kT_s) \quad (7)$$

Avec: $c_k = a_k + j b_k$

La fonction $g(t)$ est une forme d'onde qui est prise en considération dans l'intervalle $[0, T]$ [puisque t doit vérifier la relation:

$$KT \leq t < (K + 1)T$$

Après la modulation, ce signal se transforme en un signal modulé $m(t)$ tel que :

$$m(t) = a(t) \cdot (\cos(\omega_0 t + \varphi_0)) - b(t) \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad [1] \quad (8)$$

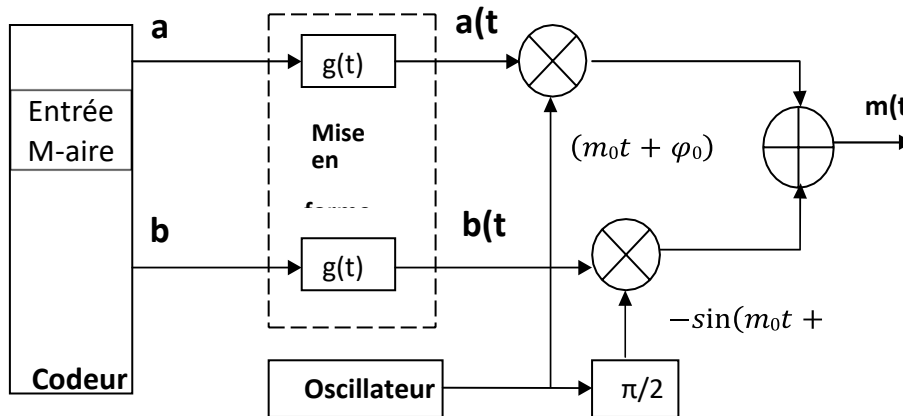


FIGURE 3: FORME GENERALE D'UN MODULATEUR

Les différents types de modulations sont définis par les alphabets décrits ci-dessus et par la fonction $g(t)$.

A chaque symbole émis correspond un signal élémentaire de la forme:

$$m_k(t) = a_k \cdot g(t - KT) \cdot (\omega_0 t + \varphi_0) - b_k \cdot g(t - KT) \cdot (\omega_0 t + \varphi_0) \quad (9)$$

Cette forme peut être représentés dans un espace à deux dimensions dont les vecteurs de base sont:

$(t - KT)\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ et $-g(t - KT)\sin(\omega_0 t + \varphi_0)$ (Décomposition de Fresnel)

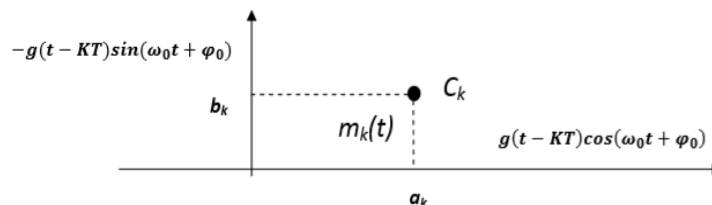


FIGURE 4: POSITION D'UN SYMBOLE DANS LE PLAN DE FRESNEL

Le signal modulé $m(t)$ véhicule des informations distinctes à travers $a_k(t)$ et $b_k(t)$ qui sont deux signaux en bande de base appelés respectivement *composante en phase* (I en anglais) et *composante en quadrature* (Q en anglais).

La récupération de $a_k(t)$ et $b_k(t)$ sera possible uniquement si ces deux signaux sont de bande limitée à l'intervalle $[-B, B]$ avec $B < f_0$ (Condition de Rayleigh).

Une représentation dans le plan complexe qui fait correspondre à chaque signal élémentaire un point $C_k = A_k + jB_k$ permet de différencier chaque type de modulation. L'ensemble de ces points associés aux symboles porte le nom de constellation

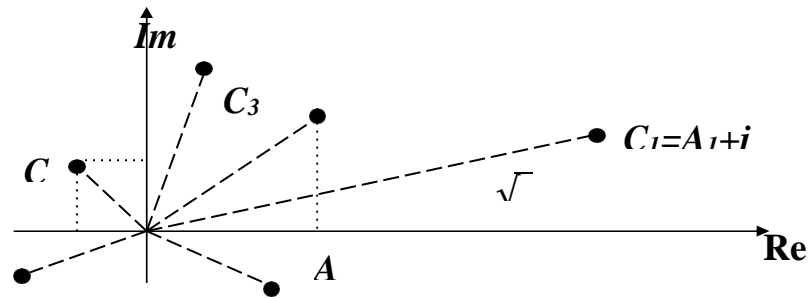


FIGURE 5: DEFINITION D'UNE CONSTELLATION NUMERIQUE

Le choix de la répartition des points dépend des critères suivants :

- Afin de remarquer la distinction de deux symboles, il faut respecter une certaine distance minimale d_{min} , entre les points représentatifs de ces symboles. La distance minimale entre tous les symboles est : $d_{min} = \text{Max}_{i;j}(d_{ij})$
- A chaque symbole émis correspond un signal élémentaires $m_k(t)$ et par là même une énergie nécessaire à la transmission de ce symbole. Dans la constellation, la distance entre un point et l'origine est proportionnelle à la racine carrée de l'énergie qu'il faut fournir pendant l'intervalle de temps $[kT, (k+1)T[$ pour émettre ce symbole.

Les deux critères évoqués ci-dessus sont antagonistes puisque l'on serait tenté d'une part d'éloigner les symboles au maximum pour diminuer la probabilité d'erreur et d'autre part, de les rapprocher de l'origine pour minimiser l'énergie nécessaire à la transmission. [1]

I.3.1. Critères de choix d'une modulation numérique

Les critères de choix d'une modulation sont [2]:

- Le taux d'erreur sur les bits.
- L'efficacité spectrale
- Rapport E_b/N_0
- Le débit binaire

I.4. Modulation QAM

« Quadrature Amplitude Modulation (QAM) » est la combinaison de la modulation d'amplitude et de phase.

Ce type de modulation consiste à prendre deux porteuses de même fréquence, mais déphasées l'une par rapport à l'autre de 90° (quadrature). Ces porteuses sont ensuite modulées en amplitude, sans porteuse, puis additionnées l'une avec l'autre.

La notation générale des axes est :

- **I** (en phase) pour l'axe représentant l'origine.

➤ Q (en *quadrature*) pour l'axe déphasé de 90°, en avance par rapport à l'axe I.

La modulation d'amplitude en quadrature M-QAM est devenue plus répandue dans les systèmes de transmission, tant en vidéo qu'en modulation de données. Avec ses M bits par symbole numérique (M bits/symbole), elle offre à l'efficacité de largeur de bande la plus élevée aujourd'hui disponible parmi les signaux numériques de câble. Les espérances sont que M-QAM évoluera pour devenir un format dominant de modulation du multiplex numérique. [3, 3]

I.4.1. Quelques propriétés de la QAM

- **L'efficacité spectrale de la QAM :**

On définit l'efficacité spectrale ou débit spécifique par le débit binaire passant dans un hertz de bande. La bande de fréquence occupée étant chiffrée par l'Occupation Spectrale du Canal centré sur la fréquence porteuse f_p , dite OS Canal.

L'efficacité spectrale ou débit spécifique est donc :

$$D_{spé} = \frac{D_b}{OS \text{ canal}} \quad [\text{bits/sec/Hz}] \quad (10)$$

D_b : Débit binaire, OS canal : Occupation Spectrale du Canal

Entre autre nous avons des exemples classique tel que :

- Les transmissions par modem sur ligne téléphonique, sauf les modems qui utilisent la modulation de fréquence en binaire (FSK-2)
- La télévision par satellite en numérique (QPSK ou 4-QAM).
- La télévision « câblée » urbaine (16-QAM, 256-QAM).

Pour une même rapidité de modulation $R=1/T$, le débit binaire $D_b=1/T_b$ de la M-QAM est multiplié par $n = \log_2(M)$ par rapport celui de la 2-QAM. Autrement dit, pour une largeur de bande B donnée, l'efficacité spectrale $\eta=D/B$ est multiplié par : $n = \log_2(M)$. [1]

TABEAU 1: LE GAIN EN DEBIT BINAIRE ET EN EFFICACITE SPECTRALE

<i>n</i>	<i>M=2ⁿ</i>	<i>Modulation</i>	<i>Debit Binaire</i>	<i>Efficacité Spectrale : η</i>
1	2	2QAM	<i>D</i>	η
2	4	4QAM	2 <i>D</i>	2 η
4	16	16-QAM	4 <i>D</i>	4 η
6	64	64-QAM	6 <i>D</i>	6 η
8	128	128-QAM	8 <i>D</i>	8 η

Le tableau ci-dessus montre le gain obtenu sur le débit binaire et sur l'efficacité spectrale pour diverses modulations M-QAM, ceci pour une même rapidité de modulation. L'intérêt d'augmenter *M*, même au prix d'une complexité accrue, est évident. [1]

● **La bande passante**

La bande passante notée B ou BP est la largeur l'intervalle de fréquence, mesurée en hertz, d'une plage de fréquence $f_2 - f_1$ pour lequel l'atténuation est inférieure à 3 Db.

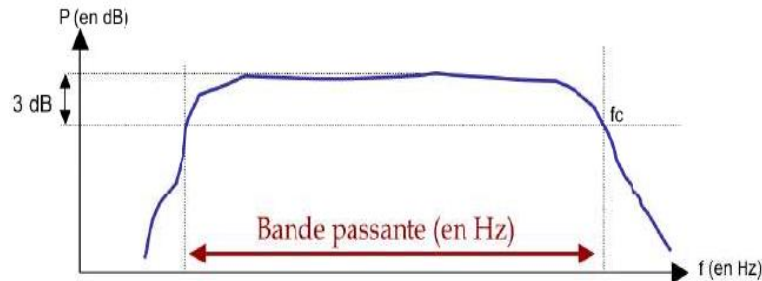


FIGURE 6: BANDE PASSANTE

Soit à transmettre des données binaires au rythme f_b [b/s]. Chaque bit a donc une durée $T_b = 1/f_b$. La bande passante minimale pour transmettre ces données appelée bande de NYQUIST est $(1/2.T_b) = (f_b/2)$. [3]

I.5. Principe de la QAM

Le Schéma synoptique d'un modulateur QAM est représenté sur la figure ci-dessous. Les deux chemins à l'additionneur désigné typiquement sous le nom du 'I' (en phase), et du 'Q' (quadrature).

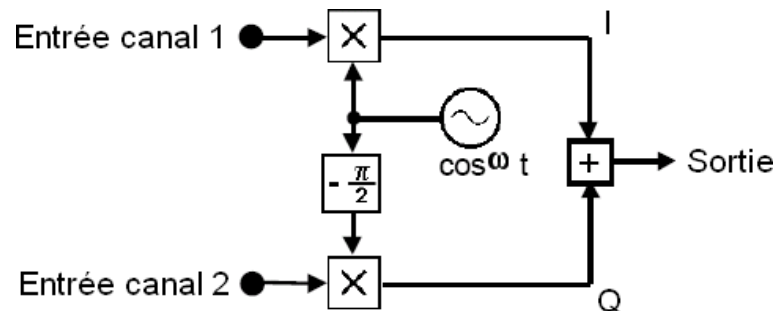


FIGURE 7: SCHEMA SYNOPTIQUE D'UN MODULATEUR EN QUADRATURE

Cette modulation permet de diminuer la largeur spectrale du signal modulé en utilisant deux ondes porteuses. Cette technique consiste à diviser le signal informatif $S(t)$ en deux signaux $S_1(t)$ et $S_2(t)$ modulant deux porteuses $S_{p1}(t)$ et $S_{p2}(t)$ de même fréquence et en quadrature de phase :

$$S_1(t) = A. (mt + \varphi) \quad \text{et} \quad S_2(t) = A. \text{si}(mt + \varphi) \quad (11)$$

Les signaux $S_1(t)$ et $S_2(t)$ peuvent être constitués en prenant deux composantes de $s(t)$: données paires et impaires, la composante de droite et la composante de

gauche d'un signal stéréophonique. Le dédoublement du signal à la sortie du codeur permet de diviser par deux la rapidité de modulation et donc de diminuer la largeur spectrale par le même facteur. Par conséquent, on retrouve une occupation spectrale du signal modulé identique à une modulation BLU du signal initial $s(t)$. Ce type de modulation est très utilisé dans le domaine de la modulation des signaux numériques. [4]

- Prenons par exemple un signal modulé QAM avec 3 bits transmis par baud. Dans notre exemple, nous prendrons 2 amplitudes combinées avec 4 décalages de phase différents. La table de correspondance pourra être du type :

TABLEAU 2: TABLE DE CORRESPONDANCE

Groupe de bit	Amplitude	Décalage de phase
000	1	0
001	2	0
010	1	$\pi/4$
011	2	$\pi/4$
100	1	$\pi/2$
101	2	$\pi/2$
110	1	$3\pi/4$
111	2	$3\pi/4$

Exemple de codage de la suite binaire : 1 0 0 0 0 1 0 1 1 1 0 (figure) :

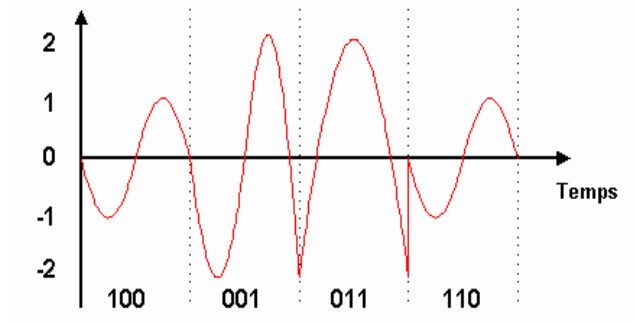


FIGURE 8:: EXEMPLE DE CODAGE

Les combinaisons possibles en modulations QAM sont souvent représentées par une constellation de points représentant chacun un groupe de bits.

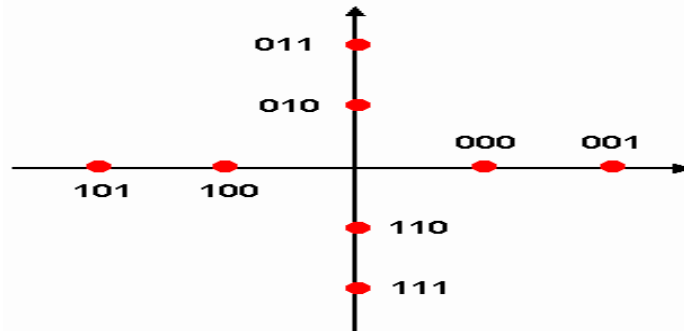


FIGURE 9: LA CONSTELLATION DE POINTS

Dans la constellation QAM, l'éloignement de chaque point par rapport à l'origine indique l'amplitude, l'angle et le décalage de phase. Les combinaisons possibles en modulations QAM sont souvent représentées par une constellation de points représentant chacun un groupe de bits, dans notre exemple ci-dessus 3 bits par baud.

Remarque: Si on augmente le nombre de points de la constellation, la largeur du canal d'émission ne change pas, puisque le nombre de symboles émis par seconde (bauds) n'apas changé.

Dans la pratique, nous augmentons le débit sans augmentation de bande passante, mais au prix d'une relative fragilité du signal. En effet, les points de la constellation étant plus rapprochés, ils seront plus difficiles à décoder en cas de bruitage de la ligne. [1]

I.6. Les Constellations M QAM

Les symboles a_k et b_k prennent respectivement leurs valeurs dans deux alphabets à M éléments (A_1, A_2, \dots, A_M) et (B_1, B_2, \dots, B_M) donnant ainsi naissance à une modulation possédant un nombre $E = M^2$ états. Chaque état est donc représenté par un couple (a_k, b_k) ou ce qui revient au même par un symbole complexe $c_k = a_k + j b_k$. [3]

La modulation d'amplitude en quadrature (QAM) est caractérisée par des points de constellation disposés en grille carrée avec un espacement équidistant. Bien que les données soient binaires, les formes courantes de QAM, telles que 16QAM ou 64QAM, adoptent une constellation formant un carré avec un nombre de points correspondant à une puissance de 2, comme 4, 16, 64, etc.

En optant pour des formats de modulation d'ordre supérieur, qui comportent davantage de points sur la constellation, il devient possible de transmettre plusieurs bits par symbole. Cependant, cette approche rapproche les points de la constellation, accroissant ainsi la sensibilité au bruit et aux erreurs de données.

Les formats d'ordre supérieur offrent la possibilité de transmettre plus de bits par symbole grâce à un nombre accru de points dans la constellation. Cependant, leur inconvénient réside dans une sensibilité accrue au bruit. Par conséquent, les versions de QAM d'ordre supérieur sont employées uniquement lorsque le rapport signal/bruit est suffisamment élevé.

Le diagramme de constellation pour un signal 16QAM illustre les valeurs associées aux différents états, démontrant comment un flux continu de bits peut être regroupé en quatre pour former une séquence. Cet exemple (figure 11) met en lumière le fonctionnement de la QAM. [28]

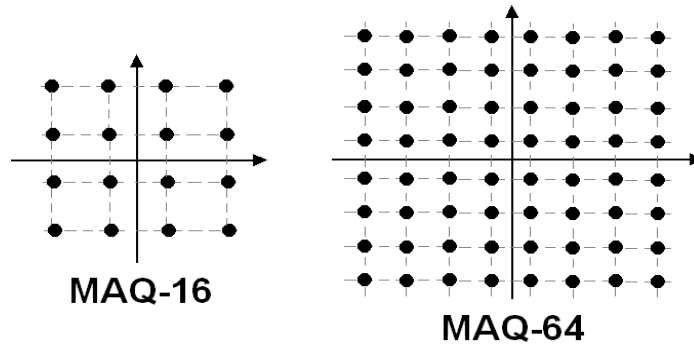


FIGURE 10: CONSTELLATION DE LA 16QAM ET 32QAM

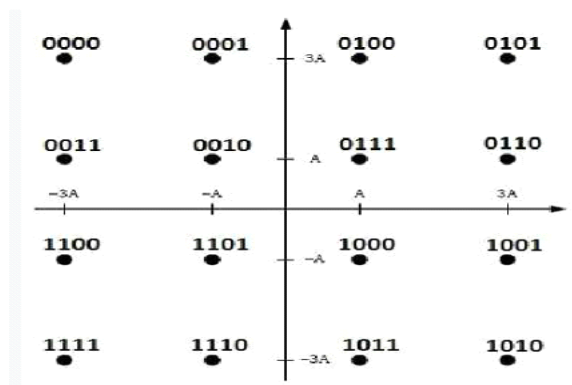


FIGURE 11: MAPPAGE DE SEQUENCE DE BITS POUR UN SIGNAL 16QAM

Le diagramme de constellation évolue en fonction du signal. Si le signal est perturbé, le diagramme de constellation est alors déformé. Suivant la déformation, il est possible d'identifier le type d'interférences qui pollue l'information.

I.7. MODULATION ET DEMODULATION DE LA QAM

Lorsque le signal $m(t)$ est obtenu par une combinaison de deux porteuses en quadrature modulées en amplitude par des symboles a_k et b_k indépendants, cela simplifie le modulateur et le démodulateur.

En effet, pour le modulateur le train binaire entrant $\{i_k\}$ est facilement divisé en deux trains $\{a_k\}$ et $\{b_k\}$.

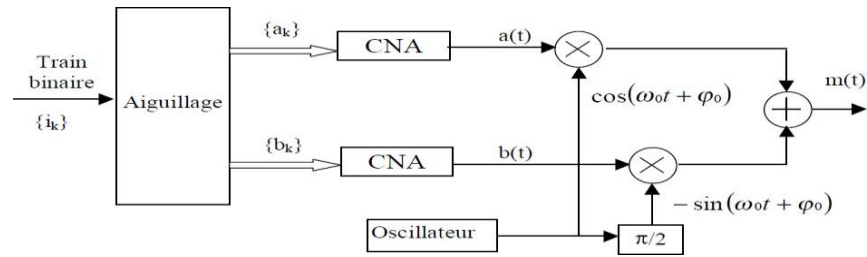


FIGURE 12: MODULATEUR M-QAM

La réception d'un signal QAM fait appel à une démodulation cohérente et par conséquent nécessite l'extraction d'une porteuse synchronisée en phase et en fréquence avec la porteuse à l'émission.

Le signal reçu est démodulé dans deux branches parallèles, sur l'une avec la porteuse en phase et sur l'autre avec la porteuse en quadrature. Les signaux démodulés sont convertis par deux CAN, puis une logique de décodage détermine les symboles et régénère le train de bits reçus. Le synoptique du démodulateur M-QAM est très voisin de celui proposé pour la démodulation MDP. [4]

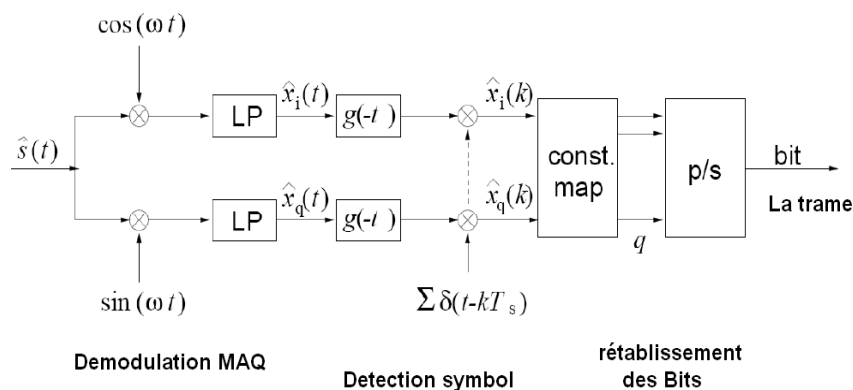


FIGURE 13: DEMODULATEUR M-QAM

1.8. APPLICATIONS DE LA MODULATION D'AMPLITUDE EN QUADRATURE

Les domaines d'applications des diverses techniques de transmission numérique que nous venons d'exposer sont très variés. Quelques-uns d'entre eux sont :

- **Modems et réseaux câblés** : La QAM est couramment utilisée dans les modems DSL (Digital Subscriber Line) et les modems câble (DOCSIS). Elle permet une transmission efficace des données sur des lignes téléphoniques et des réseaux de télévision par câble, en augmentant les débits de données tout en utilisant efficacement le spectre disponible.
- **Télévision numérique** : La QAM joue un rôle clé dans la diffusion de télévision numérique, notamment dans les systèmes DVB-C (Digital Vidéo Broadcasting - Câble). Elle permet de transmettre plusieurs chaînes de télévision et de la vidéo à la

demande sur une même bande de fréquence, optimisant ainsi l'utilisation de la bande passante disponible.

- **Communications sans fil** : La QAM est utilisée dans les standards de communication sans fil, tels que Wi-Fi (802.11) et LTE (Long Term Evolution). En particulier, les versions 64-QAM et 256-QAM sont employées pour augmenter les débits de données dans les réseaux Wi-Fi modernes et les réseaux mobiles 4G et 5G.
- **Communications optiques** : Dans les réseaux de communication par fibre optique, la QAM est utilisée pour maximiser la capacité de transmission tout en maintenant une faible erreur de signal sur de longues distances. Elle permet de répondre aux exigences croissantes de bande passante pour des services tels que la vidéo à haute définition et les applications de données intensives.
- **Radio numérique** : La radio numérique, comme le DAB (Digital Audio Broadcasting) et le DRM (Digital Radio Mondiale), utilise la QAM pour transmettre des signaux audio numériques avec une meilleure qualité sonore et une utilisation plus efficace du spectre radio.

Ces applications montrent comment la QAM est intégrée dans divers systèmes de communication pour améliorer l'efficacité spectrale, augmenter les débits de données, et assurer une transmission fiable même dans des conditions de canal difficiles. [6]

I.9. Conclusion

La transmission de données requiert une gestion minutieuse du débit pour éviter les pertes de temps dues aux erreurs. Les modems s'adaptent aux fluctuations du canal en ajustant leur mode de modulation, tandis que la modulation d'amplitude en quadrature (QAM) se distingue par son efficacité remarquable. Les techniques comme la QAM jouent un rôle essentiel dans la conception de systèmes de communication fiables et efficaces, soulignant ainsi l'importance de la modulation numérique dans les défis modernes de transmission de données. Comprendre ces principes est crucial pour relever les défis futurs des communications numériques et garantir une connectivité stable et fiable dans un monde de plus en plus interconnecté.

*Chapitre2 : ACCES MULTIPLE PAR REPARTITION DE
CODE OPTIQUE (OCDMA)*

II.1. INTRODUCTION

Aujourd'hui, avec l'évolution rapide des systèmes d'information, le monde est de plus en plus connecté, et le volume de données échangées à travers les réseaux de communication augmente de façon exponentielle. Cette croissance a engendré de nouveaux défis pour les opérateurs de télécommunications, qui doivent répondre à la demande croissante en matière de débit, de capacité et de qualité de service. Pour relever ces défis, les systèmes de communication ont évolué vers des solutions innovantes capables de répondre aux besoins plus complexes des utilisateurs.

Cependant, avec l'augmentation du trafic de données, les techniques habituelles d'accès multiple, telles que le Time Division Multiple Access (TDMA) et le Frequency Division Multiple Access (FDMA), commencent à montrer leurs limites en termes de capacité et d'efficacité spectrale.

C'est dans ce contexte que l'Orthogonal Code Division Multiple Access (OCDMA) trouve sa place. En permettant le multiplexage de plusieurs canaux de transmission de données sur le même support physique, tel que la fibre optique, l'OCDMA offre une solution efficace pour augmenter la capacité des réseaux de communication optiques tout en garantissant une bonne qualité de service.

Dans ce chapitre, nous explorerons les différentes techniques d'accès multiple utilisées dans les systèmes de télécommunications optiques. Notre attention se concentrera principalement sur une méthode spécifique d'Orthogonal Code Division Multiple Access (OCDMA), à savoir l'encodage spectral d'amplitude (SAC). Cette technique joue un rôle central dans notre étude. Nous commencerons donc par examiner les principes fondamentaux de la technique SAC-OCDMA, en mettant en évidence les processus d'encodage et de décodage du signal."

II.2. TECHNIQUE DE L'ETALEMENT DE SPECTRE :

CDMA

II.2.1.Principe de l'étalement de spectre

La CDMA (Code Division Multiples Access) est une technique d'étalement de spectre qui consiste à répartir la puissance du signal émis sur une largeur de bande beaucoup plus grande que celle nécessaire à la transmission des informations. Cette technique trouve son utilisation dans les communications radiofréquences et sans fils. Mais contrairement aux autres techniques (TDMA et FDMA), cette technique d'accès permet aux utilisateurs de partager le même espace fréquentiel et de transmettre sur les mêmes intervalles temporels. Ainsi, plusieurs utilisateurs peuvent partager le même canal de transmission sans qu'une gestion de temps ou de fréquence soit nécessaire.

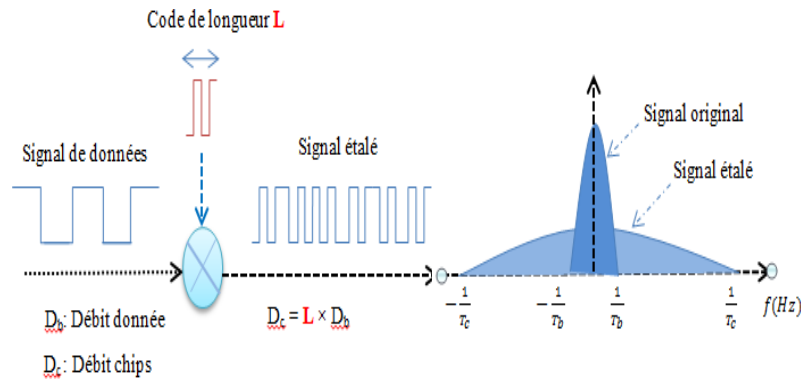


FIGURE 14: PRINCIPE DE L'ETALEMENT DE SPECTRE

Le CDMA attribue à chaque utilisateur un code d'étalement, appelé aussi « signature » constitué d'une suite de bits rapides (appelés « chips ») de durée $\frac{T_b}{n}$.

Le débit après codage est celui des données utilisateurs multiplié par la longueur de la séquence de code. Cette technique permet la transmission des données tout en minimisant l'interférence avec les messages des autres utilisateurs (désignées interférer accès multiple (IAM)). Cette réduction des IAM est conditionnée par l'utilisation des séquences de codes orthogonaux.

Au niveau du récepteur, une opération inversée est effectuée pour « détaier » le signal en bande de base alors que les autres signaux transmis (interférents) sont identifiés comme étant un bruit. Le CDMA offre la possibilité de transmettre simultanément des données aux différents utilisateurs sur une même bande de fréquence et en même temps. [7]

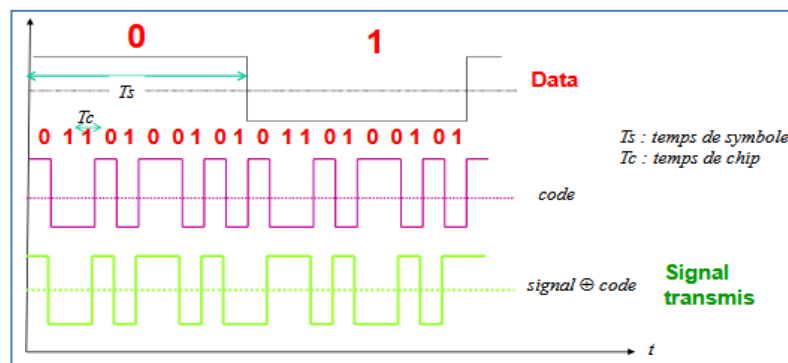


FIGURE 15: DIAGRAMME DU CODAGE DES DONNEES D'UN UTILISATEUR

II.2.2. Avantage de l'étalement de spectre

L'étalement de spectre est une technique basée sur l'élargissement de la bande spectrale d'un signal par une multiplication de la largeur de son occupation spectrale par une quantité appelée gain de codage.

Pour chaque milieu de transmission en théorie, la capacité du canal C en [b/s], exprimée à partir de la bande passante du canal et du rapport signal/bruit (SNR) est donné, conformément au théorème de Shannon-Hartley, par :

$$C = B \log_2(1 + SNR) \quad (12)$$

Ce théorème de Shannon-Hartley donne un taux de transfert maximum pour un Taux d'Erreur Binaire (BER) nul.

B représente la bande Passante du canal en Hertz et SNR représente le rapport signal/bruit.

Par conséquent, la capacité maximale peut être augmentée en agissant d'une part sur la largeur de bande de manière linéaire et/ou sur le rapport SNR de façon logarithmique. Cependant, Pour une capacité maximale donnée, il est possible de réduire la bande passante et/ou de diminuer le rapport signal/ bruit en admettant un TEB non nul.

Dans le cas du CDMA le bruit provient principalement des autres utilisateurs dont on cherche toujours à accroître le nombre. Par voie de conséquence, un système CDMA fonctionne avec de faibles rapports signal à bruit. Cela est rendu possible par la large bande passante, d'équation :

$$\frac{C}{B} = \frac{1}{\ln(2)} \cdot \ln(1 + SNR) = 1.443 \cdot \ln(1 + SNR) \quad (13)$$

L'étalement du spectre permet un rapport SNR très faible, la puissance de signal peut être inférieure au niveau de bruit.

Pour un $SNR \ll 1$ on a : $\frac{C}{B} \approx 1.443(SNR) \approx SNR$

La dépendance de la capacité relativement au rapport signal/ bruit est maintenant linéaire. Les autres signaux étalés sur le même support sont considérés comme du bruit.

Il est facile de voir que, pour une puissance de signal donnée, plus la bande passante utilisée est large, plus la capacité du canal est grande. Donc, si nous élargissons le spectre d'un signal donné, nous obtenons une augmentation de la capacité du canal et/ou une amélioration du rapport signal sur bruit. Ainsi, plus la bande passante est large, plus la puissance que nous devons utiliser pour une capacité donnée est faible. [7]

II.3. LE CDMA OPTIQUE

Les recherches sur l'adaptation du CDMA à l'optique, appelée Optical Code Division Multiplexing Access: OCDMA ont commencé en 1986. L'OCDMA est fondé sur le même principe de fonctionnement du CDMA utilisé dans les communications radio, sauf que la mise en œuvre est différente en raison de la différence entre les milieux de propagation. Si le canal

radio souffre de phénomènes d'atténuation et de multi-trajet, le canal optique, quant à lui est affecté par une dispersion chromatique et effet non linéaire.

Les systèmes CDMA optique ne cesse de conquérir le domaine de la communication optique grâce à leur capacité à donner à plusieurs utilisateurs l'accès au réseau de manière asynchrone et simultanée avec un haut niveau de sécurité

La capacité en bande passante de la fibre optique qui est en THz permet d'envisager son exploitation pour un étalement spectral résultant du codage des séquences de données. L'objectif est de trouver des configurations de codage qui soient applicables aux systèmes optiques et permettent une augmentation de la capacité de multiplexage d'une façon significative. [8]

II.3.1. Avantage du CDMA optique

Pour contourner les limites des systèmes d'accès TDMA et WDMA en termes de capacité de multiplexage, de débit et de flexibilité, il est nécessaire de recourir aux nouvelles techniques de multiplexage OCDMA.

La technique OCDMA appliquée aux réseaux d'accès optique permet de se passer des convertisseurs électrique/optique et optique/électrique qui représentaient jusque-là un obstacle technologique majeur. Elle vise à minimiser les coûts et réaliser le codage et le décodage dans le domaine optique en utilisant des composants tout-optique. Cela a été rendu possible grâce au progrès dans le domaine des composants optiques passifs.

Cette technique présente les avantages tel que :

- La connexion entre utilisateurs se fait de manière asynchrone.
- Une bande passante flexible, permettant d'augmenter le débit (allant jusqu'aux Gb/s) et une grande vitesse de transfert des données.
- Augmentation de nombre d'utilisateurs en fonction des systèmes OCDMA considérés.
- Un haut niveau de sécurité et de confidentialité. La puissance du signal étant étalée sur la bande spectrale disponible, le signal CDMA peut être confondu avec le bruit du canal et sera donc difficile à détecter par un autre utilisateur.
- Utilisation de composants optiques passifs pour le codage et le décodage qui sont faciles à intégrer dans les réseaux PON.
- Coût réduit grâce à l'utilisation de composants passifs.

II.3.2. ARCHITECTURE DU OCDMA

L'OCDMA est une technique basée sur deux domaines de transmission des données : temporelle et spectrale.

Dans le domaine temporelle les données sont étalées électriquement (réseau partiellement optique) et dans le domaine optique c'est la conception de l'encodeur optique qui détermine de manière matérielle le code utilisé (réseau tout optique).

La figure ci-dessus représente un système CDMA tout optique de type de réseau en étoile. Le signal issu de la source de données, optique ou électronique activant une source optique, étalé à l'aide du code de l'utilisateur. La séquence est couplée avec les données des autres utilisateurs du système, le signal résultant est transmis via une fibre optique. À la réception, le signal reçu est comparé avec les codes de tous les utilisateurs pour estimer la donnée émise [7]

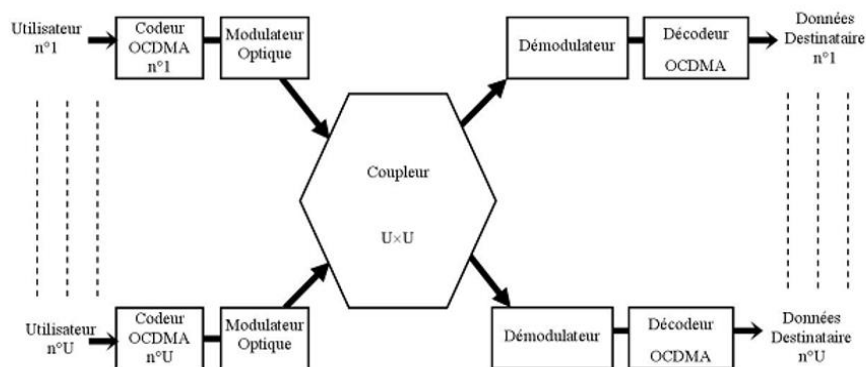


FIGURE 16:ARCHITECTURE OCDMA

II.4. Classification des systèmes OCDMA

II.4.1. OCDMA cohérent

Dans le OCDMA cohérent les informations codées à transmettre utilisent l'amplitude et la phase du signal transmis en utilisant des codes bipolaires (-1, 1). L'utilisation de ces derniers (codes de Gold, Walsh, m-séquence, ...) non pas une orthogonalité stricte aux différents codes. Cependant, le OCDMA cohérent nécessite l'utilisation de composants qui rendent le système plus complexe, ce qui augmente le coût de mise en œuvre. [9]

II.4.2. OCDMA non cohérent

Le système OCDMA non-cohérent emploie un codage basé sur la présence de signal lumineux, les codes seront donc composés de « 0 » et « 1 » pour la représentation. Le canal utilisé est dit unipolaire.

Ce système est plus simple à mettre en œuvre par rapport au système OCDMA cohérent. Par contre, les séquences de code utilisées dans OCDMA incohérent ne peuvent pas être strictement orthogonales. Donc les données émises par les différents utilisateurs du système s'interfèrent les unes avec les autres, ce qui est une des principales limitations des performances de ce système.

Par ailleurs, La plupart des études sur le CDMA Optique portent sur les systèmes incohérents, beaucoup plus simples et donc moins onéreux à mettre en place [10]

II.4.3. OCDMA Synchrone et Asynchrone

Les systèmes OCDMA synchrones tirent pleinement parti de l'orthogonalité des codes, ce qui signifie que la corrélation entre le code d'un utilisateur et celui des autres est nulle. Cela permet d'éviter les interférences entre les utilisateurs. Cependant, il convient de noter que cette orthogonalité parfaite est plus adaptée aux systèmes OCDMA synchrones, où des codes spécifiques tels que les codes de Walsh-Hadamard et les codes de Gold offrent une orthogonalité parfaite.

Par contre les systèmes CDMA asynchrones (A-OCDMA) utilisent des codes qui ne présentent pas une orthogonalité parfaite et ne nécessitent aucune synchronisation entre les utilisateurs. En conséquence, la corrélation entre les codes n'est pas nulle, ce qui engendre des interférences entre les utilisateurs, entraînant une réduction notable du nombre d'utilisateurs par rapport au CDMA synchrone.

II.5. Les différentes méthodes d'encodage OCDMA

En OCDMA, chaque code peut être représenté par une séquence, et cette séquence peut être mise en œuvre de différentes manières, que ce soit dans le domaine temporel, fréquentiel, spatial ou sous forme hybride, combinant ces différentes approches de codage. De plus, le choix de la source optique à utiliser est également crucial. Les principales sources optiques utilisées en OCDMA incluent les sources incohérentes à large bande et les lasers à impulsions courtes.

II.5.1. OCDMA par encodage temporel

L'OCDMA par encodage temporel (DS) implique de diviser un bit en plusieurs impulsions optiques courtes, où les intervalles de temps entre les impulsions représentent le code. Pour des taux de transmission élevés, la génération de plusieurs impulsions par bit dans le domaine électrique devient complexe et coûteuse. Ainsi, différentes propositions sont étudiées pour réaliser l'encodage de manière entièrement optique en créant des retards variables, communément désignés sous le terme de « lignes à retard temporel ». Les retards appliqués dépendent des codes sélectionnés. Ainsi, une impulsion courte issue d'un laser à impulsion est dirigée vers un coupleur $1 \times N$, comportant N branches où chaque branche subit un délai spécifique. À la sortie du coupleur, les w impulsions subissent des retards différents avant d'être réunies par un autre coupleur $w \times 1$. Le système de décodage correspondant utilise des éléments similaires, mais avec des lignes à retard inversées. [11]

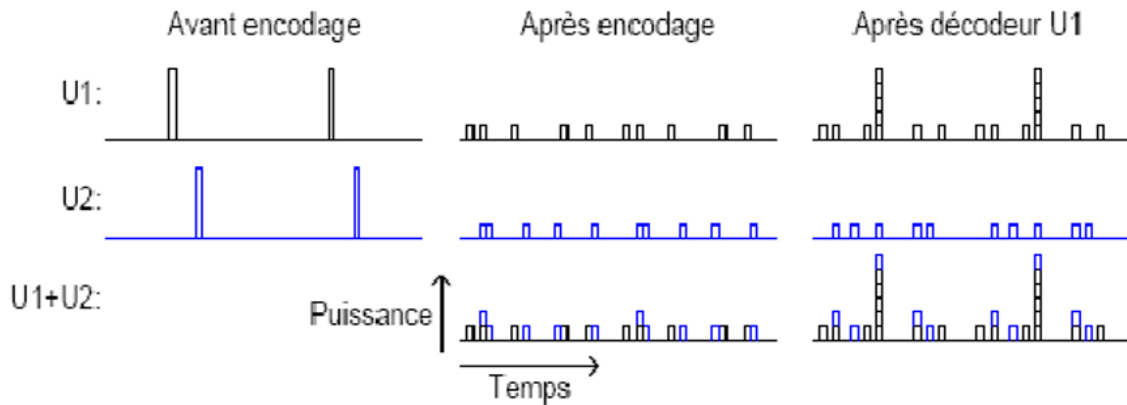


FIGURE 17: REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU DS-OCDMA

II.5.2. OCDMA par encodage spectral de phase

L'OCDMA par encodage spectral de phase (SPE) est une autre méthode qui utilise les sources cohérentes à impulsions laser ultra courtes. Ces sources émettent des impulsions de manière cyclique tel le spectre optique correspondant est périodique.

Pour l'encodage SPE les impulsions courtes générées sont des transformées de Fourier et les composantes spectrales sont multipliées par le code, ce qui donne un déphasage 0 ou π .

Tenant compte de l'interférent sur le décodeur, les phases ne sont pas compensées et la combinaison des composantes fréquentielles avec phases pseudo-aléatoires donne un bruit étalé temporellement.

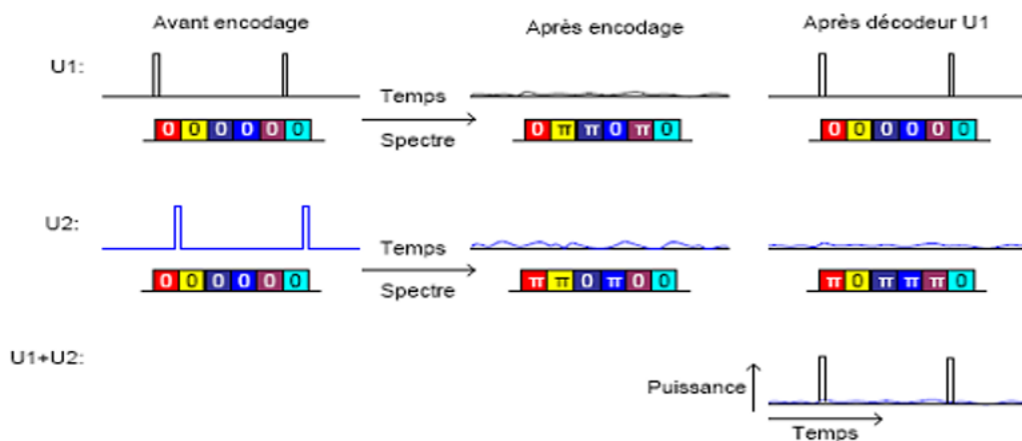


FIGURE 18: REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU SPE-OCDMA [11]

II.5.3. OCDMA par encodage spectral d'amplitude

Le codage spectral en amplitude (SAC) aussi appelé encodage en fréquence, est une autre technique de réaliser un système OCDMA.

Elle consiste à attribuer à chaque usager une partie du spectre optique comme code. Elle est appelée ainsi car le codage est réalisé en amplitude. Chaque usager se voit assigner une partie du spectre optique comme code constitué d'un ensemble de longueur d'onde spécifique w parmi L longueurs d'onde disponibles produites à partir d'une source optique. Les usagers ont généralement un nombre fixe de longueurs d'onde en commun.

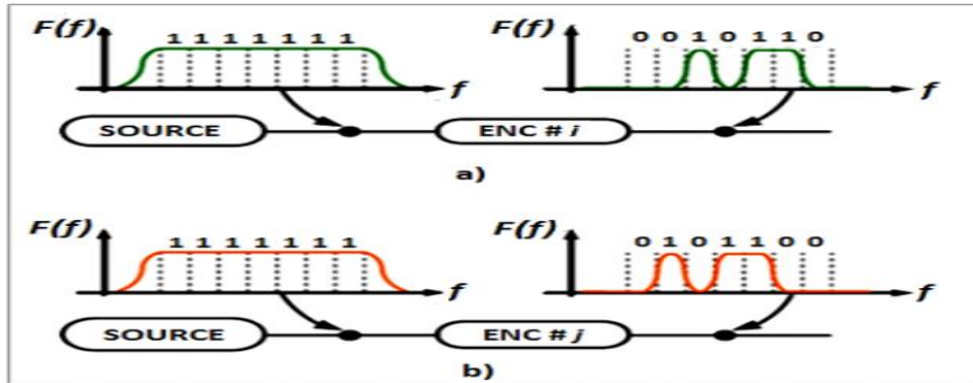


FIGURE 19:: PRINCIPE DE L'ENCODAGE SPECTRAL SAC-OCDMA

II.6. DÉFINITION DU SAC-OCDMA

Dans un système SAC-OCDMA chaque usager a son propre code spectral qui constitue sa signature où son empreinte de manière que cette dernière soit unique. Autrement dit chaque code d'utilisateur se verra attribuer une combinaison de longueur d'onde bien spécifique.

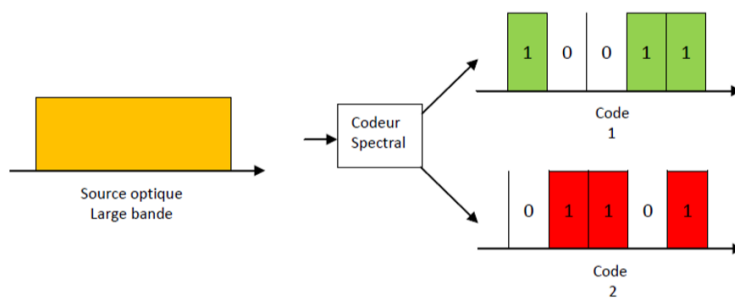


FIGURE 20:: TECHNIQUE DE CODAGE SPECTRAL EN SAC – OCDMA

L'encodeur a pour rôle d'assigner une signature spectrale unique à chaque usager comme l'illustre la figure ci-dessus. A titre d'exemple : en vert l'utilisateur 1 dont le code est «10011», et en rouge l'utilisateur 2 dont le code est «01101» [12]

II.7. ENCODAGE ET DÉCODAGE D'UN SIGNAL SAC-OCDMA

L'encodage SAC-OCDMA attribue une empreinte spectrale unique aux données de l'utilisateur où l'utilisation de la bande optique est partagée dans les systèmes qui fonctionnent avec le principe du SAC-OCDMA.

Le but du décodage consiste à l'extraction du signal parmi tous les signaux en utilisant la signature spectrale comme discriminateur.

II.7.1. ENCODAGE

- **Encodage avec masque d'amplitude**

La méthode d'encodage d'un système SAC-OCDMA, utilisant un masque d'amplitude, repose sur la séparation angulaire des différentes composantes fréquentielles à l'aide d'un réseau de diffraction. Ce réseau est positionné au foyer d'une lentille pour focaliser le point image à l'infini. Un masque d'amplitude est placé dans un plan perpendiculaire à l'axe de propagation pour éliminer les composantes spectrales indésirables. Une seconde lentille, associée à un autre réseau de diffraction, réunit ensuite les composantes spectrales restantes. [13]

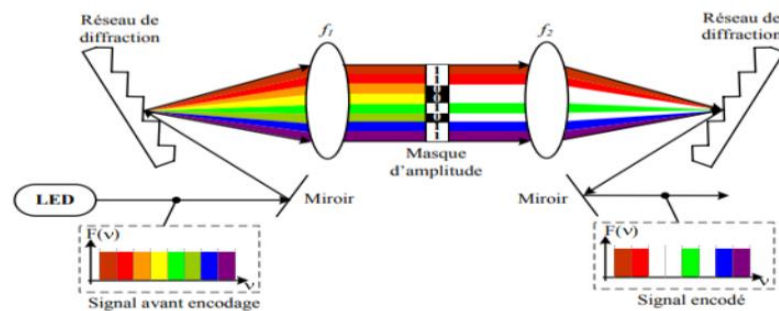


FIGURE 21: ENCODAGE SAC-OCDMA EFFECTUE AVEC UN MASQUE D'AMPLITUDE

- **Encodage avec de réseaux de Bragg**

Il est également envisageable d'utiliser des réseaux de Bragg pour l'encodage d'un système SAC-OCDMA. Ce principe repose sur une variation périodique de l'indice de réfraction, généralement du cœur de la fibre, afin de créer un composant sélectif sur le plan spectral. Chaque réseau de Bragg est capable d'éliminer une bande de fréquences qui ne correspond pas au code SAC-OCDMA utilisé. [13]

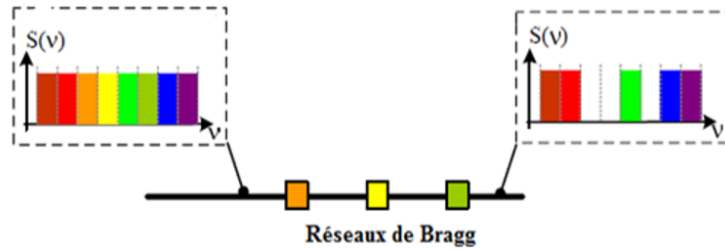


FIGURE 22: RESEAUX DE BRAGG UTILISES EN TRANSMISSION POUR ENCODAGE SAC-OCDMA

- **Encodage à l'aide de démultiplexeurs et multiplexeurs optiques**

C'est la technique la plus couramment adoptée à ce jour. À l'aide d'un démultiplexeur, le spectre large bande de la LED est fractionné en plusieurs longueurs d'onde, chacune ayant une largeur égale. En utilisant les sorties de ce démultiplexeur, chaque utilisateur peut sélectionner les longueurs d'onde correspondant à sa signature spectrale, puis les regrouper à l'aide d'un multiplexeur sachant que le nombre d'entrées du multiplexeur est égal au nombre de longueurs d'onde qui constituent la signature spectrale. [12]

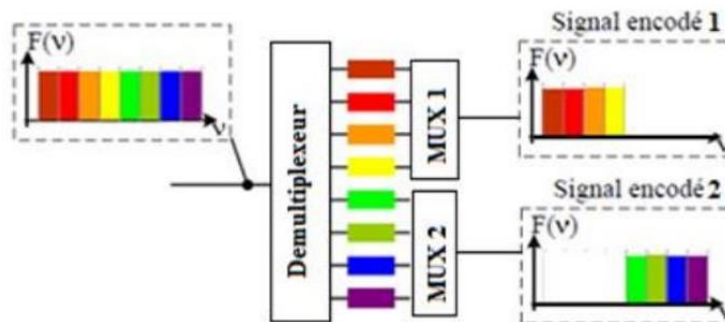


FIGURE 23: ENCODAGE SAC-OCDMA POUR 2 UTILISATEURS A BASE D'UN DEMULTIPLIXEUR ET DE DEUX MULTIPLEXEURS

II.7.2. Décodage en SAC OCDMA

A la réception on reçoit les données de tous les utilisateurs, il faut donc utiliser le code de chaque utilisateur pour restituer la donnée qui lui est propre. Le but de ce système de décodage pour l'utilisateur est double. D'abord, il faut qu'il détecte les données qui lui sont destinées puis le système de détection rejette les signaux des interférents ce qui implique qu'un signal électrique de moyenne nulle doit être produit lorsque seuls les interférents sont actifs et ce peu importe leur nombre.

II.8. LE MULTIPLEXAGE DE SOUS-PORTEUSES OU SUB-CARRIER MULTIPLEXING (SCM)

Le multiplexage de sous-porteuse, ou SCM, est une technique de multiplexage optique qui permet de convertir un multiplex RF électrique en un signal optique modulé en puissance. Cette méthode est souvent utilisée dans les réseaux de télécommunication pour répondre aux besoins de transmission de données. Le concept du multiplexage de sous-porteuses est similaire à celui de la technologie micro-ondes, qui utilise plusieurs porteuses pour transmettre plusieurs canaux sur des câbles coaxiaux ou en espace libre. Cependant, la bande passante totale est limitée à bien moins de 1 GHz lorsque des câbles coaxiaux sont utilisés pour transmettre un signal hyperfréquence multicanal.

II.8.1. Les avantages de multiplexage de sous porteuses SCM

La technologie SCM offre une solution simple et économique, exploitant la large bande passante multi-gigahertz des fibres optiques à l'aide de techniques bien établies issues du domaine des micro-ondes. Les composants nécessaires sont disponibles dans le commerce, ce qui rend cette technologie facilement accessible. De plus, elle s'avère être une option moins coûteuse que le multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDM).

Ce système est conçu pour être combiné avec les avantages de l'OCDMA. La combinaison des deux techniques vise à augmenter le nombre maximal d'utilisateurs actifs simultanément en renforçant la SCM et/ou le codage OCDMA. Ainsi, le système hybride résultant est robuste contre les interférences, offre une sécurité de transmission élevée et accroît la capacité du canal dans les fibres optiques existantes. [15]

II.8.2. Le Système Hybride SCM/OCDMA

La figure ci-dessus représente le schéma synoptique du système hybride SCM/OCDMA. À l'émission, les données numériques sont mélangées avec des codes unipolaires indépendants par différentes porteuses hyperfréquence. Les sous-porteuses sont ensuite combinées et optiquement modulées à l'aide d'un modulateur optique externe (OEM), puis transmises par la fibre optique.

Au niveau du récepteur, un séparateur optique est utilisé pour séparer les différentes séquences de codes modulés. Le signal reçu peut être décodé en utilisant une séquence de codes identifiés, et les composants non appariés sont filtrés. Ensuite, le signal décodé est détecté par le photo-détecteur. Un séparateur et un filtre passe-bande électrique (FPB) sont utilisés pour diviser les signaux de sous-porteuse multiplexée et rejeter les signaux indésirables, respectivement. Enfin, pour récupérer les données transmises d'origine, le signal d'entrée est mélangé électriquement avec une fréquence de micro-onde locale (f_i) et filtré en utilisant un filtre passe-bas (LPF) [16]

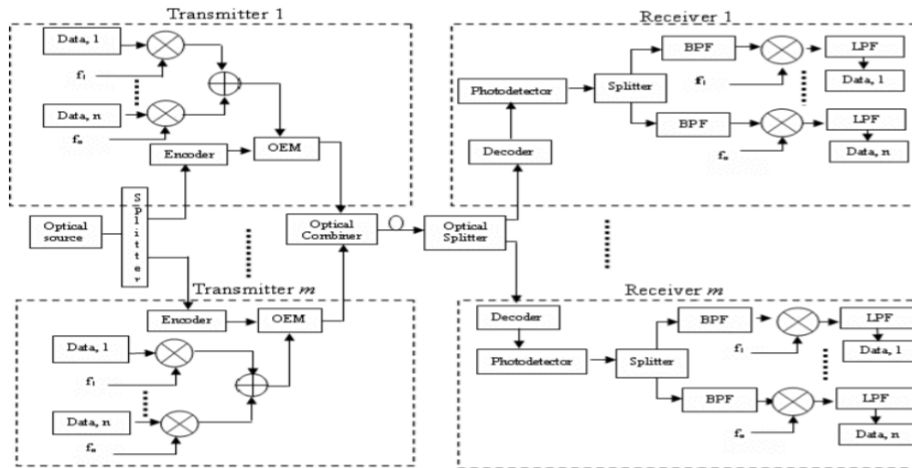


FIGURE 24: DIAGRAMME DE BLOC DU SYSTEME SCM/OSCDM AVEC TECHNIQUE DE DECODAGE DIRECT

II.9. Construction de codes optiques unipolaires

Dans les systèmes optiques, l'implémentation des codes est entravée par la difficulté de conserver la phase des signaux optiques. Afin de surmonter cette limitation, des codes optiques unipolaires ont été développés. Leur intégration implique un relâchement des contraintes sur les propriétés de corrélation des séquences utilisées. Les premiers codes employés dans le CDMA optique sont les codes optiques orthogonaux (OOC pour Optical Orthogonal Code)

II.9.1. Les codes optiques orthogonaux OOC

Les OOC ont été les premiers codes développés pour le CDMA optique. Ils ont été proposés en 1989 par J. Salehi et sont composés de suites unipolaires (0,1) caractérisées par les paramètres (L, W, λ_a et λ_c) tel sorte que : [16]

L est la longueur du code.

W est le poids du code.

λ_a la contrainte d'autocorrélation, c'est-à-dire le degré de ressemblance du code avec ses versions décalées(Plus elle est faible, plus il sera possible de différencier le code désiré d'une version décalée de ce code).

➤ λ_c a contrainte d'inter corrélation, c'est-à-dire le degré de ressemblance du code avec les autres codes de la famille. (Plus cette valeur sera faible, plus il sera possible de différencier le code désiré des autres codes de la famille)

➤

• Représentation

Il existe plusieurs façons de représenter mathématiquement les codes d'étalements, a l'aide :

➤ Un vecteur donnant les positions des chips à 1

- Un vecteur donnant les retards relatifs
- Un vecteur donnant la valeur de chaque chip
- Une expression mathématique

II.10. CONCLUSION

La répartition de code optique, basée sur des principes tels que l'utilisation de codes uniques, une faible corrélation croisée et l'orthogonalité des codes, offre une solution efficace pour la communication multi-utilisateurs sans interférences majeures. En explorant des méthodes avancées telles que le SAC-OCDMA et les séquences de Walsh-Hadamard, ainsi que différentes techniques d'encodage, nous avons enrichi notre compréhension des systèmes OCDMA. Ces avancées prometteuses ouvrent la voie à des réseaux optiques plus performants et évolutifs, contribuant ainsi à répondre aux besoins croissants de connectivité dans le monde moderne.

CHAPITRE 3 : OFDM

III.1. INTRODUCTION

Dans le domaine de la transmission de l'information, la recherche constante de méthodes efficaces pour transmettre des données de manière fiable et rapide a conduit au développement de nombreuses techniques de modulation et de multiplexage. Un des grands problèmes est d'adapter l'information à transmettre au canal de propagation. Une technique rependue consiste à utiliser des modulations multi-porteuses, où un bloc d'information est modulé à l'aide d'une transformée de Fourier. Parmi ces techniques, l'Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) a récemment émergé comme une solution prometteuse, gagnant en popularité dans diverses normes de communication sans fil.

L'un des piliers de l'OFDM est l'utilisation de la transformée de Fourier rapide (FFT). Cette technique mathématique permet de décomposer un signal temporel en ses composantes fréquentielles, ce qui facilite la modulation et la démodulation des données sur les sous-porteuses en passant par la réduction des effets du brouillage inter-symbole, améliorant aussi la fiabilité de la transmission grâce la redondance cyclique.

III.2. Historique

La modulation multi-porteuse a fait son entrée à la fin des années 1950, d'abord employée dans les systèmes de communications hautes fréquences à des fins militaires. Au fil des années, cette technologie a été perfectionnée avec l'introduction du concept de signaux orthogonaux à bande limitée, plus tard connu sous le nom d'Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM). Initialement, la mise en œuvre de l'OFDM impliquait l'utilisation de filtres de Nyquist.

Cependant, en raison de la complexité associée à la génération de multiples bancs de filtres sinusoïdaux, l'intérêt des industriels civils pour l'OFDM était limité au début. Ce n'est que vingt ans plus tard que le schéma de modulation-démodulation a été simplifié grâce à l'introduction de la Transformée de Fourier Discrète Inverse (TFDI) à l'émission et de la Transformée de Fourier Discrète (TFD) au niveau du récepteur, facilitant ainsi son implémentation numérique.

Dans les années 1980, la technique de l'OFDM a trouvé des applications dans des domaines industriels civils, notamment dans le projet de radiodiffusion numérique DAB. Ce développement a marqué une transition significative de l'utilisation militaire à des applications plus larges dans les communications civiles.

III.3. EFFETS DES MULTI TRAJETS

La propagation multi-trajet est un phénomène de propagation des ondes électromagnétiques dans lequel un signal se propage entre un émetteur et un récepteur en empruntant plusieurs

chemins différents. Lorsqu'un signal radio se propage dans l'environnement, il peut rencontrer différents obstacles tels que des bâtiments, des arbres, ou même des variations dans l'atmosphère. Ces obstacles peuvent provoquer la réflexion, la diffusion ou la diffraction du signal. En milieu urbain, où les obstacles sont nombreux, il y a généralement plus de réflexions que dans les zones rurales. Ces réflexions créent plusieurs chemins ou "trajets" que le signal peut emprunter pour atteindre le récepteur.

La propagation multi-trajet peut avoir des conséquences à la fois positives et négatives [17]

III.3.1. Effet positif des multi trajets

La propagation multi-trajet permet d'améliorer la couverture du signal en permettant à celui-ci d'atteindre des endroits difficiles d'accès, ce qui est bénéfique pour la connectivité dans des zones densément peuplées en assurant la continuité de la couverture radio et permet aussi aux communications d'avoir lieu dans les cas où l'émetteur et le récepteur ne sont pas en visibilité directe. [18]

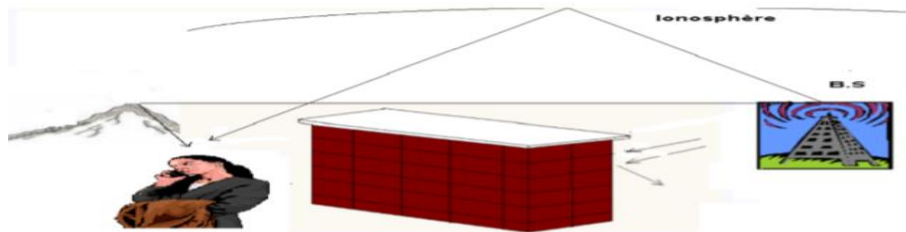


FIGURE 25: EFFET POSITIF DE LA PROPAGATION MULTI TRAJETS

III.3.2. Effet négatif des multi trajets

Les signaux reflétés dans le cadre trajets multiples peuvent arriver au récepteur avec un certain retard par rapport au signal direct, ce qui peut entraîner des interférences et une dégradation de la qualité de la transmission. [18]

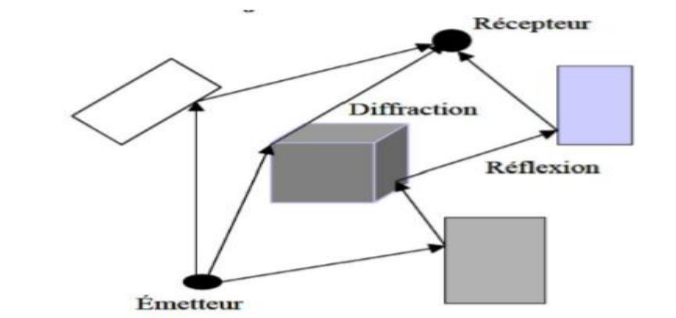


FIGURE 26: EFFET NEGATIF DE LA PROPAGATION MULTI TRAJETS

III.4. Principe et fonctionnement de l'OFDM :

La modulation OFDM est un type particulier de transmissions multi-porteuses qui consiste à transmettre simultanément des données sur un grand nombre de porteuses modulées. Le principe fondamental de l'OFDM est de répartir les données numériques en parallèle sur ces porteuses à bas débit. Pour ce faire, l'OFDM découpe le canal en cellules selon les axes du temps et des fréquences, attribuant à chaque cellule une porteuse dédiée. A chaque cellule fréquence/temps est attribuée une porteuse dédiée, sur laquelle l'information à transmettre est répartie. Cette information est modulée sur chaque porteuse à faible débit, généralement par des modulations telles que QPSK ou QAM. Ainsi, un symbole OFDM contient l'ensemble des informations des porteuses à un instant donné. [20]

L'OFDM se caractérise par une simple implémentation au niveau de la transmission et de la réception, facilitée par l'utilisation de la Transformée de Fourier Discrète (TFD). À l'émission, la TFD inverse est utilisée pour préparer les données, tandis qu'à la réception, c'est la TFD directe qui est employée pour les extraire. Pour implémenter efficacement la TFD, des algorithmes de transformée rapide FFT sont utilisés, offrant une solution moins complexe et plus simple.

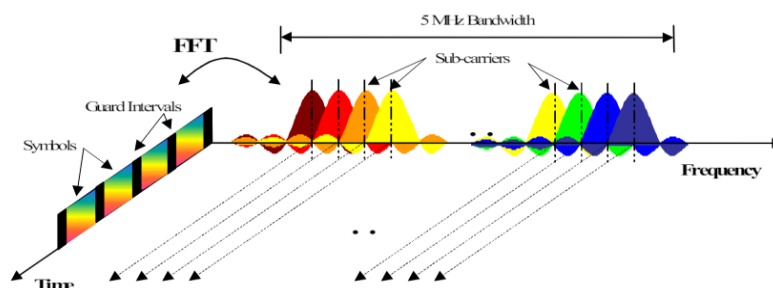


FIGURE 27: REPRESENTATION FREQUENTIELLE ET TEMPORELLE D'UN SIGNAL OFDM

III.4.1. Modulation OFDM

Le principe du multiplexage en fréquence OFDM est de grouper les données numériques par paquets de N (symbole OFDM) et moduler chaque donnée par une porteuse différente aux mêmes temps. Ces données sont ensuite modulées sur chaque sous-porteuse à l'aide de techniques de modulation telles que QPSK ou QAM.

Considérons une séquence de N symboles C_0, C_1, \dots, C_k constituant un symbole OFDM. Le k ème train de symboles parmi les N trains module un signal de fréquence f_k .

Le signal individuel s'écrit sous forme Complexe: $C_k e^{j2\pi f_k t}$

Le signal $s(t)$ total correspondant à toutes les données d'un symbole OFDM est la somme des Signaux individuels est donné par l'expression suivante :

$$S(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{2j\pi f_k t} \quad (14)$$

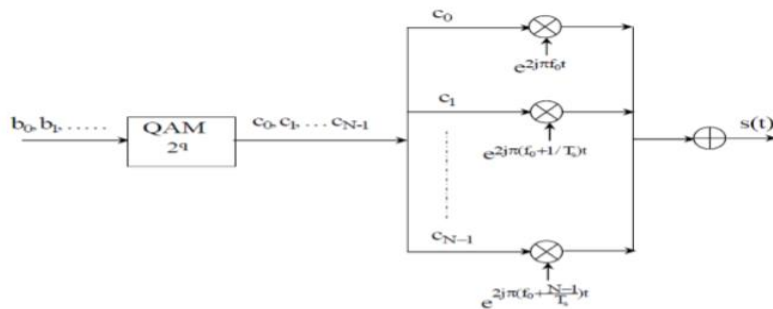


FIGURE 28: SCHEMA DE PRINCIPE DE LA MODULATION OFDM

Si on pose que le signal modulé en bande de base $s(t)$ est échantillonné par une période T_s / N . [21]

Appelons T_s la durée d'un symbole c'est-à-dire le temps qui sépare 2 séquences de N données. Les échantillons s_n s'écrivent :

$$s_n = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{2j\pi \frac{kn}{N}} \quad (15)$$

Cette équation représente la Transformée de Fourier Inverse des symboles C_k déduits de la constellation du QPSK ou QAM, donc il suffit d'appliquer l'algorithme de la FFT (Fast Fourier Transform) sur ces symboles C_k pour réaliser la modulation OFDM. [21]

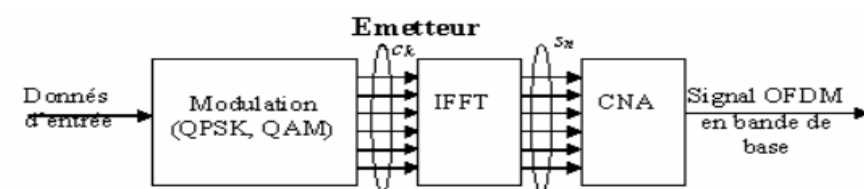


FIGURE 29: MODULATEUR OFDM

III.4.2. DÉMODULATION OFDM

Les opérations inverses sont appliquées à la réception. La démodulation OFDM consiste à éliminer l'intervalle de garde, effectuer une transformée de Fourier discrète directe des symboles reçus à l'aide de l'algorithme de la FFT.

Le signal OFDM occupe la bande passante B à partir de la fréquence porteuse f_0 comme le montre le schéma suivant :

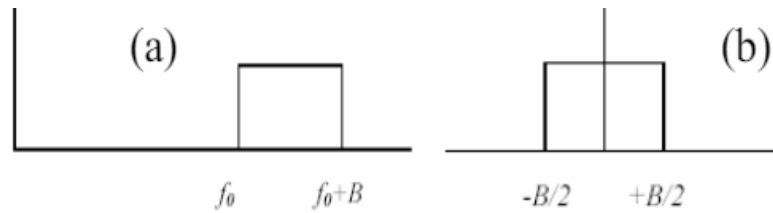


FIGURE 30: OCCUPATION DE LA BANDE PASSANTE

Pour démoduler, on doit transposer le signal en bande de base c'est à dire effectuer une translation de $f_0+B/2$, fréquence médiane de la bande passante. Le spectre occupera la bande $[-B/2, B/2]$, comme on le voit sur le schéma précédent. La bande passante du signal étant $B/2=N/2T_s$, la fréquence d'échantillonnage doit être supérieure ou égale à $2B/2$ soit N/T_s . L'échantillonnage se fera aux temps $t_n=nT_s/N$ [22]

le signal parvenant au récepteur s'écrit sur une durée symbole T_s telle que :

$$y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k H_k(t) e^{2j\pi(f_0 + \frac{k}{T_s})t} \quad (16)$$

Avec $H_k(t)$ la réponse impulsionnelle du canal au niveau de la sous-porteuse.

La démodulation classique consisterait à démoduler les N sous-porteuses suivant le schéma classique :

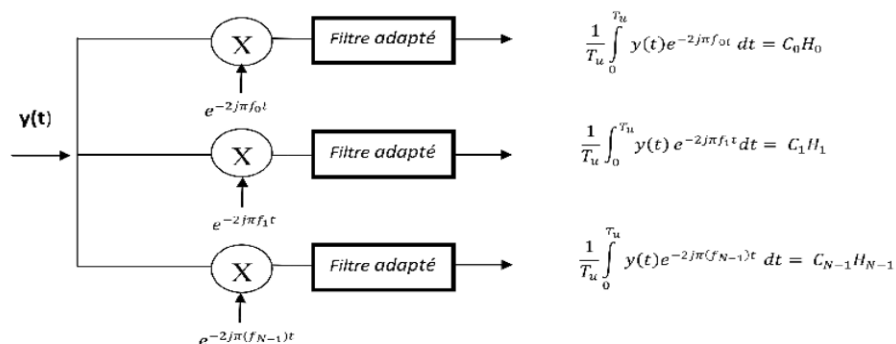


FIGURE 31: SCHEMA DU PRINCIPE D'UN DEMODULATEUR OFDM

L'échantillonnage se fait à une période T_s/N . Le signal reçu après échantillonnage sera :

$$Z(T_n) = (-1)^n \sum_{k=0}^{N-1} C_k H_k(t) e^{2j\pi \frac{kn}{N}} \quad (17)$$

Nous remarquons que $Z(t_n)$ est la Transformée de Fourier discrète inverse de $C_k H_k$. La démodulation consiste donc à effectuer une Transformée de Fourier rapide.

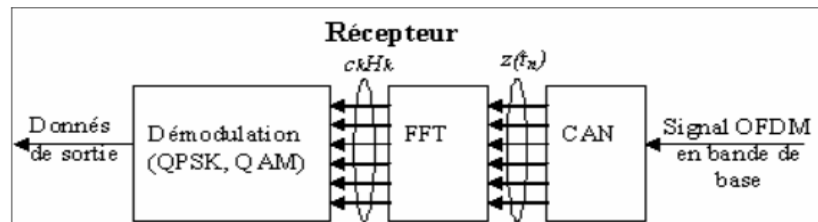


FIGURE 32: DEMODULATEUR OFDM

La modulation et la démodulation dans les systèmes OFDM sont largement réalisées à l'aide des transformations de Fourier rapide (FFT) et inverse (IFFT). Ces opérations mathématiques sont essentielles pour convertir les signaux entre le domaine temporel et le domaine fréquentiel, et vice versa. [23]

En utilisant la FFT, les données sont transformées du domaine temporel au domaine fréquentiel pour la modulation, tandis que l'IFFT est utilisée pour la démodulation, transformant les signaux du domaine fréquentiel au domaine temporel pour leur traitement ultérieur. Ces techniques permettent une efficacité et une précision accrues dans le traitement des signaux OFDM, ce qui en fait des éléments clés de la conception et de la mise en œuvre des systèmes OFDM modernes.

III.5. Problème Des Interférences

III.5.1. Interférence entre symboles (ISI)

Dans les systèmes OFDM, les signaux sont transmis à des intervalles réguliers, mais lorsqu'ils traversent un canal multi-trajets, ils peuvent subir des retards variables en raison des différents chemins de propagation. Ces retards introduisent des étirements temporels différents pour chaque symbole transmis. En conséquence, les symboles adjacents peuvent se chevaucher, créant ainsi ce que l'on appelle l'interférence entre symboles (IES). Il est important de noter que l'IES peut être exacerbée par d'autres facteurs tels que la distorsion du canal et les interférences extérieures.

Pour atténuer les effets de l'interférence entre symboles, les concepteurs de systèmes OFDM utilisent des techniques d'égalisation et de correction d'erreur. Ces techniques visent à compenser les distorsions introduites par le canal et à minimiser les erreurs de décodage dues à l'IES. En comprenant et en traitant efficacement l'interférence entre symboles, il est possible d'améliorer la fiabilité et les performances des communications OFDM dans des environnements difficiles. [24]

III.5.2. Interférence entre sous porteuses (ICI)

Dans les systèmes OFDM, l'orthogonalité des sous-porteuses est cruciale. Elle implique que, idéalement, les spectres de chaque sous-porteuse s'annulent aux emplacements des pics de spectre des autres sous-porteuses, assurant ainsi leur orthogonalité mutuelle. Cependant, en raison de diverses imperfections telles que les distorsions du canal ou les erreurs de synchronisation, cette propriété peut être altérée, ce qui conduit à l'interférence entre porteuses (IEP), également connue sous le nom d'interférence entre sous-porteuses (ICI).

L'ICI se manifeste lorsque la perte d'orthogonalité fréquentielle dû aux effets Doppler sur chaque trajet résulte en un chevauchement des symboles de données des sous-porteuses adjacentes dans la sous-porteuse actuelle. Cela peut entraîner une dégradation de la performance du système OFDM en provoquant des erreurs de démodulation et une diminution du rapport signal-sur-bruit.

Pour atténuer les effets de l'interférence entre porteuses, diverses techniques sont utilisées, telles que l'égalisation de la réponse en fréquence du canal et l'utilisation de filtres de suppression de l'ICI. Ces techniques visent à restaurer l'orthogonalité des sous-porteuses et à minimiser les interférences entre elles, contribuant ainsi à améliorer la robustesse et l'efficacité des communications OFDM dans des environnements de transmission difficiles. [25]

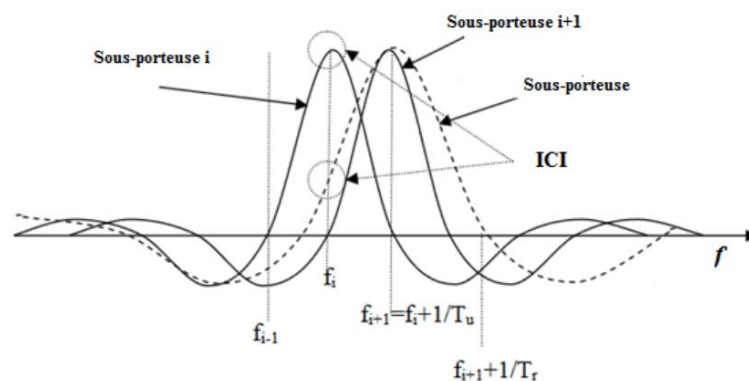


FIGURE 33: INTERFERENCE INTER-PORTEUSE EN OFDM DANS LE DOMAINE FREQUENTIEL

III.5.3. Intervalle de garde

Dans un système OFDM, les symboles émis peuvent subir des échos, ce qui entraîne une superposition de symboles atténués et retardés au récepteur. Pour éviter les interférences entre symboles, un intervalle de garde est ajouté, précédant chaque symbole. Cet intervalle de garde consiste en une extension périodique du signal lui-même, permettant de dissiper complètement les échos précédents avant le début du symbole suivant.

La durée totale de chaque symbole OFDM est donc la somme de la durée de l'intervalle de garde (T_g) et de la durée de la partie utile du symbole (T_u), soit $T_s = T_g + T_u$. Cette approche garantit que les interférences entre symboles sont éliminées, assurant ainsi une transmission robuste dans des environnements de propagation difficiles. [25]

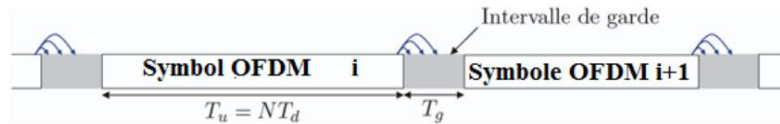


FIGURE 34: ILLUSTRATION DE L'EFFET DE L'INTERVALLE DE GARDE PRECEDENT CHAQUE SYMBOLE OFDM.

Avec :

T_u : La durée de la partie utile de chaque symbole OFDM.

$1/T_d$: le débit de la modulation mono-porteuse initiale.

T_g : La durée de l'intervalle de garde.

$T_s = T_g + T_u$: la durée de chaque symbole

III.5.4. Préfixe cyclique

Le préfixe cyclique (CP) dans les systèmes OFDM consiste à insérer une copie d'un bloc d'information à transmettre en amont de ce bloc, ce qui permet de récupérer une partie des informations et de les insérer en début du bloc. Cette technique, appelée CP-OFDM, aide à éviter les interférences causées par les trajets multiples et à maintenir l'orthogonalité temporelle entre les symboles.

Contrairement à l'intervalle de garde CP, l'intervalle de garde avec ZeroPadding (ZP) ne comprend que des zéros.[24]

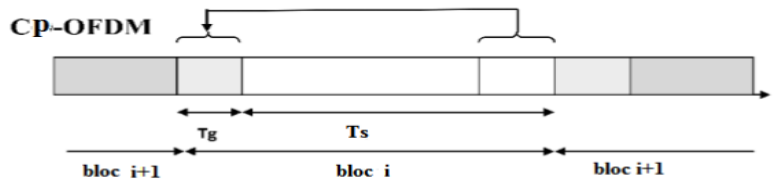


FIGURE 35: PREFIXE CYCLIQUE

III.6. Notion d'orthogonalité

Les signaux sont dits orthogonaux s'ils sont mutuellement indépendants. Pour garantir une bonne séparation des sous-porteuses et permettre au récepteur de récupérer chaque symbole transmis, il est nécessaire que les fréquences porteuses soient étroitement espacées, assurant ainsi un chevauchement spectral optimal entre elles.

L'OFDM permet précisément un chevauchement spectral significatif entre les sous-porteuses, ce qui se traduit par une utilisation efficace du spectre avec un nombre accru de sous-porteuses et moins d'encombrement spectral. Dans les domaines temporel et fréquentiel, il est crucial que les sous-porteuses respectent la condition d'orthogonalité pour assurer la cohérence et la fiabilité de la transmission des données.

Les porteuses doivent être orthogonales pour éviter les chevauchements et minimiser les interférences entre les sous-porteuses. L'OFDM découpe la bande de fréquences du signal transmis en plusieurs bandes voisines superposées, chacune avec des fréquences orthogonales. L'orthogonalité est une propriété essentielle qui permet de transmettre plusieurs signaux d'informations sur un canal commun de manière parfaitement distincte, sans interférences. [27]

Il existe :

- Orthogonalité temporelle
- Orthogonalité fréquentielle

III.7. LA CHAÎNE DE TRANSMISSION OFDM

Pour assurer une transmission fiable des messages, une série de traitements est effectuée à l'émission pour préparer le signal et l'adapter au canal de propagation. De même, à la réception, une série de traitements inverses est nécessaire pour récupérer le message original et éliminer les perturbations causées par la transmission et la propagation.

Pour convertir le signal OFDM du domaine fréquentiel au domaine temporel, les symboles sont modulés sur la sous-porteuse à l'aide de la transformation de Fourier rapide inverse (IFFT). Un intervalle de garde est ajouté après l'opération IFFT pour éviter le chevauchement des sous-porteuses. Ensuite, le signal numérique OFDM est converti en signal analogique à l'aide d'un convertisseur N/A. Au niveau du récepteur, les données reçues sont transformées en parallèle et l'intervalle de garde est supprimé. Le signal est ensuite démodulé par un démodulateur tel que QAM ou PSK, en utilisant la technique FFT. Enfin, les données sont converties en série pour récupérer l'information originale. [28]

III.8. Avantages et inconvénients de l'OFDM

• Avantages

L'un des grands avantages des schémas de transmission OFDM est d'avoir partagé la complexité de l'égalisation entre l'émetteur et le récepteur, contrairement aux schémas de transmissions mono-porteuses. Ceci permet d'avoir des récepteurs simples et peu coûteux. Les avantages des différentes variantes de l'OFDM sont nombreux, entre autre:

- Une utilisation efficace des ressources fréquentielles en comparaison avec les solutions classiques de multiplexage fréquentiel. Ceci est dû au fait que dans l'OFDM, les canaux se chevauchent tout en gardant une orthogonalité parfaite.
- Une égalisation numérique et un décodage simple et optimal grâce à l'utilisation de l'intervalle de garde (au prix d'une diminution du débit).
- Les techniques multi-porteuses sont robustes au bruit impulsif puisque chaque porteuse est affectée d'un bruit indépendant des autres porteuses.
- Les techniques OFDM ont également une très grande flexibilité dans l'allocation de bit/débit dans des contextes multiutilisateurs
- Le chevauchement en fréquence des sous porteuses permet de conserver une grande efficacité spectrale.

- La modulation est basée sur un algorithme bien connu et peu complexe : la FFT.

- **Les inconvénients**

Les principaux inconvénients sont les suivants :

- L'OFDM est très délicate aux problèmes de synchronisation. Les erreurs de synchronisation induisent un déphasage sur les symboles reçus.
- La performance de l'OFDM est beaucoup moins satisfaisante dans un scénario de communication à grande mobilité, où l'effet doppler joue un rôle important.
- Plus les perturbations s'amplifient, plus la technologie perd de son intérêt car il faut alors mettre en place des méthodes de filtrages ou de codages qui réduisent grandement les débits

III.9. CONCLUSION

L'étude de la technique OFDM nous démontre que cette dernière divise les données à haut débit en plusieurs signaux à faible débit, chacun transmis sur des sous-porteuses orthogonales, formant ainsi un signal OFDM. Ce signal, en traversant un canal à trajets multiples, subit des distorsions et des interférences que le préfixe cyclique (CP) aide à éliminer.

L'utilisation de l'IFFT à l'émission et de la FFT à la réception assure une transmission efficace, minimisant les interférences et optimisant la récupération des données. En conclusion, l'OFDM et les transformations FFT/IFFT sont essentiels pour améliorer les performances de notre système de communication.

*CHAPITRE 4 : Simulation sous Scilab d'un système
OFDM/OCDMA*

IV.1. INTRODUCTION

La simulation joue un rôle important dans le développement et l'évaluation des systèmes de communication modernes. Elle nous permet de tester différentes configurations sans nécessiter de matériel coûteux ou des expérimentations longues. Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de la simulation d'un système hybride OFDM/OCDMA, réalisée sous Scilab. L'objectif principal de cette simulation est d'utiliser la modulation 16-QAM pour coder les données et exploiter les codes optiques orthogonaux pour le multiplexage des utilisateurs. À travers cette simulation, nous analysons le comportement du système face à des conditions de bruit variées

IV.2. LOGICIEL SCILAB

Scilab est un logiciel de calcul numérique à large spectre libre et open source comparable au logiciel Matlab. Développé à l'origine par des chercheurs, il est depuis mai 2003 pris en charge par le consortium Scilab composé d'industriels et d'universitaires.

En effet, c'est un logiciel de calcul numérique que l'ingénieur utilise lorsqu'il a besoin d'effectuer des calculs. A cause de la complexité des études à réaliser, le calcul numérique est nécessaire. Et c'est le même outil qui lui permet de tracer des courbes et des graphiques. Quels logiciels peut-il utiliser aujourd'hui ?

Dans les années 1980, une révolution a eu lieu dans le domaine du calcul numérique avec la réalisation d'un logiciel qui permettait les calculs matriciels interactivement de façon très simple. Il s'appelait Matlab et était écrit en fortran. Un certain nombre d'autres logiciels ont ensuite vu le jour cours des années, ils ont pratiquement tous disparu pour laisser la place au logiciel d'origine Matlab distribué aujourd'hui par la société américaine The Mathworks. Ce logiciel est devenu le standard et il est aujourd'hui utilisé dans toutes les universités, les écoles et les entreprises du monde qui ont besoin de faire du calcul scientifique numérique. C'est un logiciel propriétaire. Dans les années 1980 aussi, inspiré et basé sur les mêmes principes que le logiciel Matlab d'origine, un autre logiciel appelé successivement Blaise, puis Basile avait vu le jour à l'INRIA. Ce logiciel fut renommé Scilab en 1990, puis mis à disposition gratuitement avec les sources sur le réseau Internet en 1994. Il a été développé par des chercheurs de l'INRIA et de l'École nationale des ponts et chaussées (ENPC) jusqu'en 2003. L'INRIA a alors décidé de créer le consortium Scilab.



FIGURE 36: LOGO DU LOGICIEL SCILAB

IV.3. DESCRIPTION DU SYSTEME

Dans notre travail, nous avons créé une méthode qui combine deux technologies pour améliorer les débits de données dans les réseaux de communication : l'OFDM (multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence) et l'OCDMA (accès multiple par répartition en code optique). L'OFDM utilise des sous-porteuses qui sont espacées de manière étroite et évitent les interférences, tandis que l'OCDMA utilise des codes optiques pour diviser les canaux et permettre à plusieurs utilisateurs d'accéder au réseau simultanément.

Pour montrer comment cette technique fonctionne, nous avons effectué une simulation avec un logiciel gratuit appelé Scilab. Dans cette simulation, nous avons pris en compte plusieurs utilisateurs utilisant des codes optiques différents pour l'accès au réseau, ainsi que l'algorithme de transformée de Fourier rapide pour diviser les fréquences. Nous avons également introduit du bruit dans le canal optique pour rendre la simulation plus réaliste, puis avons analysé les résultats en examinant le diagramme en œil et le taux d'erreur binaire en fonction du niveau de bruit.

Une chose intéressante à noter est que cette simulation réalisée avec Scilab donne des résultats très similaires à ceux obtenus avec des logiciels commerciaux plus coûteux comme Optisystem, ce qui montre que des solutions gratuites peuvent être tout aussi efficaces.

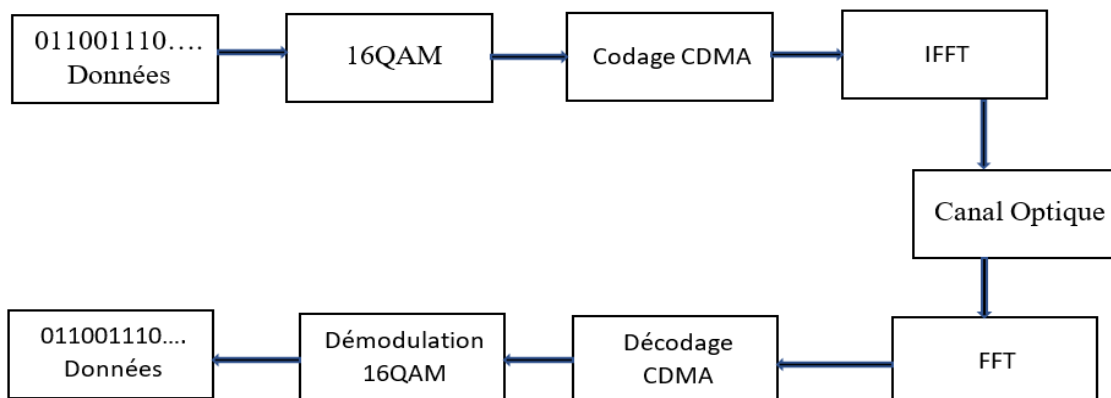


FIGURE 37: BLOC DU SYSTEME OFDMA/OCDMA

IV.4. TRANSMISSION

La transmission des données dans un système de communication optique est une étape importante qui détermine l'efficacité et la fiabilité du transfert d'information. Dans notre simulation, nous avons utilisé une approche hybride OFDM/OCDMA pour maximiser les débits de données tout en minimisant les interférences et les erreurs. Les données à transmettre sont modulées par la 16QAM et préparées pour le processus de transmission.

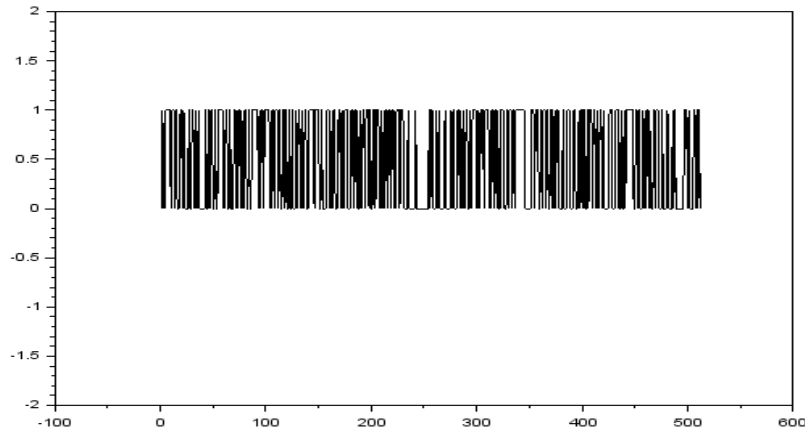


FIGURE 38: LES DONNEES A TRANSMETTRE (SIGNAL BINAIRE) =512BITS

IV.4.1. La constellation

Pour mieux comprendre la performance de notre modulation, nous utilisons le diagramme de constellation qui est une représentation graphique des symboles binaires en fonction de leurs coordonnées en phase et en quadrature. Chaque symbole du diagramme correspond à 4 bits (quadruple) dans la modulation 16-QAM

La constellation nous permet de visualiser la qualité du canal que nous utilisons à la réception. En observant la disposition des points de la constellation, nous pouvons évaluer la performance du canal et identifier d'éventuels problèmes de transmission

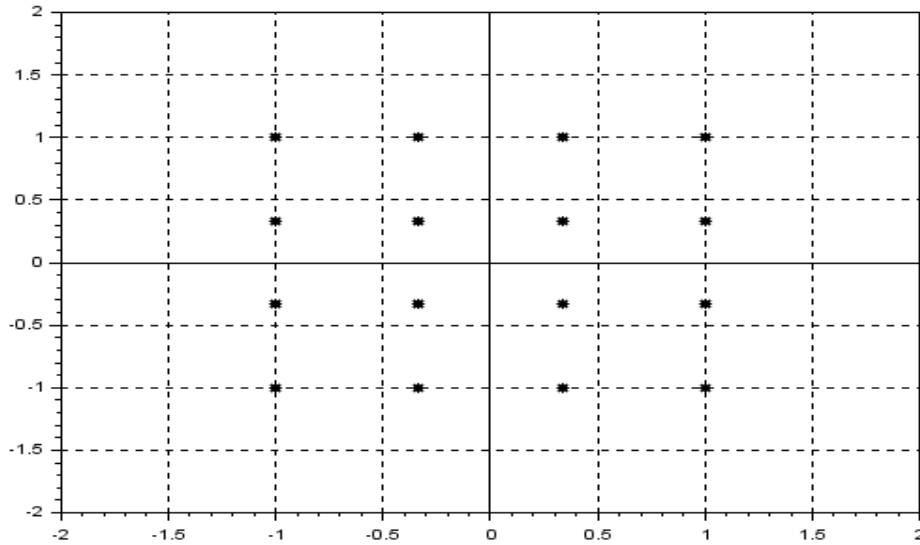


FIGURE 39:REPRESENTATION DES SYMBOLES BINAIRE PAR LA CONSTELLATION A LA TRANSMISSION

IV.4.2. La modulation 16-QAM

La modulation QAM (Quadrature Amplitude Modulation) est une modulation d'amplitude en quadrature utilisée pour coder les données binaires avant la transmission. Dans le cas de la modulation 16-QAM, elle permet d'augmenter le débit de données, car chaque symbole modulé représente 4 bits d'information. Cela permet de transmettre une plus grande quantité d'information en un temps réduit, optimisant ainsi l'efficacité du système de transmission.

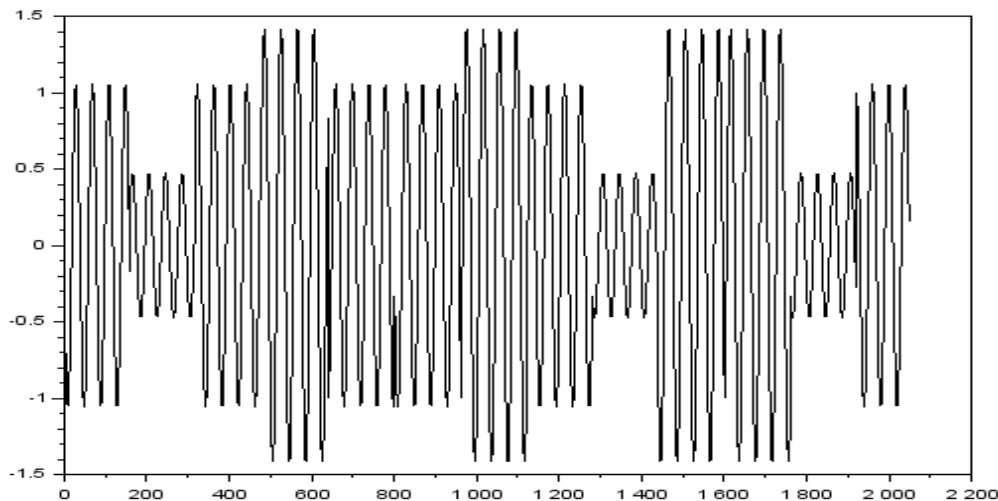


FIGURE 40:: SIGNAL MODULE 16-QAM

REMARQUE : En observant cette figure, on peut voir comment les variations de phase et d'amplitude des symboles 16-QAM sont transposées sur l'onde porteuse. Ce processus permet d'observer la manière dont les données binaires sont transformées en un signal analogique adapté à la transmission sur un canal spécifique.

La modulation 16-QAM est particulièrement efficace car elle maximise l'utilisation de la bande passante disponible tout en permettant un débit de données élevé grâce à ses 16 états possibles, chacun représentant 4 bits.

IV.4.3. Encodage du signal

Dans notre travail, le canal utilisé pour transmettre les informations exige l'utilisation des codes optiques. Pour garantir une transmission efficace et réduire les interférences entre les utilisateurs dans ce système de communication optique, nous utilisons des codes optiques orthogonaux. Ces codes permettent de minimiser les interférences inter-utilisateurs en assurant que les signaux attribués à différents utilisateurs sont mutuellement orthogonaux.

Dans une matrice de code orthogonaux chaque ligne représente un code orthogonal unique pour un utilisateur spécifique.

La matrice de donnée à transmettre (HC) que nous utilisons ci-dessous est orthonormée car les codes sont orthogonaux et le module de chaque code est égale à 1.

Longueur=8 Poids=1

$$\text{HC} = \begin{bmatrix}
 1. & 0. & 0. & 0. & 0. & 0. & 0. & 0. \\
 0. & 0. & 0. & 0. & 0. & 0. & 0. & 1. \\
 0. & 0. & 0. & 0. & 0. & 0. & 1. & 0. \\
 0. & 0. & 1. & 0. & 0. & 0. & 0. & 0. \\
 0. & 1. & 0. & 0. & 0. & 0. & 0. & 0. \\
 0. & 0. & 0. & 1. & 0. & 0. & 0. & 0. \\
 0. & 0. & 0. & 0. & 0. & 1. & 0. & 0. \\
 0. & 0. & 0. & 0. & 1. & 0. & 0. & 0.
 \end{bmatrix}$$

Cette matrice est utilisée pour encoder l'information des utilisateurs avant la transmission. Le produit matriciel entre les données à transmettre et cette matrice génère les données encodées.

Les données encodées sont transformées à l'aide de la transformée inverse de Fourier (IFFT) ce qui correspond à l'utilisation de l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Cette technique nous permet de compresser les données en transmettant plusieurs canaux en même temps sans risque chevauchement ainsi réduire le débit.

La figure ci-dessous représente les données des utilisateurs sur plusieurs sous-porteuses orthogonales : c'est le signal résultant après l'encodage et l'utilisation de l'IFFT pour réduire le taux de donnée.

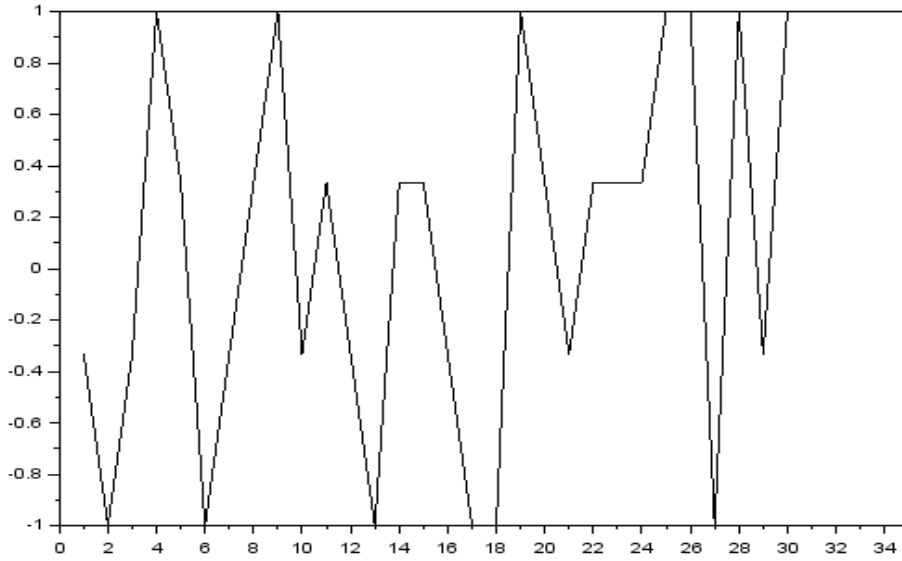


FIGURE 41: LE SIGNAL ENCODE APRES LA IFFT

- **Signal transmis**

Après l'encodage des données des utilisateurs avec les codes optiques orthogonaux et appliqué la transformée inverse de Fourier (IFFT), nous obtenons les symboles OFDM. Ces symboles sont ensuite convertis en un signal continu, prêt pour la transmission à travers le canal optique.

La figure ci-dessus montre le signal final, le signal porté à travers le canal optique.

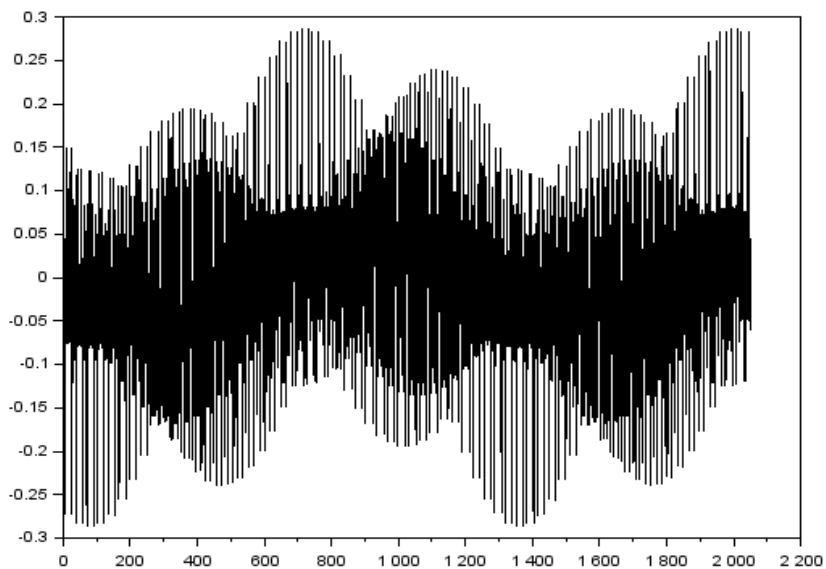


FIGURE 42: SIGNAL TRANSMIS

IV.5. Réception

Lors de la réception dans notre simulation, nous passons en premier par une étape importante qui consiste en l'application de la transformée de Fourier rapide (FFT) sur le signal reçu. Cette technique permet de convertir le signal OFDM, composé de plusieurs sous-porteuses orthogonales, du domaine temporel au domaine fréquentiel ainsi séparer efficacement les différentes sous-porteuses et d'identifier les signaux de chaque utilisateur.

Après la FFT, pour comprendre les différentes parties du signal, nous utilisons la démodulation QAM, qui nous aide à extraire les informations spécifiques à chaque utilisateur à partir de ces parties du signal.

IV.5.1. Démodulation QAM

IV.5.1.1. Cas d'un canal idéal

Dans le cas d'un canal de transmission parfait, le bruit et perturbations étant nuls, la dé-QAM est une opération simple. Dans cette dernière, le signal reçu correspond exactement au signal transmis, sans aucune perturbation.

Ainsi, Chaque point de la constellation représente un symbole binaire précis. La clarté et la précision de la constellation dé-QAM montre la fidélité de la transmission, avec les symboles binaires qui sont parfaitement récupérés sans erreur ni perturbations.

Les points sont concentrés sur leurs positions attendues, sans dispersion ni déformation. Cela confirme la fidélité et la qualité du canal de transmission idéal, où le signal est transmis et reçu sans aucune perte.

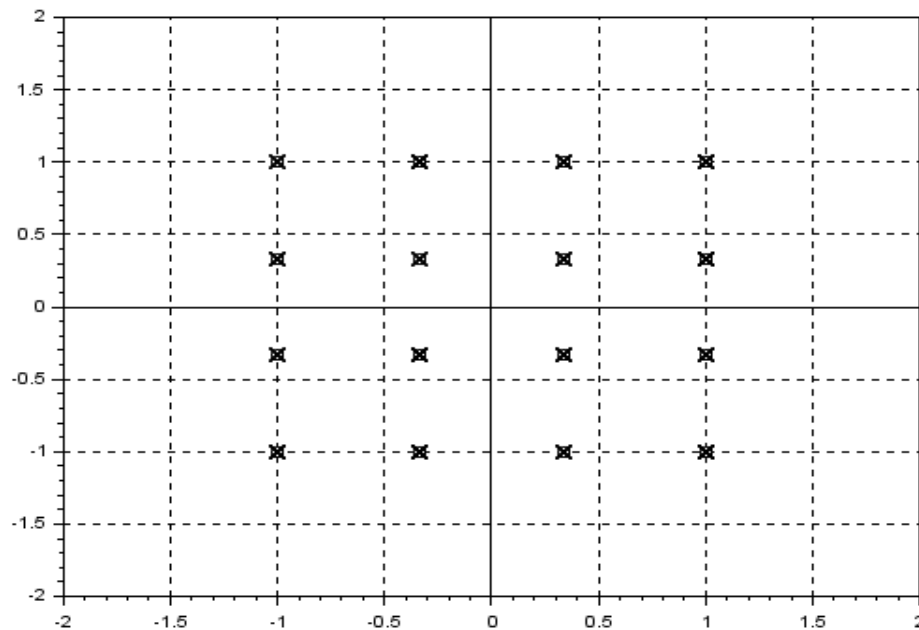


FIGURE 43: LA CONSTELLATION DE-QAM EN CANAL IDEAL

- **Diagramme de l'œil de la constellation : canal idéal**

Le diagramme de l'œil est un outil visuel qui nous permet d'évaluer la qualité du signal reçu. Dans le canal idéal l'écart type du bruit est nul ; cela nous montre que l'œil est bien ouvert, ce qui signifie que les niveaux de signal sont clairement distincts indiquant une bonne qualité de transmission et une probabilité d'erreurs de bit (BER)=0, cela nous démontre l'efficacité de notre modulation et du canal dans des conditions de bruit nul confirmant ainsi la de-QAM.

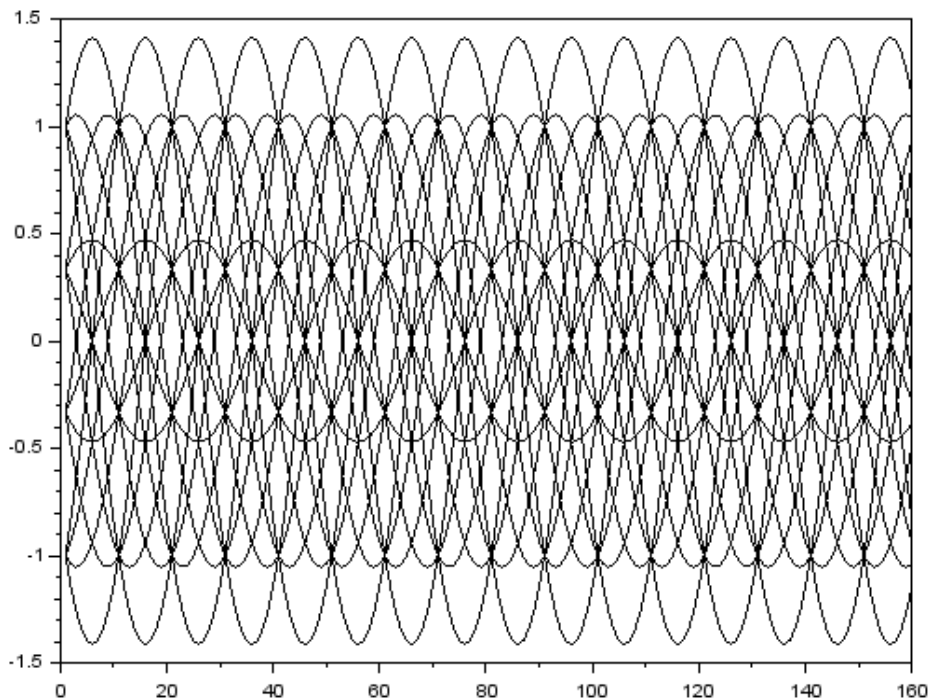


FIGURE 44: DIAGRAMME DE L'ŒIL DANS LE CAS IDEAL

IV.5.1.2. Cas d'un canal bruité

Pour évaluer l'efficacité de notre système, nous avons ajouté un bruit blanc Gaussien centré additif au canal, avec une variation d'écart type car la puissance d'un BBGC est sa variance.

- **Bruit d'écart type=0,01**

Pour un bruit d'écart type= 0,01 ; On observe une légère perturbation au niveau du diagramme de l'œil même si les points de constellations sont toujours fixés au niveau de leurs positions idéales, indiquant une bonne performance du système bruité. Malgré l'ajout de bruit d'écart type de 0,01, la qualité de la transmission reste élevée et le taux d'erreur binaire (BER) est toujours nul.

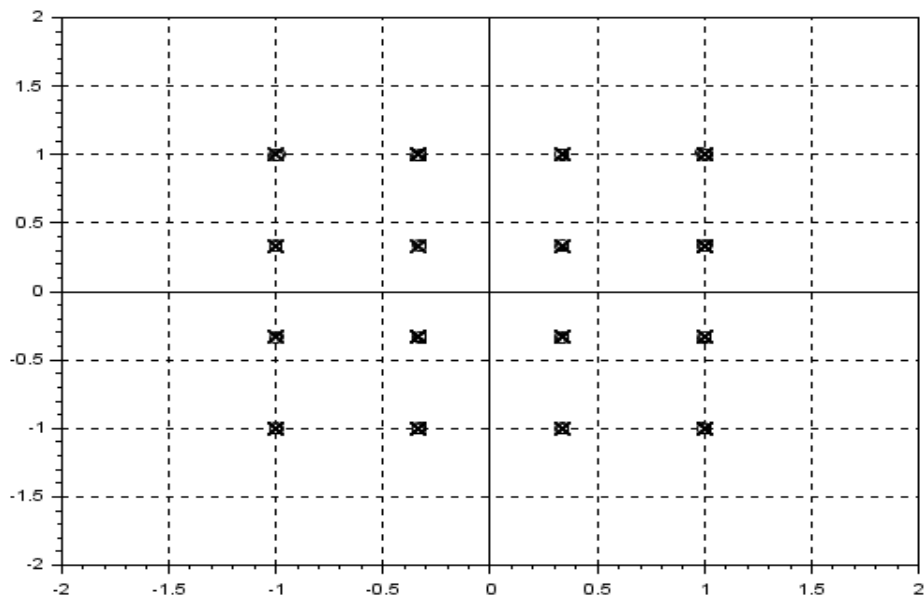


FIGURE 45: (x) CONSTELLATION A LA TRANSMISSION ET (o) CONSTELLATION REÇUE BRUITE : ECART TYPE DE 0,01.

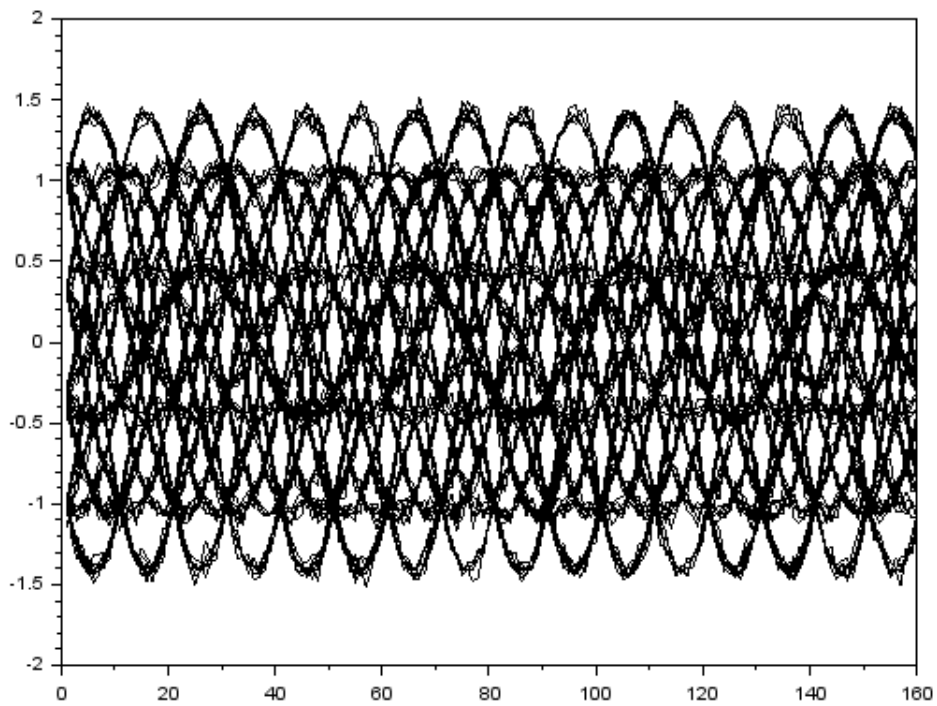


FIGURE 46: DIAGRAMME DE L'ŒIL : ECART TYPE DU BRUIT= 0,01

- **Bruit d'écart type=0,1**

Pour un bruit avec un écart type de 0,1 ; On observe une légère perturbation des points de constellation. Malgré cette perturbation, les points restent proches de leurs positions idéales dans la constellation, indiquant une bonne performance du système bruité.

Cela montre que, malgré l'ajout de bruit d'écart type de 0,1, la qualité de la transmission reste élevée et le BER est toujours nul, même si le diagramme de l'œil tend à se fermer.

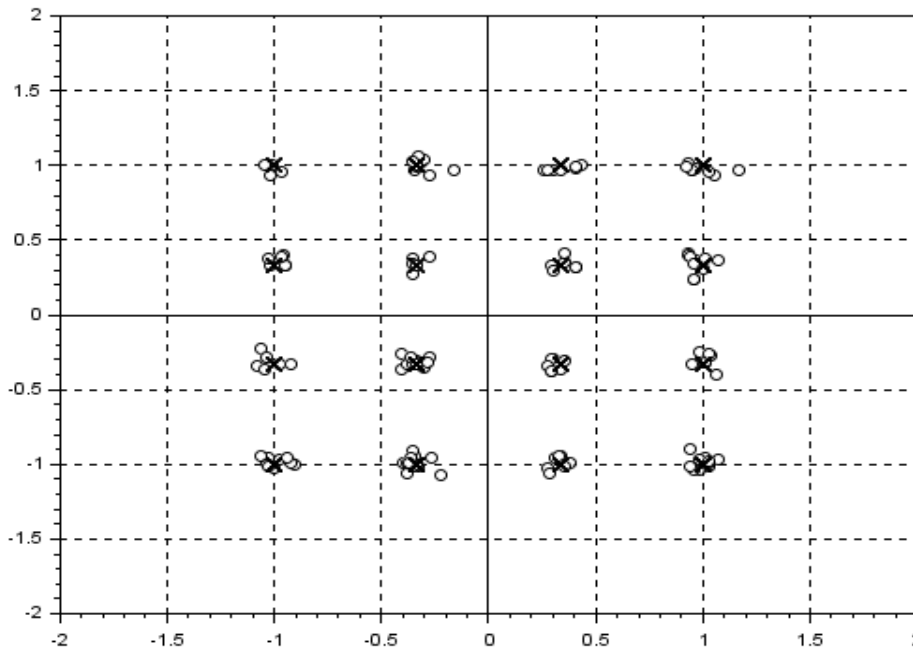


FIGURE 47: (x) CONSTELLATION A LA TRANSMISSION ET (o) CONSTELLATION REÇUE BRUIE : ECART TYPE DE 0,1

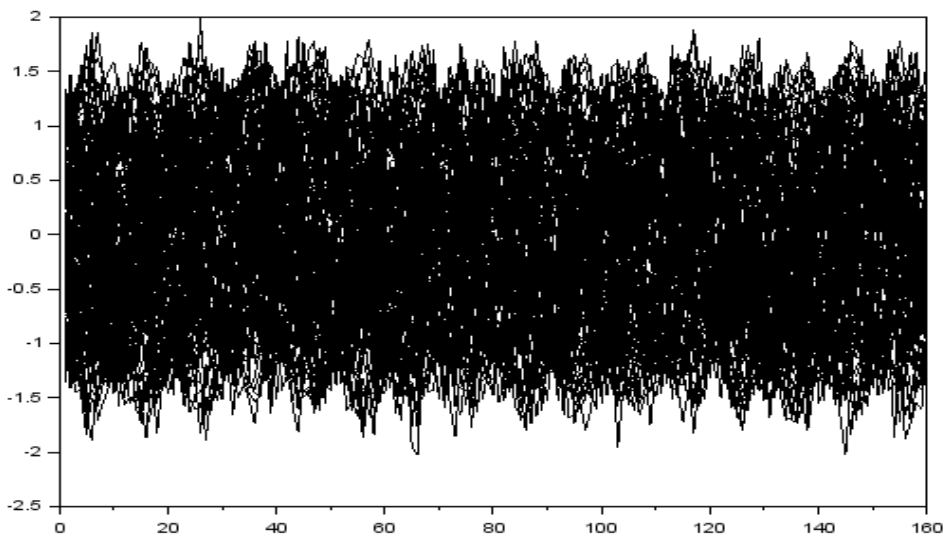


FIGURE 48: DIAGRAMME DE L'ŒIL : ECART TYPE DU BRUIT= 0,1

- **Bruit d'écart type=0,27**

Pour pousser l'évaluation de notre système, nous avons augmenté le bruit dans le canal, allant à un écart type=0,27. Le diagramme de l'œil et le diagramme de constellation pour ce scénario révèlent une dégradation importante de la qualité du signal.

On observe une grande perturbation des points de constellation, rendant leur position difficile voire impossible à identifier. Ce qui diminue ainsi la qualité de la transmission et augmente le taux d'erreur binaire (BER) avec un diagramme de l'œil qui est parfaitement fermé.

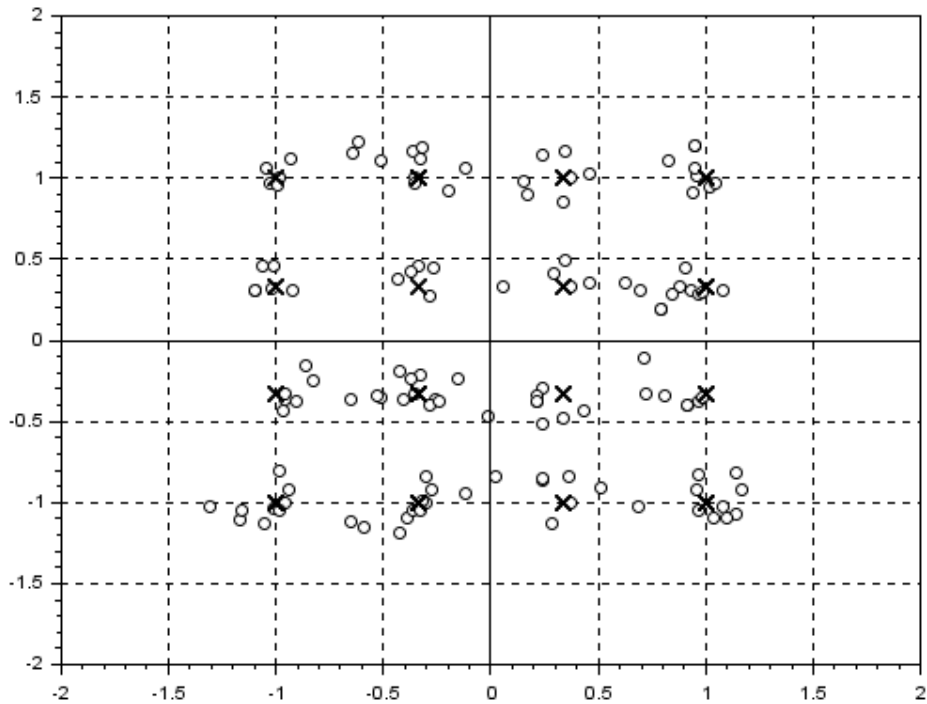


FIGURE 49: (x) CONSTELLATION A LA TRANSMISSION ET (o) CONSTELLATION REÇUE BRUIE : ECART TYPE DE 0.27

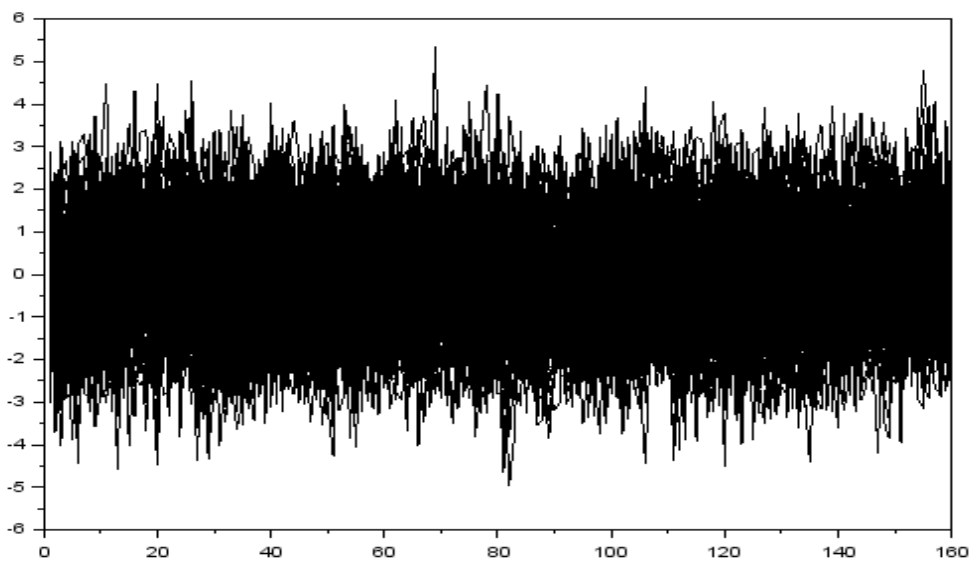


FIGURE 50: DIAGRAMME DE L'ŒIL : ECART TYPE DU BRUIT= 0,27

IV.6. Evolution du BER en fonction de l'écart type

L'analyse de l'évolution du taux d'erreur binaire (BER) en fonction de l'écart type du bruit, révèle des informations importantes sur le signal de notre système de modulation.

Lorsque l'écart type du bruit est faible (inférieur à 0,27), le BER reste très bas, voire nul, indiquant une transmission de haute qualité avec peu ou pas d'erreurs. Cependant, à mesure que l'écart type du bruit augmente au-delà de 0,27 ; le BER croît de manière significative, montrant une dégradation de la qualité du signal.

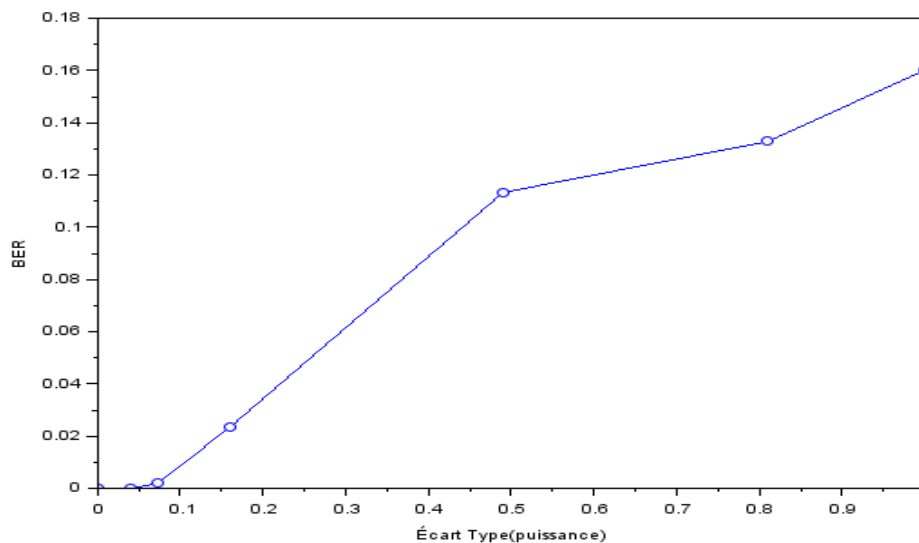


FIGURE 51: COURBE DE L'ÉVOLUTION DU BER EN FONCTION DE LA VARIANCE DU BRUIT

IV.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous présentons l'étude de la simulation du système hybride OFDMA/OCDMA sous le logiciel Scilab.

Cette simulation du système hybride OFDM/OCDMA nous permet de conclure sur l'efficacité de la OFDM pour répartir les données sur des sous-porteuses orthogonales ainsi que la fiabilité de l'utilisation des codes OCDMA.

L'ajout d'un BBAGC dans le système ainsi que le code utilisé nous a permis d'étudier la qualité du canal de transmission en fonction du diagramme de l'œil, de la constellation ainsi que l'augmentation du BER en fonction de la puissance du bruit du canal ; montrant les limites de notre système face à des niveaux de bruit élevés. En conclusion, on a constaté que le BER augmente avec l'augmentation du bruit.

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons élaboré un système hybride de communication en combinant le multiplexage par division orthogonale de la fréquence et l'OCDMA optique. Cette conception vise l'obtention de débits de données élevées qui répondent à la croissance des besoins en la matière. Comparé à l'OCDMA basé sur les SCM, qui exige une large bande passante et ne permet que quelques sous porteuses et d'utilisateurs, l'OFDM permet de contourner ces obstacles grâce à l'orthogonalité des sous porteuses (TFD). Comme ces derniers sont orthogonales, ils peuvent être utilisés très proches les uns des autres, réduisant ainsi leur sélectivité en fréquence et augmentant ainsi le débit de données et le nombre d'utilisateur.

Afin d'évaluer ce système hybride OFDM/OCDMA, nous avons mené des simulations en Scilab, un logiciel libre. Ces simulations ont porté sur un scénario avec plusieurs utilisateurs prenant en compte l'utilisation de codes optiques orthonormés pour la répartition de code et de l'algorithme de la transformée de Fourier Rapide pour la division fréquentielle. Afin de rendre la simulation plus réaliste, nous avons ajouté du bruit au canal optique et avons étudié le constellation diagramme de l'œil et le taux d'erreur binaire en fonction de la variance du bruit. Un des avantages majeurs de l'utilisation des logiciels libres tels que les Scilab utilisés pour ces simulations, c'est qu'il a permis de vulgariser les logiciels gratuits évitant ainsi le coût élevé d'un logiciel commercial comme Optisystem. En fait, les résultats obtenus avec Scilab sont très proches de ceux obtenus avec Optisystem. En conclusion, notre approche est validée. Dans le futur, notre méthode de simulation doit être élargie à la transmission optique, afin d'optimiser les performances de notre système hybride. Cette conclusion montre l'importance de notre méthode, et sa performance.

Pour l'avenir, une perspective intéressante serait d'explorer l'intégration des techniques avancées de traitement du signal, telles que les algorithmes de machine Learning, pour améliorer encore davantage la performance et l'efficacité des systèmes de communication OFDM/OCDMA. Cela pourrait ouvrir la voie à de nouveaux projets de recherche visant à optimiser l'allocation des ressources et la gestion des interférences dans des environnements de communication de plus en plus complexes.

Bibliographies

- [1] P. KADIONIK, «BASES DE TRANSMISSIONS NUMERIQUE,» ENSEIRB, BORDEAUX, 2000.
- [2] B. Souhila, Étude et Optimisation de Système de Transmission de Données, Annaba, 2019.
- [3] L. Amine et M. HAMOUD, «Etude comparative et simulation sous Simulink d'une modulation/demodulation M-QAM,M-PSK application au modems ADSL,» Université SAAD DAHLEB, BLIDA, 2010.
- [4] C. Latouche, Bande Passante et Calcul de la Bande de Nyquist, Paris: Université Pierre et Marie Curie, 2017..
- [5] J. Besnard, P. Bolcato, D. Glao et H. Guégan, Modulation, Démodulation, Techniques de l'Ingénieur, 2018..
- [6] J. G. S. M. roakis, Digital Communications, 5th ed éd., McGraw-Hill Education., 2008.
- [7] S. Ayotte, «Systèmes optiques à accès multiple par répartition de codes : étude des performances et de l'impact du bruit d'intensité,» université Laval Québec des sciences et de génie, QUEBEC, 2007.
- [8] G. Pille, «Optical distribution multiplexing using spectral codes in integrated optics,» Montpellier, 2005.
- [9] A. e. F.BOUNECISSA, «Code MD pour le système de communication optique sac-OCDMA,» 2006.
- [10] M. MORELLE, «Codage en 2 Dimensions pour les systèmes de communications Optiques CDMA (OCDMA): application aux transmissions multimédia,» Limoges, 2008.
- [11] S. Cordette, «Continuum de fréquences optiques pour application OCDMA.Optique/phot-onique,» Télécom ParisTech, PARIS, 2010.
- [12] A. O. K. A. DERADERA, «Etude d'un système de transmission basé sur la technique SAC-OCDMA,» Béjaia, 2019.
- [13] Garadi.A, «Contribution à l'étude des codes optiques ZCC : Application au système SAC-OCDMA,» Université Djilali Liabès, Sidi-Bel-Abbès, 2015.
- [14] PENON.J, «, « Réduction du bruit d'intensité dans les systèmes SAC-OCDMA incohérents utilisant des réseaux de Bragg,» Québec, 2009.
- [15] D. J. R. Hongxi Yin, «Optical code division multiple access communication networks theory and applications,» Beijing, 2007..

- [16] C. ABDELHAMID, «Analyse Et Evaluation Des Performance De la Modulation Multi porteuses Dans La Transmission d'information,» MOSTAGANEM, 2017.
- [17] J. PENON, «RÉDUCTION DU BRUIT D'INTENSITÉ DANS LES SYSTÈMES SAC-OCDMA INCOHÉRENTS UTILISANT DES RÉSEAUX DE BRAGG,» 2009.
- [18] M. Benyarou, «Optimisation des systèmes multi-antennes : appliqués aux systèmes MCCDMA,,» 2013.
- [19] M. NADJ et S. FATOUMATA, «TECHNIQUE HYBRIDE OFDM/OCDMA, SIMULATION SOUS-SCILAB 5.5.2,» Mostaganem , 2022.
- [20] B. Abdelkhalak, « Estimation du canal et élimination des interférences ICI dans les communications mobiles avec modulation OFDM».
- [21] T. M. Diarra, «Etude d'un Réseau d'Accès OFDM-PON,» Guelma, 2022.
- [22] S. P. Pierre GRUYER, «Modélisation d'un modulateur et démodulateur OFDM,» 2005.
- [23] M. K. Kazimierczuk., « RF Power Amplifiers. Wiley,» 2008.
- [24] J. (. Proakis, «Digital communications. (4th ed.),» McGrawHill., New York.
- [25] S. Arab, «Une étude sur la réduction du PAPR dans un système OFDM,» Canada, 2010.
- [26] A. safia et S. kaissa, «Simulation et performances d'algorithmes pour l'accès aux ressources à base de F-OFDM,» BEJAIA , 2020.
- [27] K. Atoub, «Optimisation de la FFT à virgule fixe basée sur les algorithmes génétiques,» 2013..
- [28] Alan Wolke, "What's your IQ-About Quadrature Signal"]Juin 2015