



Université ABBES LAGHROUR Khenchela  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Industriel  
جامعة عباس لغزور خنشلة  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
قسم الهندسة الصناعية



N° Série :.....

## Mémoire de fin d'étude

*Présenté pour l'obtention du diplôme de Master*

**Filière : Télécommunications**

**Spécialité : Systèmes des Télécommunications**

### THEME

**Etude et Analyse des Performances de la  
Technique OFDM et son Implémentation  
Dans les Communications sans Fil Basé sur le  
Standard IEEE 802.11**

*Réalisées par : - Melle. MAAROUK Soumia.  
- Melle. SOUAKRIA Yousra.*

*Devant Le Jury :*

<i>Président:</i>	<i>Dr. KHELFAOUI Fatima.</i>	<i>M.C.B UALK</i>
<i>Rapporteur:</i>	<i>Dr. CHERGUI Laid.</i>	<i>M.C.A UALK</i>
<i>Examineur:</i>	<i>Dr. HASSAD Mourad.</i>	<i>M.C.B UALK</i>

*Promotion 2020/2021*

يستخدم نقل البيانات على أساس تقنية تعدد الإرسال المتعامد بتقسيم التردد (OFDM) على نطاق واسع في العديد من المعايير مثل البث الصوتي الرقمي (بالإنجليزية : DAB Digital Audio Broadcasting) و الشبكات اللاسلكية المحلية (بالإنجليزية : Wireless Lan Area Network). يعد OFDM مهمًا جدًا في عمليات الإرسال اللاسلكية والمتنقلة التي تتطلب سرعة نقل عالية مثل عمليات الإرسال القائمة على معيار IEEE 802.11 (Wireless Fidelity).

في هذه الأطروحة ، نقدم دراسة نظرية لـ OFDM ، وكذلك تنفيذها عن طريق المحاكاة في MATLAB. يتم تقييم أداء تقنية OFDM من حيث معدلات الخطأ في الإشارة الرقمية (بالإنجليزية : Binary error rate (BER) ) في ظل ظروف مختلفة (أي مستوى نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR) ونوع التشكيل الرقمي المستخدم).

**كلمات البحث:** تقنية OFDM، اتصالات لاسلكية، معيار IEEE 802.11.

## Résumé

La transmission des données basée sur la technique de multiplexage par division fréquentielle orthogonale (*En anglais : Orthogonal frequency Division Multiplexing (OFDM)*) est largement employée dans plusieurs standards tels que la diffusion audio numérique (*En anglais : Digital Audio Broadcasting DAB*) et les réseaux locaux sans fil (*En anglais : Wireless Lan Area Network WLAN*). L'OFDM est très importante dans les transmissions sans fil et mobile exigeant une vitesse de transmission élevée telle que les transmissions basées sur le standard IEEE 802.11 (Wireless Fidelity WIFI).

Dans ce mémoire, nous présentons une étude théorique de l'OFDM, ainsi que son implémentation par des simulations sous MATLAB. Les performances de la technique OFDM sont évaluées en termes de taux d'erreur binaires (*En anglais : binary error rate (BER)*) sous différentes conditions (à savoir, le niveau de SNR et le type de modulation numérique utilisée).

**Mots clés :** La technique OFDM, les communications sans fil, le standard IEEE 802.11.

## Abstract

Data transmission based on the Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) technique is widely used in several standards such as digital audio broadcasting (DAB) and Wireless Lan Area Network (WLAN). OFDM is very important in wireless and mobile transmissions requiring high transmission speed such as transmissions based on the IEEE 802.11 (Wireless Fidelity WIFI) standard.

In this thesis, we present a theoretical study of OFDM, as well as its implementation by simulations in MATLAB. The performances of the OFDM technique are evaluated in terms of bit error rates (BER) under different conditions (namely, the level of signal to noise ratio (SNR) and the type of digital modulation used).

**Keywords :** OFDM technique, Wireless communication , IEEE 802.11 standard.

# Remerciement



*Nous remercions avant tout **ALLAH** tout puissant qui nous a donné la santé, le courage, la patience et la volonté pour réaliser ce travail. Nous tenons d'abord à remercier notre encadreur monsieur **Chergui Laid** pour ses judicieux conseils et ses critiques constructives tout au long de la réalisation de ce travail. Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions. Nous tenons à remercier particulièrement toutes les responsables de département Génie industriel ainsi que nos collègues.*

## Dédicace

*Je dédie mes efforts et ce modeste travail :*

*Premièrement à l'ame de mon père que Dieu ait pitié de lui et le place dans ses havres.*

*À ma très chère mère, qui présente pour moi la source de tendresse.*

*À mes belles soeurs Hanan et Sarah pour l'attention, L'aide et le soutien qu'elles m'ont apportées.*

*À mon beau frère Salim.*

*À le bonheur de notre famille la petite : Russline que Dieu la garde pour nous.*

*À mes proches et mes amies qui ont encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.*

*À tous mes membres de ma famille, grands et petits.*

*À ma plus belle amie Yousra qui me donne le soutien que Dieu te protège pour moi.*

*Merci à tous et toutes.*

*Soumia*

## Dédicace

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mon très chère père .*

*A ma très chère mère*

*Auquels je dis ce que je suis que Dieu vous protège et vous prête une  
bonne santé et une longue vie .*

*A mes belle sœur, Maha et Samia qui sont toujours à mes cotés pour me  
soutenir et m'encourager .*

*A le bonheur de notre famille : Rinad, Loudjaine, Elenna.*

*A ma douce tante Halima .*

*A ma famille, mes proches et a ceux que me donné de l'amour et la  
vivacité.*

*A ma très chère amie Soumia pour l'attention et le soutien qu'elle m'  
apportée.*

*A tous ceux que j'aime, et à qui je souhaite plus de succèsés*

*Merci*

*Yousra*

## Liste des Figures

<b>Figure 1.1.</b> Evolution d'un signal à travers une chaîne d'acquisition et de restitution de données sans modification des valeurs .....	4
<b>Figure 1.2.</b> Signal et son spectre borné .....	5
<b>Figure 1.3.</b> Signal échantillonné par un peigne de Dirac à une cadence $T_e$ .....	5
<b>Figure 1.4.</b> Caractéristiques de transfert d'un CAN-Quantification à 4 bits .....	7
<b>Figure 1.5.</b> Schéma d'une chaîne de transmission numérique.....	8
<b>Figure 1.6.</b> Modulation ASK .....	11
<b>Figure 1.7.</b> (a) signal ASK dans le domaine temporel, (b) signal ASK dans le domaine spectral .....	11
<b>Figure 1.8.</b> Représentation polaire d'une porteuse .....	12
<b>Figure 1.9.</b> Forme temporelle d'une porteuse à deux amplitudes .....	12
<b>Figure 1.10.</b> Représentation polaire d'une porteuse à deux états .....	13
<b>Figure 1.11.</b> (a) forme temporelle du signal modulé par la FSK, (b) Le spectre du signal FSK .....	13
<b>Figure 1.12.</b> (a) forme temporelle du signal BPSK, (b) spectre du signal BPSK.....	14
<b>Figure 1.13.</b> Représentation polaire d'une porteuse à deux états de phase .....	14
<b>Figure 1.14.</b> Schéma général d'un modulateur IQ.....	16
<b>Figure 1.15.</b> Constellation pour la modulation QPSK.....	17
<b>Figure 1.16.</b> Schéma d'un démodulateur QPSK.....	17
<b>Figure 1.17.</b> Schéma synoptique d'une chaîne de communication .....	19
<b>Figure 2.1.</b> Exemple d'architecture de réseau sans fil .....	24
<b>Figure 2.2.</b> Classification des réseaux sans fil.....	27
<b>Figure 2.3.</b> Organisation du groupe 802 .....	29
<b>Figure 2.4.</b> Le mode infrastructure .....	30
<b>Figure 2.5.</b> Le mode ad-hoc .....	30
<b>Figure 3.1.</b> Répartition fréquentielle des porteuses .....	36
<b>Figure 3.2.</b> Schéma de principe d'un modulateur OFDM .....	37
<b>Figure 3.3.</b> Signaux multi-trajets .....	37
<b>Figure 3.4.</b> Répartition des périodes dans le cas d'un multiplexage TDM.....	38
<b>Figure 3.5.</b> Représentation d'un multiplex TDM (4 voies vers 1) en fonction des données initiales .....	39

<b>Figure 3.6.</b> Technologie WDM .....	40
<b>Figure 3.7.</b> Répartition des sous-bandes dans le cas d'un multiplexage WDM.....	40
<b>Figure 3.8.</b> La technique de multiplexage WDM.....	41
<b>Figure 3.9.</b> La technique de multiplexage FDM .....	41
<b>Figure 3.10.</b> Exemple d'une base orthogonale .....	42
<b>Figure 3.11.</b> (a) spectre d'une sous-porteuse, (b) spectre d'un signal OFDM .....	44
<b>Figure 3.12.</b> Schéma de principe d'un modulateur .....	45
<b>Figure 3.13.</b> Spectre des différentes porteuses .....	46
<b>Figure 3.14.</b> Spectre du signal OFDM pour 8 porteuses .....	46
<b>Figure 3.15.</b> Schéma de principe du modulateur OFDM .....	47
<b>Figure 3.16.</b> Chaîne de transmission .....	49
<b>Figure 3.17.</b> Démodulateur utilisant l'FFT .....	50
<b>Figure 3.18.</b> Modulateur utilisant l'IFFT .....	50
<b>Figure 3.19.</b> Spectre du signal OFDM .....	51
<b>Figure 3.20.</b> Intervalle de garde par prolongation cyclique .....	53
<b>Figure 4.1.</b> Schéma synoptique d'un modulateur OFDM .....	58
<b>Figure 4.2.</b> Schéma synoptique d'un démodulateur OFDM .....	59
<b>Figure 4.3.</b> Diagramme de constellation .....	64
<b>Figure 4.4.</b> Image originale transmise .....	64
<b>Figure 4.5.</b> Diagramme de constellation BPSK avec un SNR=0db .....	64
<b>Figure 4.6.</b> Diagramme de constellation .....	64
<b>Figure 4.7.</b> Diagramme de constellation QPSK .....	65
<b>Figure 4.8.</b> Image originale transmise .....	65
<b>Figure 4.9.</b> Diagramme de constellation QPSK bruité avec un SNR=0db.....	65
<b>Figure 4.10.</b> Image reçue .....	65
<b>Figure 4.11.</b> Diagramme de constellation QPSK bruité avec un SNR= 5db.....	65
<b>Figure 4.12.</b> Image reçue .....	65
<b>Figure 4.13.</b> Diagramme de constellation 16-QAM.....	66
<b>Figure 4.14.</b> Image originale transmise .....	66
<b>Figure 4.15.</b> Diagramme de constellation 16-QAM bruité .....	66
<b>Figure 4.16.</b> Image reçue .....	66
<b>Figure 4.17.</b> Diagramme de constellation 16-QAM bruité .....	66
<b>Figure 4.18.</b> Image reçue .....	66
<b>Figure 4.19.</b> Diagramme de constellation 32-QAM.....	67

<b>Figure 4.20.</b> Image originale transmise .....	67
<b>Figure 4.21.</b> Diagramme de constellation 32-QAM bruité avec un SNR=20db .....	67
<b>Figure 4.22.</b> Image reçue .....	67
<b>Figure 4.23.</b> Diagramme de constellation 64-QAM .....	67
<b>Figure 4.24.</b> Image originale transmise .....	67
<b>Figure 4.25.</b> Diagramme de constellation 64-QAM bruité avec un SNR=10db .....	68
<b>Figure 4.26.</b> Image reçue .....	68
<b>Figure 4.27.</b> Diagramme de constellation 64-QAM bruité avec un SNR=20db .....	68
<b>Figure 4.28.</b> Image reçue .....	68
<b>Figure 4.29.</b> Taux d'erreur binaires obtenue pour différentes techniques de modulations et pour différents niveau du SNR .....	68
<b>Figure 4.30.</b> Diagramme de constellation QPSK avec un SNR =20db .....	69
<b>Figure 4.31.</b> Réponse impulsionnelle du canal .....	69
<b>Figure 4.32.</b> Image originale transmise .....	69
<b>Figure 4.33.</b> Image reçue .....	69
<b>Figure 4.34.</b> Taux d'erreur binaire obtenue pour la QPSK et pour différents niveau d u SNR avec et sans canal à évanouissement .....	70



## Liste des tableaux

<b>Tableau 2.1.</b> Comparaison des normes Wi-Fi.....	26
<b>Tableau 2.2.</b> Modèle en couche de l'IEEE 802.1.....	31
<b>Tableau 2.3.</b> Les couches physiques de protocole 802.11a, b et g.....	32
<b>Tableau 4.1.</b> Paramètre de la simulation.....	62
<b>Tableau 4.2.</b> Taux d'erreur binaire (BER) en fonction des techniques de modulation et du SNR ....	63

## Liste des symboles

**ADSL:** Asymmetric Digital Subscriber Line.

**ASK:** Amplitude Shift Keying.

**AP:** Access Point.

**BSS:** Basic Service Set.

**BPSK:** Binary Phase Shift Keying.

**BRAN:** Broadband Radio Access Network.

**BER:** Bit Error Rate.

**CAN:** Convertisseur Analogique Numérique.

**DAB:** Digital Audio Broadcasting.

**DVB:** Digital Video Broadcasting.

**DVB-T:** Digital Video Broadcasting-Television.

**DSL:** Digital Subscriber Line.

**DS:** Distribution System.

**DSSS:** Direct Sequence Spread Spectrum.

**ETSI:** European Telecommunications Standards Institute.

**ESS:** Extended Service Set.

**EBU:** European Broadcasting Union.

**FM:** Frequency Modulation.

**FSK:** Frequency Shift Keying.

**FHSS:** Frequency Hopping Spread Spectrum.

**FDM:** Frequency Division Multiplexing.

**FDMA:** Frequency Division Multiplexing Access.

**FFT:** Fast Fourier Transform.

**GSM:** Global System for Mobile communications.

**GPRS:** Global Packet Radio Service.

**HSDPA:** High Speed Downlink Packet Access.

**HR:** High Rate.

**HF:** Haute Fréquence.

**IEEE:** Institute of Electrical and Electronics Engineer.

**IS-95:** Interim Standard 95.

**IBSS:** Independent Basic Service Set.

**IT:** Intervalle de Temp.

**IFFT:** Inverse Fast Fourier Transform.

**ICI:** Inter Carrier Interference.

**ISI:** Inter Symbole Interference.

**LOS:** Line Of Sight.

**LLC:** Logical Link Control.

**MTC:** Multiple Transmit Channel.

**MCM:** Multi Carrier Modulation.

**Mbps:** Méga bit par seconde.

**MAC:** Medium Access Control.

**MC-CDMA:** Multi Carrier-Code Division Multiple Access.

**NLOS:** No Line of Sight.

**OFDM:** Orthogonal Frequency Division Multiplexing.

**OSI:** Open System Interconnection.

**OOK:** On Off Keying.

**PSK:** Phase Shift Keying.

**PDA:** Personal Digital Assistant.

**PLC:** Power Line Communication.

**QAM:** Quadrature Amplitude Modulation.

**QPSK:** Quaternary Phase Shift Keying.

**RF:** Radio Frequency.

**RoF:** Radio over Fiber.

**RSB:** Rapport Signal Bruit.

**TDM:** Time Division Multiplexing.

**TDMA:** Time Division Multiplexing Access.

**TSF:** Télégraphie sans fil.

**UHF:** Ultra High Frequency.

**UMTS:** Universal Mobile Telecommunication System.

**VHF:** Very High Frequency.

**Wi-Fi:** Wireless Fidelity.

**WPAN:** Wireless Personal Area Network.

**WLAN:** Wireless Local Area Network.

**WMAN:** Wireless Metropolitan Area Network.

**WiMax:** Worldwide interoperability for Microwave Access.

**WWAN:** Wireless Wide Area Network.

**WDS:** Wireless Distribution System.

**WDM:** Wavelength Division Multiplex.

# Table des matières

**Introduction Générale..... 1**

## **Chapitre 1**

### **Technique de transmission numérique**

1.1. Introduction .....	3
1.2. Echantillonnage .....	3
1.2.1. Théorème de l'échantillonnage .....	4
1.2.1.1. Définition .....	4
1.2.2. Théorème de Shannon .....	6
1.3. Quantification .....	6
1.4. Transmission numérique .....	7
1.4.1. Chaîne de transmission numérique.....	7
1.4.2. Canal de transmission.....	8
1.4.3. Caractéristiques d'une transmission.....	8
1.4.3.1. Signal et bruit .....	8
1.4.3.2. Atténuation .....	9
1.4.3.3. Débit binaire .....	9
1.4.4. Transmission en bande de base .....	9
1.5. Modulations numériques utilisées dans le système OFDM .....	9
1.6. Caractéristique de la transmission numérique.....	10
1.7. Taux d'erreur binaire.....	10
1.8. Modulation ASK .....	10
1.8.1. Diagramme polaire de la modulation ASK .....	12
1.9. Modulation FSK .....	13
1.10. Modulation PSK (BPSK) .....	14

1.11. Modulation M-aires .....	15
1.12. La modulation QPSK.....	16
1.13. La démodulation QPSK.....	17
1.14. Modulation multi-porteuse .....	18
1.15. Les canaux .....	19
1.15.1. Canal .....	19
1.15.2. Différents canaux de transmission.....	19
1.16. La Transformée de Fourier .....	19
1.16.1. Définition.....	19
1.16.2. La transformée de Fourier discrète .....	20
1.16.3. La transformée de Fourier discrète inverse .....	20
1.17. Conclusion .....	21

## **Chapitre 02**

### **Les réseaux sans fil**

2.1. Introduction.....	23
2.2. Rappel sur les réseaux sans fil.....	23
2.2.1. Les réseaux sans fil.....	23
2.2.2. Les catégories de réseaux sans fil.....	24
2.2.2.1. Réseaux personnels.....	24
2.2.2.1.1. Bluetooth.....	24
2.2.2.1.2. ZigBee.....	25
2.2.2.2. Les réseaux locaux.....	25
2.2.2.2.1. Les réseaux Wi-Fi.....	25
2.2.2.2.2. Les réseaux HiperLan 2 .....	26
2.2.2.3. Les réseaux métropolitains .....	26

2.2.2.4. Les réseaux étendus .....	27
2.3. Domaine d'application des réseaux sans fil .....	27
2.4. Les avantages des réseaux sans fil .....	28
2.5. La norme IEEE 802 .....	28
2.6. Le protocole de communication IEEE 802.11 .....	29
2.6.1. Mode infrastructure .....	30
2.6.2. Le mode appelé ad-hoc.....	30
2.7. Modèle en couche.....	31
2.7.1. Couche physique .....	31
2.7.2. La couche liaison des données .....	32
2.7.2.1. La sous couche LLC.....	33
2.7.2.2. La sous couche MAC .....	33
2.8. Conclusion .....	33

### **Chapitre 3**

#### **Technique OFDM**

3.1. Introduction .....	35
3.2. La technique OFDM.....	35
3.2.1. Principe .....	36
3.3. Canal à trajets multiple.....	37
3.4. Le multiplexage .....	38
3.4.1. Le multiplexage temporel.....	38
3.4.2. Le multiplexage en longueur d'onde.....	39
3.4.3. Le multiplexage fréquentiel.....	41
3.5. Les modulations multi porteuses OFDM .....	41
3.6. Notions d'orthogonalité.....	42

3.6.1. Application au procédé OFDM dans le domaine temporel .....	42
3.6.2. Application au procédé OFDM dans le domaine fréquentielle .....	43
3.6.3. Principe de la modulation OFDM .....	44
3.6.4. Principe de la démodulation OFDM .....	47
3.6.5. Principe du modulateur et du démodulateur utilisant les transformées de Fourier discrètes .....	48
3.7. Modulation de chaque sous-porteuse du signal OFDM .....	51
3.8. Problème des interférences .....	51
3.9. Intervalle de garde.....	52
3.10. Avantages et inconvénients de la technique OFDM.....	53
3.10.1. Les principaux avantages de l'OFDM.....	53
3.10.2. Les inconvénients de l'OFDM.....	54
3.11. Les domaines d'applications de l'OFDM.....	54
3.12. Conclusion .....	54

## **Chapitre 4**

### **Expérimentations et discussions**

4.1. Introduction.....	56
4.2. Description du système OFDM typique en base de bande .....	56
4.3. L'émetteur OFDM .....	56
4.4. Le récepteur OFDM.....	60
4.5. Modélisation du canal.....	61
4.6. Evaluation des performances du système OFDM sous différentes conditions .....	61
4.7. Evaluation en absence de l'effet de l'évanouissement de canal .....	61
4.8. Interprétation des résultats présentés dans les figures .....	63



4.9. Modulation BPSK .....	64
4.10. Modulation QPSK .....	65
4.11. Modulation 16-QAM.....	66
4.12. Modulation 32-QAM.....	67
4.13. Modulation 64-QAM.....	67
4.14. Evaluation en présence de l'effet de l'évanouissement de canal .....	69
4.15. Conclusion .....	70
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>72</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>74</b>

# *Introduction Générale*

La communication sans fil est devenue de plus en plus importante non seulement dans les applications professionnelles mais aussi dans beaucoup de domaines de notre vie quotidienne et dans l'électronique grand public [1].

Beaucoup de systèmes de communications utilisent les techniques de modulations connues sous le nom de multiplexage par division fréquentielle orthogonale (*En anglais : Orthogonal Frequency Division Multiplexing OFDM*) [1]. L'idée de l'OFDM a commencé en 1966 [2], mais elle n'a pas été utilisée jusqu'à la dernière décennie où elle était employée comme modem dans les communications sans fil [3]. L'OFDM est largement utilisée dans plusieurs standards tels que la diffusion audio numérique (*En anglais : Digital Audio Broadcasting DAB*) et les réseaux locaux sans fil (*En anglais : Wireless Lan Area Network WLAN WLAN*) [4].

Dans ce mémoire, nous présentons une étude et une analyse théorique et expérimentale des performances de la technique OFDM, ainsi qu'une étude théorique de son utilité dans les communications sans fil basé sur le standard IEEE 802.11. Nous implémentons le système OFDM sous MATLAB, et nous analysons ces performances sous différentes conditions telles que le type de modulation numérique utilisé et l'effet du nombre d'états sur la sensibilité au bruit de canal ainsi que l'effet du canal lui-même sur le signal transmis.

Notre mémoire est composé de quatre chapitres. Le premier chapitre est consacré à la présentation des techniques de transmission numérique, notamment leurs caractéristiques, un rappel sur les modulations numériques et la transformée de Fourier discrète directe et inverse. Le deuxième chapitre traite les différents types de réseaux sans fil, plus particulièrement le protocole de communication IEEE 802.11 (*En anglais : Wireless fidelity Wi-Fi*) et ces couches physiques et liaison de données. Le troisième chapitre est dédié à la technique de transmission OFDM, son principe de fonctionnement ainsi que ses caractéristiques. Enfin, dans le quatrième chapitre nous présentons une étude des performances de la technique OFDM par des simulations sous MATLAB.

# *Chapitre 01*

*Techniques de Transmission*

*Numérique*

## 1.1 Introduction

Les systèmes de transmission numérique véhiculent de l'information entre une source et un destinataire en utilisant un support physique comme le câble, la fibre optique ou, encore, la propagation sur un canal radioélectrique. Les signaux transportés peuvent être soit directement d'origine numérique comme dans les réseaux de données, soit d'origine analogique (parole, image...) mais convertis sous une forme numérique. La tâche du système de transmission est d'acheminer le signal de la source vers le destinataire avec le plus de fiabilité possible [5].

La modulation numérique est l'opération qui permet d'adapter le signal à émettre au canal de transmission et par conséquent d'assurer un débit maximum de données binaires avec un taux d'erreur acceptable.

Dans ce chapitre nous présentons les techniques de transmission numérique et leurs caractéristiques. Nous présentons des rappels sur les modulations numériques et la transformée de Fourier discrète directe et inverse ainsi que son algorithme de calcul rapide.

## 1.2 Echantillonnage [6]

L'échantillonnage consiste à représenter un signal analogique continu  $s(t)$  par un ensemble de valeurs  $s(nT_e)$  avec  $n$  entier situées à des instants discrets espacés de  $T_e$  constante, appelée la période d'échantillonnage. Cette opération est réalisée par un circuit appelé « préleveur ou échantillonneur » symbolisé souvent par un interrupteur. Dans une première phase, nous pouvons faire l'hypothèse que cette durée de prélèvement du signal est très courte et négligeable. En supposant que le système numérique ne réalise aucun traitement sur le signal enregistré, l'enchaînement des différents signaux dans une chaîne d'acquisition et de restitution de données par un système numérique est celui présenté sur la figure 1.1. Le signal analogique d'entrée  $V_e$  est échantillonné pour donner un signal discrétisé temporellement  $V_e(nT_e)$ .

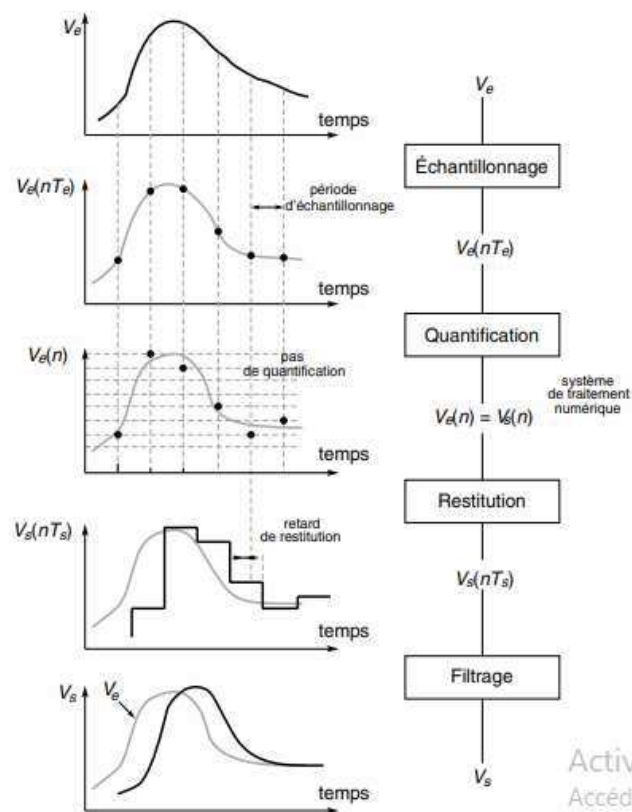


Figure 1.1. Évolution d'un signal à travers une chaîne d'acquisition et de restitution de données sans modification des valeurs [6].

$T_e$  Est la période d'échantillonnage et  $T_s$  la période de restitution supposée égale à  $T_e$ .

## 1.2.1 Théorème de l'échantillonnage [6]

### 1.2.1.1 Définition

On suppose que le signal  $s(t)$  a un spectre à support borné, c'est-à-dire que le spectre est limité :  $S(f) = 0$  pour  $f > f_{max}$ . Cette limitation spectrale est soit naturelle (répartition initiale du signal), soit artificielle en utilisant un filtre comme est montrée dans la figure 1.2. Envisagé dans le domaine temporel, le processus d'échantillonnage revient à multiplier le signal analogique  $s(t)$  par une série d'impulsions unité comme est montré dans la figure 1.3. Le signal obtenu est alors constitué d'une succession d'impulsions, dont la hauteur est modulée par l'amplitude du signal échantillonné. Cette opération mathématique, permettant

d'avoir une représentation du signal échantillonné  $s_e(t)$ , s'obtient en utilisant le peigne de Dirac. Le peigne de Dirac, utilisé dans l'échantillonnage des signaux, est une suite de pics de Dirac régulièrement espacés de la période d'échantillonnage  $T_e$  :

$$Pgn T_e(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta(t - k.T_e) \quad (1.1)$$

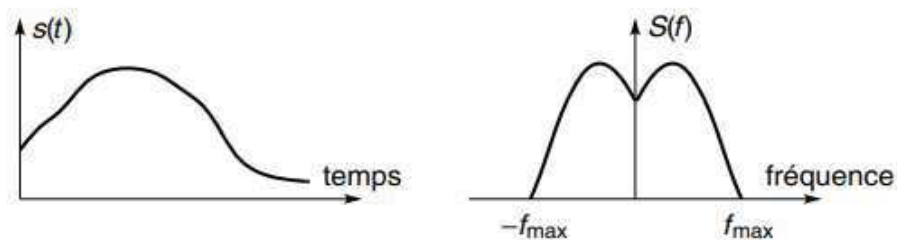


Figure 1.2. Signal et son spectre borné [6].

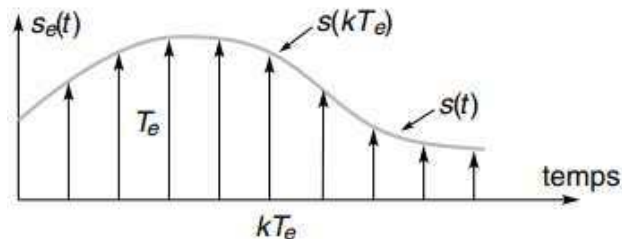


Figure 1.3. Signal échantillonné par un peigne de Dirac à une cadence  $T_e$  [6].

Le signal échantillonné  $s_e(t)$  est une suite de pics de Dirac dont les poids sont les valeurs du signal  $s(t)$  aux instants  $kT_e$ . Nous avons donc l'expression de  $s_e(t)$  :

$$s_e(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} s(kT_e). \delta(t - k.T_e) \quad (1.2)$$

D'après les propriétés du pic de Dirac, l'expression 1.2 du signal échantillonné peut être mise sous la forme de l'expression suivante qui est rigoureusement équivalente :

$$s_e(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} s(t) \cdot \delta(t - k \cdot T_e) = s(t) \cdot \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta(t - k \cdot T_e) \quad (1.3)$$

Où :

$$s_e(t) = s(t) \cdot Pgn_{T_e}(t) \quad (1.4)$$

### 1.2.2 Théorème de Shannon [7]

Le théorème de Shannon concerne les signaux dont le spectre possède une fréquence maximale  $f_{max}$ , que l'on appelle des signaux à bande limitée. Pour que le signal  $s(t)$  puisse être entièrement reconstruit à partir de ses échantillons, il faut et il suffit que :

$$f_e \geq 2f_{max} \quad (1.5)$$

La fréquence d'échantillonnage  $f_e$  doit être strictement supérieure ou égale à deux fois la plus grande fréquence présente dans le spectre du signal continu (condition de Nyquist-Shannon).

### 1.3 Quantification [8]

L'opération de quantification consiste à attribuer un nombre binaire à toute valeur prélevée au signal lors de l'échantillonnage. Le convertisseur analogique numérique (CAN) est le dispositif permettant de réaliser cette opération. Chaque niveau de tension est codé sur  $p$  bits, chaque bit pouvant prendre deux valeurs (0 ou 1). Donc un convertisseur à  $p$  bits possède  $2^p$  niveaux de quantification. Considérons un CAN à 4 bits, il n'y a donc que  $2^4 = 16$  valeurs possibles attribuables à toutes les valeurs prélevées lors de l'échantillonnage. L'opération se fait donc avec une perte d'information d'autant plus grande que  $p$  est petit.



La figure 1.4 représente une partie de la caractéristique de transfert d'un convertisseur 4 bits. A tous les niveaux de tension d'un même palier, le convertisseur fait donc correspondre un seul et même nombre binaire :

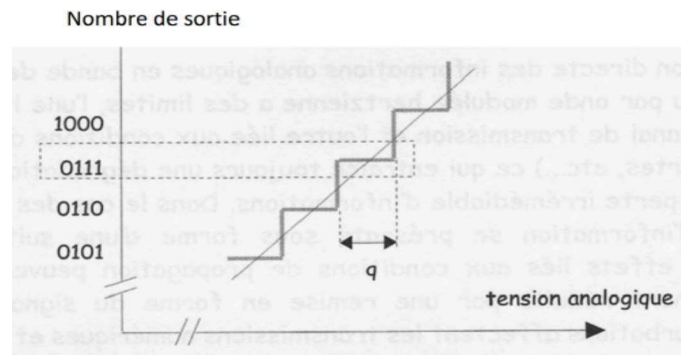


Figure 1.4. Caractéristiques de transfert d'un CAN-Quantification à 4 bits [8].

$q$  est le pas de quantification, il correspond à la plus petite variation de tension que le convertisseur peut coder. On voit bien que plus  $q$  est faible, meilleure sera la précision de codage.

## 1.4 Transmission numérique [9]

Depuis une vingtaine d'années les progrès fulgurants réalisés dans le domaine de l'électronique numérique entraînent le passage progressif de la transmission analogique à la transmission numérique de l'information.

La transmission numérique consiste à faire transiter les informations sur le support physique de communication sous forme de signaux numériques.

### 1.4.1 Chaîne de transmission numérique [10]

La chaîne de transmission permet le transport en bande de base d'une information sous forme de données numériques codées en binaire, elle correspond à une sécession d'étapes : transduction, encodage, émission, réception, décodage, transduction.

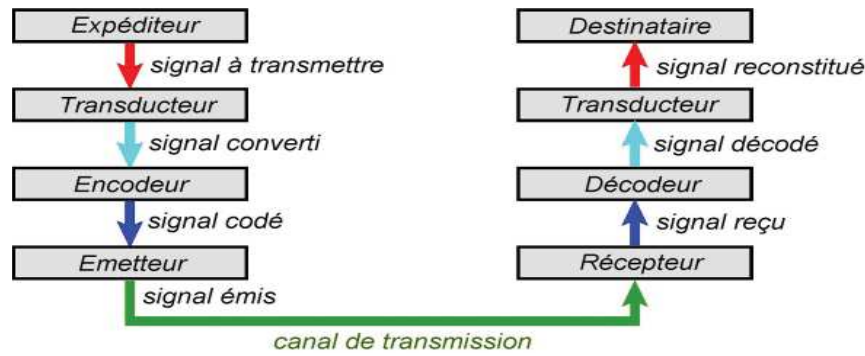


Figure 1.5. Schéma d'une chaîne de transmission numérique [10].

## 1.4.2 Canal de transmission [11]

On appelle canal de transmission tout milieu physique servant de support au transfert de l'information entre deux points distants, le canal de transmission est le dispositif qui assure le transport de l'information entre l'émetteur et le récepteur, appelé aussi canal de propagation.

## 1.4.3 Caractéristiques d'une transmission [12]

### 1.4.3.1 Signal et bruit

Toute transmission implique la superposition au signal transmis de perturbations non désirées, appelées bruit ou parasites. Le rapport signal sur bruit est le quotient sans dimension de la puissance du signal  $P_s$  sur celle du bruit  $P_b$  :

$$RSB = \frac{P_s}{P_b} \quad (1.6)$$

$P_s$  : Puissance du signal (Watts)

$P_b$  : Puissance du bruit (Watts)

On peut exprimer ce rapport en décibels :

$$RSB(dB) = 10 \log_{10} \left( \frac{P_s}{P_b} \right) \quad (1.7)$$

RSB : Rapport signal bruit exprimé en décibel (dB).

### 1.4.3.2 Atténuation

L'atténuation en décibel est définie par :

$$A (dB) = -10 \log_{10} \left( \frac{P_s}{P_e} \right) \quad (1.8)$$

A : Atténuation du signal exprimé en décibel (dB)

### 1.4.3.3 Débit binaire

Les signaux numériques sont constitués d'une suite de bits, des nombres binaires. Le débit binaire (*En anglais : bit rate BR*) est la quantité d'information transmise par unité de temps sur un canal de transmission. Il s'exprime en bits par seconde (bps).

### 1.4.4 Transmission en bande de base [13]

Une transmission en bande de base consiste à transmettre un signal sans déplacer son spectre (Sans modulation).

Le signal peut être transmis après modulation, qui est une technique qui consiste à déplacer son spectre. En règle générale, on translate son spectre vers une plus haute fréquence par une modulation linéaire ou non linéaire.

## 1.5 Modulations numériques utilisées dans le système OFDM [14]

La modulation numérique consiste à moduler une porteuse Haute fréquence (HF) par une information numérique sous forme binaire. Le signal binaire modulant est caractérisé par un débit D (bit/s) de valeur très inférieur à celle de la fréquence porteuse  $F_0$ .

En distingue trois grandes classes de modulation numérique :

- 1- Modulation par déplacement d'amplitude (*En anglais : amplitude shift keying (ASK)*) ;
- 2- Modulation par déplacement de fréquence (*En anglais : Frequency shift keying (FSK)*) ;
- 3- Modulation par déplacement de phase (*En anglais : Phase shift keying (PSK)*).

## 1.6 Caractéristique de la transmission numérique [14]

La caractéristique la plus importante d'une transmission numérique est son efficacité spectral  $\eta$ , qui est définie par :

$$\eta = \frac{D}{BW} (\text{bit/sec}) \quad (1.9)$$

Où D est le débit binaire exprimé en bits par seconds, et BW est l'encombrement spectral du signal modulé. Les techniques de modulation ASK, PSK et FSK ont une efficacité spectrale modeste inférieure ou égale à 1.

## 1.7 Taux d'erreur binaire [14]

Le taux d'erreur binaire (En anglais : Bit error rate BER) est une mesure de l'état de dégradation au niveau des données binaires reçus. Il permet d'indiquer le niveau de dégradation que subit la porteuse modulé lors de son passage à travers le canal de transmission qui est connu d'être une source de perturbations et de bruits. Il est définie par :

$$\text{BER} = \frac{\text{Nombre de bits erronés}}{\text{Nombre de bits transmis}} \quad (1.10)$$

Applications	BER (Bit/Sec)
TV numérique	$< 10^{-6}$
téléphonie GSM	$< 10^{-4}$

## 1.8 Modulation ASK [15]

La technique est des plus simples, la porteuse est juste multipliée par le signal numérique de débit binaire D.

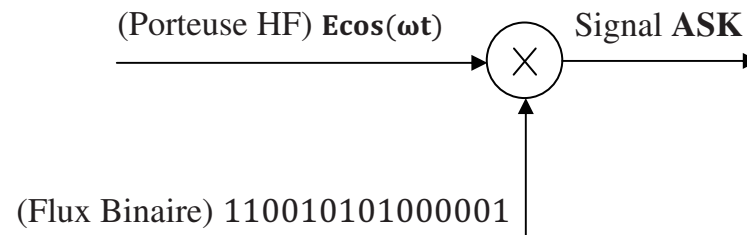


Figure1.6. Modulation ASK.

C'est une modulation toute ou rien où l'indice de modulation  $m$  est de 100%, c'est une modulation de type (on/off Keying); on parle alors de modulation en tout ou rien ou OOK (on off keying).

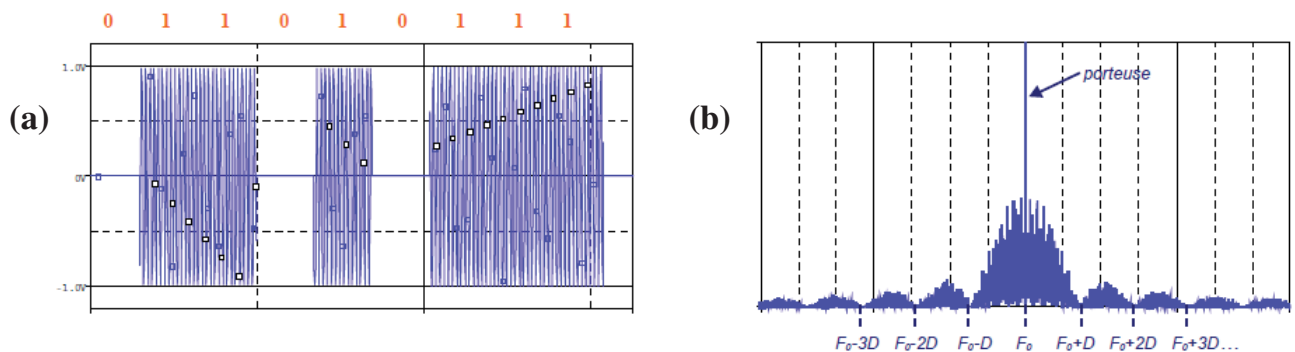


Figure 1.7. (a) Signal ASK dans le domaine temporel, (b) Signal ASK dans le domaine spectral.

Le spectre de cette modulation, est un spectre de modulation d'amplitude classique La porteuse est entourée de 2 bandes latérales qui correspondent au spectre des données. Avec des données brutes, L'encombrement spectral est en théorie infini, ce qui est inacceptable.

Le spectre du signal ASK est formé d'un lobe central de largeur  $2D$ , qui correspond au spectre de données, entouré de plusieurs lobes secondaires. Après filtrage par un filtre optimal nous obtenons un spectre avec le lobe central uniquement. L'efficacité spectrale est de  $1/2$ .

### 1.8.1 Diagramme polaire de la modulation ASK

Ce diagramme permet de donner une représentation de l'état de la porteuse sous forme polaire dans le plan.

Le point représente une porteuse d'amplitude  $\hat{E}$  et de phase à l'origine nulle.

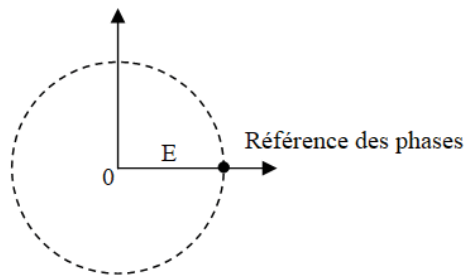


Figure 1.8. Représentation polaire d'une porteuse.

La figure 1.9 présente la forme temporelle d'un signal modulé par la modulation ASK à deux états. Dans ce cas, la porteuse est à deux amplitudes  $E$  et  $E/2$ , et par conséquent le diagramme polaire prend la forme présentée dans la figure 1.10.

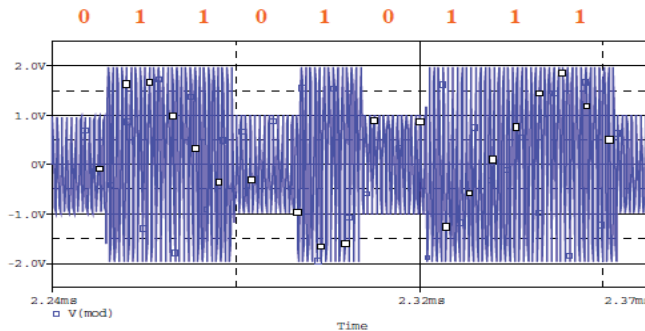


Figure 1.9. Forme temporelle d'une porteuse à deux amplitudes.

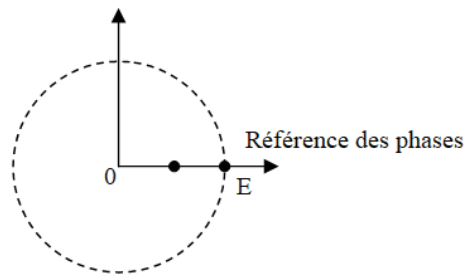


Figure 1.10. Représentation polaire d'une porteuse à deux états.

### 1.9 Modulation FSK [15]

Dans ce type de modulation la porteuse HF de fréquence  $F_0$  est modulé en fréquence par le signal numérique de données. La fréquence change ou saute d'une valeur  $F_A$  qui correspond au bit '0' à une valeur  $F_B$  qui correspond au bit '1'. Les deux valeurs  $F_A$  et  $F_B$  sont symétriques par rapport à  $F_0$ .

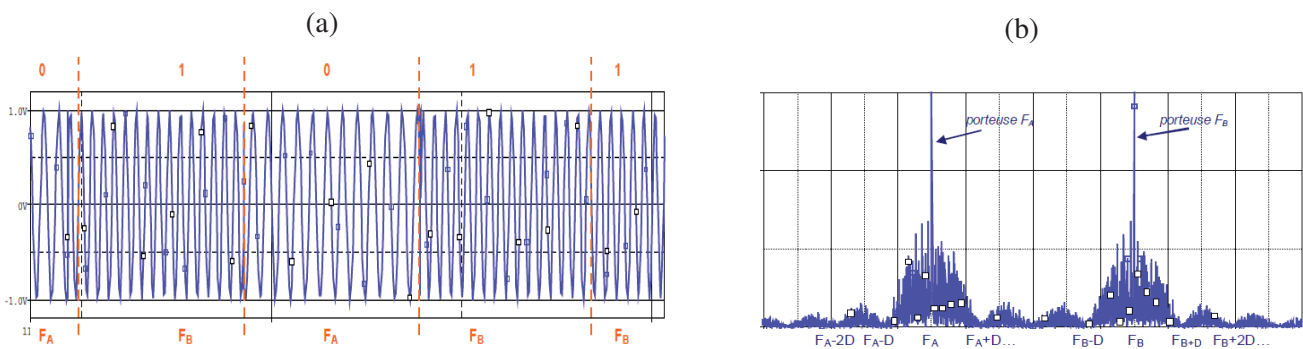


Figure 1.11. (a) Forme temporelle du signal modulé par la FSK. (b) Le spectre du signal FSK.

D'après la forme temporelle du signal FSK de la figure 1.11 (a), nous remarquons que le choix non optimale des valeurs  $F_A$  et  $F_B$  entraîne un saut de phase de la porteuse lors du changement de la fréquence. Le spectre du signal FSK ce présente comme s'il est formée de deux spectres l'un de poreuse  $F_A$  et l'autre de porteuse  $F_B$ .

### 1.10 Modulation PSK (BPSK) [15]

Il s'agit d'une modulation de phase, où la phase de la porteuse HF qui est modulé par les données binaires de tel sorte que la phase soit égale à 0 pour le cas d'un bit '0' et égale à 1 pour le cas d'un bit '1'.

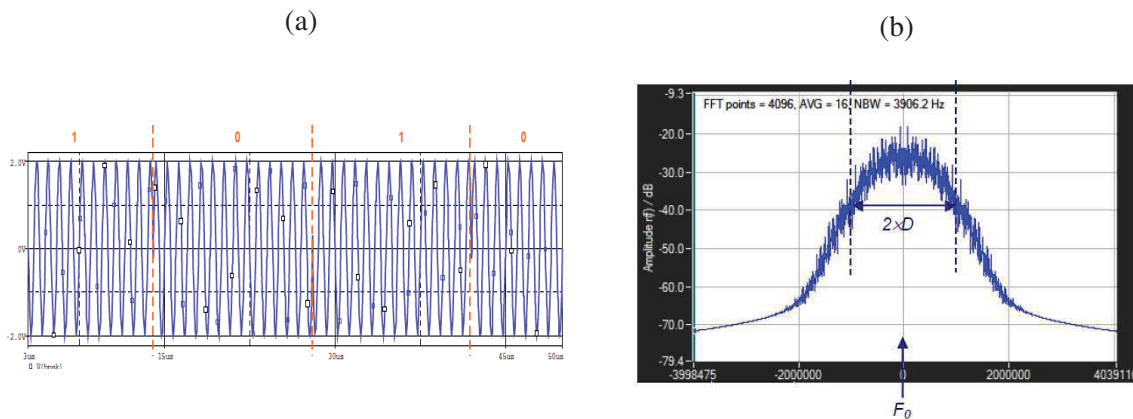


Figure 1.12. (a) forme temporelle du signal BPSK, (b) Spectre du signal BPSK.

D'après la figure 1.12. (a), la porteuse est caractérisée par une amplitude constante et deux phases différentes. La figure 1.12. (b) représente le spectre du signal BPSK obtenu après filtrage optimal.

Le digramme polaire peut être représenté dans la figure 1.13.

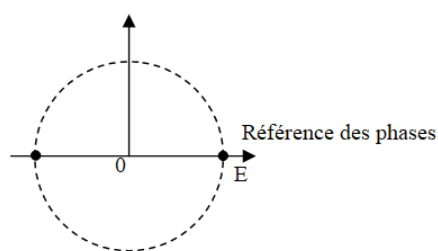


Figure 1.13. Représentation polaire d'une porteuse à deux états de phase.

Les modulations ASK et PSK sont caractérisés par une efficacité spectrale qui ne dépasse pas l'unité, ce qui est insuffisant de point de vu débits à assurer dans un canal donné.



### 1.11 Modulations M-aires [15]

Les modulations M-aires sont des modulations à M états (M=4, 8, 16...). On distingue deux catégories :

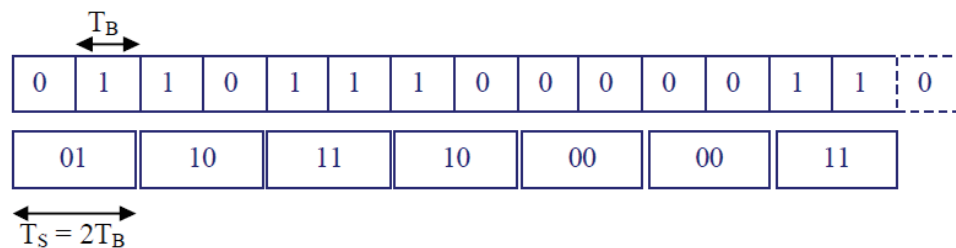
- 1- Les modulations de phases (M-PSK)
- 2- Les modulations mixtes (Phase et Amplitude) telles que les modulations M-QAM.

Le principe de cette technique de modulation est simple, on regroupe le flux de données binaires de débit D en symboles de n bits. La durée du symbole obtenu est donnée par :

$$T_s = n \times T_B$$

Le débit symbolique exprimé en bauds par secondes est définie par :

$$R = D/n \quad (\text{Bauds})$$



La figure ci-dessous représente le cas où n = 2. Avec des symboles de deux bits (n = 2), nous pouvons obtenir 4 mots (2<sup>2</sup>), qui sont :

$$00, 01, 10, 11$$

Cet alphabet doit être modulé par une porteuse à 04 états.

Dans le cas générale, la porteuse va comportée M=2<sup>2</sup> états différents pour représenté la totalité de l'alphabet.

Une porteuse  $v = \hat{E} \cdot \cos(\Omega_0 t + \varphi)$  de pulsation  $\Omega_0$  et d'amplitude  $\hat{E}$  peut être vue comme une combinaison de 2 porteuses en quadrature  $\cos\Omega_0 t$  et  $\sin\Omega_0 t$ , d'amplitudes respectives  $\hat{E} \cos\varphi$  et  $\hat{E} \sin\varphi$ .

$$v = \hat{E}. \cos\varphi. \cos\Omega_0 t - \hat{E}. \sin\varphi. \sin(\Omega_0 t) \quad (1.11)$$

On peut écrire

$$v = I \times \cos\Omega_0 t + Q \times \sin\Omega_0 t \quad (1.12)$$

Les termes I et Q, nommés composantes en phase et en quadrature modulent les 2 porteuses. En choisissant judicieusement I et Q, il est possible de réaliser un modulateur de phase ou d'amplitude et de phase à M états.

Le modulateur qui réalise ces opérations est nommé modulateur IQ. Son schéma général est le suivant :

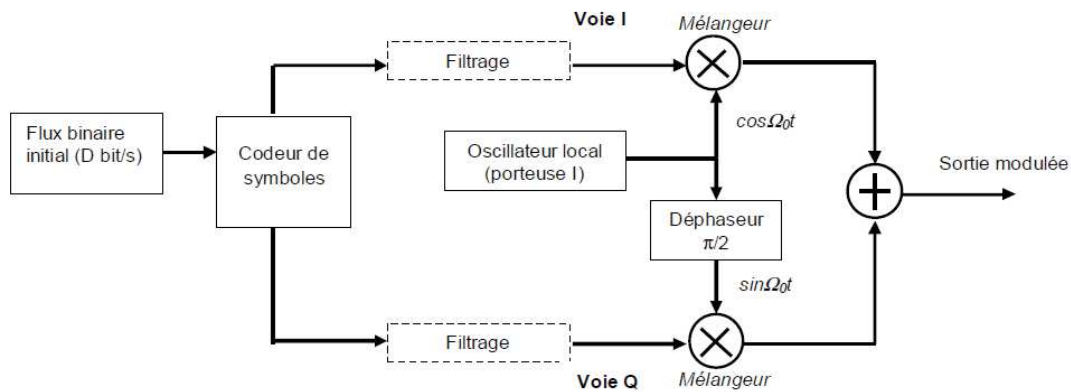


Figure 1.14. Schéma général d'un modulateur IQ.

Le séparateur (codeur de symboles) aiguille les données pour élaborer les signaux I et Q.

### 1.12 La modulation QPSK [15]

C'est une modulation de phase à 4 états où chaque symbole (00, 10, 01 et 11) correspond à un état de phase de la porteuse modulée.

Avec  $v = \hat{E}. \cos(\Omega_0 t + \varphi) = I \times \cos\Omega_0 t - Q \times \sin \Omega_0 t$ , on obtient le tableau suivant :

Symbole	I	Q	$\varphi$
11	$0.707\hat{E}$	$-0.707\hat{E}$	$\pi/4$
10	$-0.707\hat{E}$	$-0.707\hat{E}$	$3\pi/4$
00	$-0.707\hat{E}$	$0.707\hat{E}$	$5\pi/4$
01	$0.707\hat{E}$	$0.707\hat{E}$	$7\pi/4$

Le diagramme de constellation pour la représentation polaire des états de la porteuse modulée est le suivant :

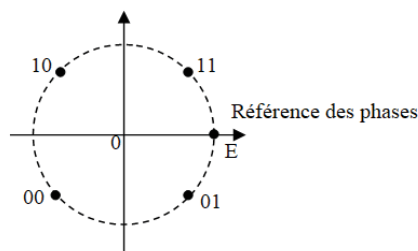


Figure 1.15. Constellation pour la modulation QPSK.

### 1.13 La démodulation QPSK [14]

Son fonctionnement est symétrique par rapport au modulateur IQ, le signal modulé est d'abord multiplié par 2 porteuses locales en quadrature. Les produits sont ensuite filtrés et envoyés sur des circuits à seuil, afin de régénérer les flux I et Q. Le démodulateur QPSK est généralisable aux différentes modulations M-PSK, ce démodulateur souffre d'une difficulté à l'égard de la réalisation d'une porteuse locale parfaitement synchrone avec la porteuse modulée entrante.

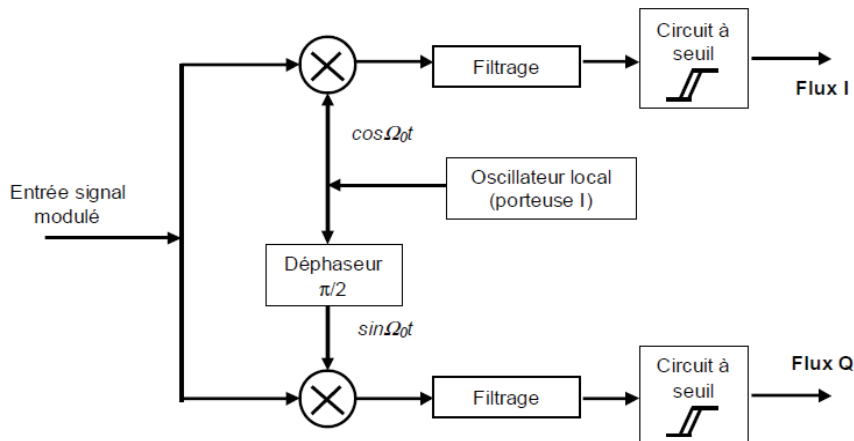


Figure 1.16. Schéma d'un démodulateur QPSK.

### 1.14 Modulation multi- porteuses [16]

La technique de la modulation multi porteuses consiste à transmettre des données numériques en les modulant sur un grand nombre de porteuses en même temps. C'est la technique de multiplexage en fréquence qui existe depuis longtemps. L'intérêt de cette technique réside dans l'amélioration apportée à l'efficacité spectrale en orthogonalisant les porteuses. Ceci permet d'utiliser la modulation et la démodulation basée sur les circuits performants de Transformée de Fourier Rapide.

Le multiplexage En fréquence est intéressant dans les cas de transmission sur des canaux dispersifs sélectifs en fréquences comportant des trajets multiples. On retrouve donc cette technique dans les normes de la radiodiffusion numérique (DAB), de la diffusion vidéonumérique (DVB), de communications numériques haut débits (ADSL) sur les boucles locales téléphoniques, ainsi que dans les systèmes de communications pour les réseaux locaux sans fil (WLAN) à l'intérieur des bâtiments où le standard IEEE 802.11.a est appliqué. Suivant les applications, cette technique se nomme OFDM ou transmission à multivoies MTC (En anglais : multiple transmit channel).

#### Principe [17]

Dans un système conventionnel de transmission de données mono-porteuse, les symboles sont transmis séquentiellement : le spectre de chaque donnée est autorisé à occuper toute la bande passante allouée à la transmission. Le principe d'un système MCM (En anglais : multi carrier modulation) est de diviser la totalité de la bande passante allouée à la transmission en un nombre fini de sous-porteuses. L'information sera transmise sur chacune de ces sous-porteuses. En effet, le train binaire contenant l'information à transmettre sera répartie sur N sous-porteuses orthogonales. L'espacement entre les sous-porteuses est choisit tel que ces dernières soient mathématiquement orthogonales les unes par rapport aux autres. Cet espacement, ainsi que d'autres paramètres du système de transmission, sont souvent fixés par le standard de l'application envisagée, afin d'augmenter l'efficacité spectrale.

## 1.15 Les canaux

### 1.15.1 Canal [18]

Le canal est le milieu dans lequel se propage le signal. Ce terme indique aussi la plage de fréquence utilisée. La largeur du canal dépend du type d'application: 8Mhz pour un canal TV, 250 KHz pour un canal audio FM, 12,6 KHz en téléphonie.

### 1.15.2 Différents canaux de transmission [19]

Le signal émis par une source se propage vers un ou plusieurs destinataires via un canal de transmission. Ces canaux se divisent en deux catégories :

Les canaux de propagation guidée lorsque le signal est contraint de se déplacer dans un espace limité.

Les canaux de propagation libre quand le signal peut se propager librement suivant toutes les directions.

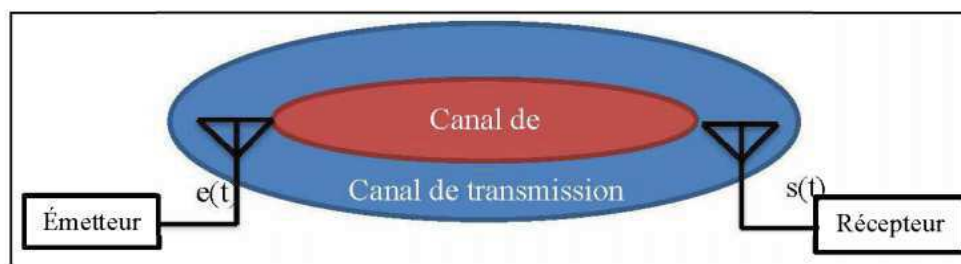


Figure1.17. Schéma synoptique d'une chaîne de communication [20].

## 1.16 La Transformée de Fourier

### 1.16.1 Définition [21]

La transformée de Fourier est une opération qui permet de représenter dans le domaine fréquentielle (développement sur une base d'exponentielles) des signaux qui ne sont pas périodiques. Il s'agit de l'analogie des séries de Fourier pour les fonctions périodiques (développement sur la base de fonctions sinusoïdales). Une fonction non périodique peut être considérée comme une fonction dont la période est infinie. Ce passage à la limite nous fait passer des séries aux intégrales.

$$TF[x(t)] = X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (1.13)$$

### 1.16.2 La Transformée de Fourier Discrète [22]

On appelle Transformée de Fourier discrète d'une suite de  $N$  termes  $x(0), x(1), \dots, x(N-1)$ , la suite de  $N$  termes  $X(0), X(1), \dots, X(N-1)$ , définis par

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi \frac{nk}{N}} \quad (1.14)$$

En pratique, les  $N$  termes  $x(n)$  peuvent être  $N$  échantillons d'un signal analogique échantillonné :  $x_n = x(nT_e)$ , et les  $N$  termes  $X(k)$  correspondre à une approximation, à un facteur multiplicatif  $T_e$  près, de la transformée de Fourier de ce signal aux  $N$  points de fréquence  $f_k = kf_e/N$ , avec  $k$  entre 0 et  $N-1$ , c'est-à-dire  $f$  entre 0 et  $f_e$ .

### 1.16.3 La Transformée de Fourier Discrète inverse [22]

Associe à une suite  $X(k)$   $[0, N-1]$  de  $N$  valeurs complexes, appelée transformée de Fourier discrète inverse de  $X(k)$   $[0, N-1]$ , et définie par la relation suivante :

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j2\pi \frac{nk}{N}} \quad (1.15)$$

## 1.17 Conclusion

Les systèmes de communication numériques ont subi ses dernières années un développement rapide.

Ce chapitre décrit brièvement des notions de base sur l'échantillonnage, la quantification, la modulation et leurs types et la transformée de Fourier directe et

son inverse. Les principales caractéristiques de la transmission numérique son décrite.

Le chapitre suivant présente une étude sur les réseaux sans fil et leur relation avec la technique OFDM.

# *Chapitre 02*

## *Réseaux sans fil*



## 2.1 Introduction

La technologie sans fil envahit notre quotidien notamment dans les smart phones, ordinateurs, clés de voiture, assistants vocaux, caméras, télévision. Elles s’invitent partout, tous ces appareils disposent d’une connexion cellulaire [23].

La technologie sans fil et les communications sans fil sont utilisées dans de nombreuses professions et domaines, qui sont devenus importants dans la vie de l’individu et de la société. Elles facilitent le transfert des fichiers, données et informations de manière rapide et fiable.

Ce chapitre d’écrit de façon générale les réseaux sans fil, et leurs différents catégories. Les différents standards de communication sans fil sont présentés, notamment le standard IEEE 802.11 et ses différentes révisions ainsi que son architecture.

## 2.2 Rappel sur les réseaux sans fil [18]

Les réseaux sans fil permettant d’établir une communication à distance entre deux ou plusieurs stations en utilisant les ondes électromagnétiques comme support de transmission de l’information.

De nos jours, ordinateurs portables, téléphone cellulaire, souris et clavier sans fil, télévision numérique, le cas sans fil est partout. Ceci s’explique par les propriétés très intéressantes qu’offrent les ondes électromagnétiques. C’est un support immatériel, pouvant traverser des obstacles, facile à déployer et offrant à des appareils connectés une aire de mobilité plus ou moins vaste (GSM, WIFI).

Le terme mobile et sans fil sont souvent utilisés pour décrire les systèmes existants, tels que le GSM, IS-95, IEEE 802.11, Bluetooth, etc. Toutefois, il est important de distinguer les deux catégories de réseaux que recoupent les concepts de mobile et de sans fil, de façon à éviter toute confusion.

### 2.2.1 Les réseaux sans fil [19]

Les réseaux sans fil permettent de relier très facilement des équipements distants d’une dizaine de mètres à quelques kilomètres.

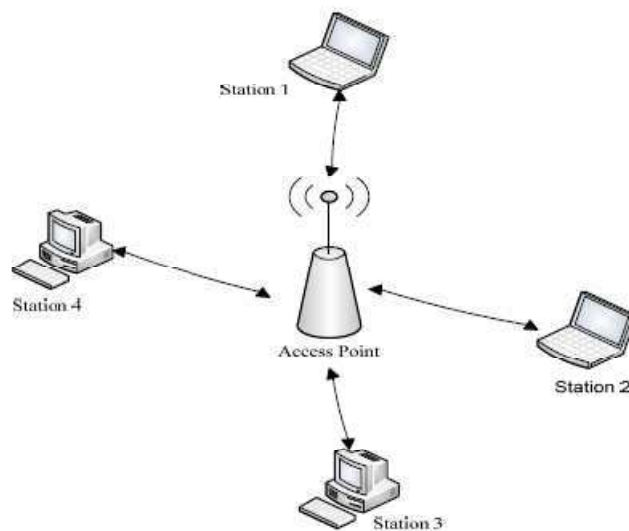


Figure 2.1. Exemple d'architecture de réseaux sans fil.

## 2.2.2 Les catégories de réseaux sans fil [24]

On distingue habituellement plusieurs catégories de réseaux sans fil, selon le périmètre géographique offrant une connectivité qui est appelé zone de couverture.

### 2.2.2.1 Réseaux personnels

Les réseaux personnels (En anglais : Wireless Personnel Area Network (WPAN), concerne les réseaux sans fil à faible portée de l'ordre de quelques dizaines de mètres autour de l'utilisateur.

Ce type de réseau sert à relier des périphériques (imprimante, téléphones, portables avec un ordinateur) ou deux machines très peu distantes et se déplacent avec l'usager, sans les stations relais. Il existe plusieurs technologies utilisant le WPAN.

#### 2.2.2.1.1 Bluetooth [25]

C'est un standard de communication permettant l'échange bidirectionnel de données à très courte distance en utilisant des ondes radio UHF (Ultra Hautes Fréquences) sur une bande de fréquence autour de 2.4 GHz. Il est connu aussi sous le nom de la norme IEEE 802.15.1.

Cette technologie offre un débit brut de 1Mbps, avec une portée de 10 mètres (100 mètres avec amplification). Elle présente également l'avantage de fonctionner sur des appareils à faible puissance d'où une faible consommation d'énergie.

#### **2.2.2.1.2 ZigBee [24]**

C'est un protocole de communication qui permet d'établir des liaisons radios à consommation réduite. Il est aussi appelé par le standard IEEE 802.15.4, et c'est un réseau à dimension personnel. Sa bande passante est de 2.4 GHz, avec 16 canaux et sa vitesse maximale théorique est de 250Kbps. Il permet d'obtenir des liaisons sans fil à bas prix.

#### **2.2.2.2 Les Réseaux locaux**

Le réseau locale sans fil (En anglais : Wireless Local Area Network (WLAN)), est un réseau permettant de relier entre plusieurs terminaux présents dans la zone de couverture d'une centaine de mètres d'environ. Il existe deux technologies concurrentes.

##### **2.2.2.2.1 Les réseaux Wi-Fi**

Le Wi-Fi est un ensemble de protocoles de communication sans fil régis par les normes du groupe IEEE 802.11. Il permet d'interconnecter par ondes radio plusieurs appareils informatiques au sein d'un réseau. Il utilise des ondes radio UHF et VHF (supra hautes fréquences) sur les bandes de fréquences 2.4 GHz et 5 GHz.

IEEE.802.11 est la norme initiale publiée en 1997 qui offrait des débits de 1 ou 2 Mbit/s. par abus de langage, on parle maintenant de la norme Wi-Fi. Des révisions ont ensuite été apportées à la norme originale afin d'augmenter le débit (c'est le cas des normes 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n et 802.11ac) ou de spécifier des fonctions de sécurité ou d'interopérabilité. Le tableau présente le débit et la fréquence d'utilisation de chaque norme 802.11 :

Tableau 2.1. Comparaison des normes Wi-Fi [24].

Norme	Débit théorique (Mbit/s)	Débit réel (Mbit/s)	Fréquence GHz
802.11a	54	27	5
802.11b	11	6	2.4
802.11g	54	25	2.4
802.11n	450	200	2.4 ou 5
802.11ac	1300	433	5

### 2.2.2.2.2 Les réseaux HiperLan 2

Le HiperLAN (En anglais : High performance radio LAN) est un standard européen de télécommunication créé par l'ETSI (European Telecommunication Standards Institute) et développé par le groupe technique BRAN (Broadband Radio Access Networks). Ce standard est une alternative au groupe de normes IEEE 802.11 plus connu sous la dénomination Wi-Fi.

Le HiperLAN 2 opère dans une bande passante comprise entre 5.4 GHz et 5.7 GHz, cette norme spécifie qu'il doit être possible d'établir des communications à différents débits de 6, 9, 12, 18, 27,36 Mbit/s.

### 2.2.2.3 Les réseaux métropolitains

Les réseaux métropolitains (En anglais : Wireless Metropolitan Area Network (WMAN)) est connu sous le nom de Boucle Locale Radio, il permet de transmettre par voie hertzienne de la voix et des données à haut débit pour l'accès à l'internet et la téléphonie. Il existe plusieurs types de réseaux WMAN dont les plus connus sont :

Les réseaux WiMax (En anglais: Worldwide interoperability for Microwave access), ils proviennent de la norme IEEE 802.16 et ont pour but de développer des liaisons hertziennes concurrentes aux techniques DSL (En anglais : Digital Subscriber line) terrestres. Ils sont utilisés comme mode de transmission et d'accès à l'internet haut débit, portant sur une zone géographique étendue.

Le WiMax procure des débits de plusieurs dizaines de mégabits par seconde sur zone de couverture portant sur quelques dizaines de kilomètres au maximum. La norme 802.16-2004 spécifie cinq interfaces radio différentes, une pour la bande 10-66 GHz ou la transmission est de type LOS (En anglais : Line of sight) et quatre pour la bande 2-11 GHz ou la transmission est de type NLOS (En anglais : Non line of sight).

#### 2.2.2.4 Les réseaux étendus

Les réseaux étendus (En anglais: Wireless Wide Area Network (WWAN)), est le plus répandu de tous les réseaux sans fils du fait de sa connectivité avec les téléphones mobiles. Les principales technologies sont les suivantes :

- GSM (Global System for Mobile Communication);
- GPRS (General Packet Radio Service);
- UMTS (Universal Mobile Telecommunication System);
- HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) autrement dit 3G+.

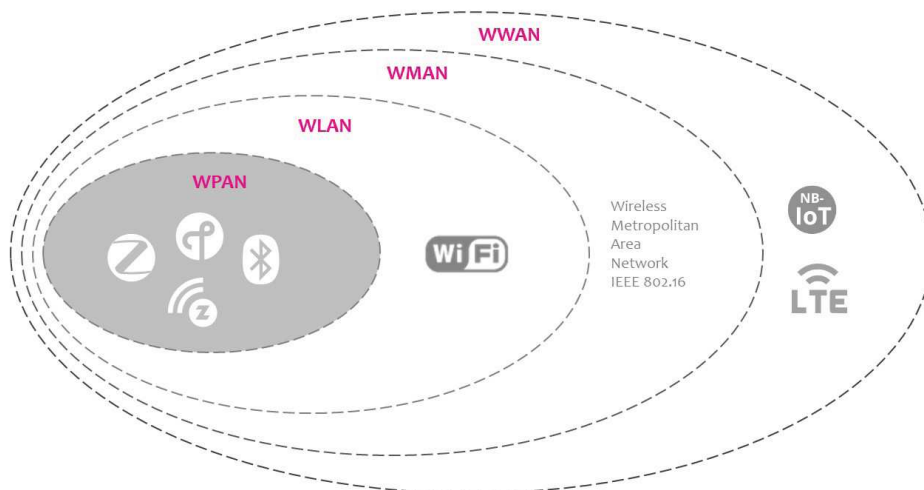


Figure 2.2. Classification des réseaux sans fil.

### 2.3 Domaine d'application des réseaux sans fil [26]

Les réseaux sans fil sont applicables dans tous les métiers, dont la mobilité est nécessaire afin d'augmenter la productivité, tels que :

1. Hôpitaux (gestion des fichiers patients, ...).
2. Restaurants (communications rapides entre serveurs et cuisiniers, ..).
3. Maison et Petit Bureau (Home and Small Office) (éviter de câbler, coûts réduits).
4. Environnement d'installation difficile des médias filaires.

## 2.4 Les Avantages des réseaux sans fil [27]

Les réseaux sans fil sont caractérisés par :

- 1- Liberté de mouvement des usagers et des terminaux ;
- 2- Moins de risques de rupture de liens que dans le filaire (coupure du câble, abîmer les connecteurs et prises, etc.) ;
- 3- Délais de mise en service du réseau plus faibles ;
- 4- Des économies à long terme (retour sur investissements).

## 2.5 La norme IEEE 802 [24]

L'IEEE (En anglais : Institute of Electric and Electronics Engineers), est une association professionnelle qui joue un rôle très important dans l'établissement des normes.

IEEE 802 Standard Association est un comité de l'IEEE qui décrit une famille de normes relatives aux réseaux locaux (LAN) et métropolitaines (MAN) pour la transmission de données numériques assurée par des liaisons filaires ou sans fil, voir la figure 2.3. L'IEEE 802 est constituée de plusieurs secteurs. Chaque secteur est dédié à un groupe de travail spécifique. Ainsi le secteur IEEE 802.11 est consacré aux réseaux locaux sans fil (WLAN) comme le Wi-Fi, HiperLAN 2,...etc.

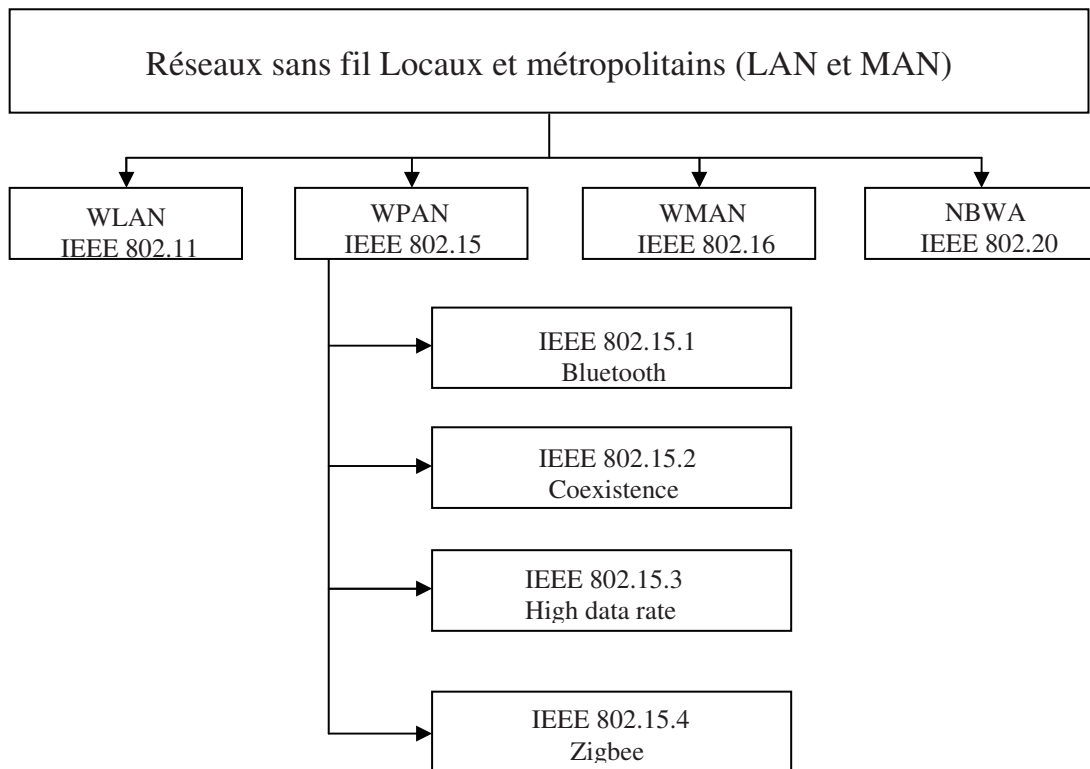


Figure 2.3. Organisation du groupe 802 [24].

Le groupe IEEE 802 a mis en œuvre plusieurs normes des réseaux LAN et MAN, on peut notamment évoquer la norme 802.11 (le Wi-Fi). Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la norme 802.11.

## 2.6 Le protocole de communication IEEE 802.11 [28, 29]

La norme 802.11 décrit les couches physique et MAC d'interfaces réseau radio et infrarouge. Les débits possibles varient entre 1 et 54 Mbit/s suivant les techniques et les éventuelles extensions de la norme employées. Les portées prévues varient entre quelques dizaines et quelques centaines de mètres en fonction de la vitesse choisie et de l'environnement.

Cette norme cible les deux modes suivants.

### 2.6.1 Le mode infrastructure

(L'utilisation privilégiée de 802.11), où des stations de base reliées entre elles par un réseau filaire assurent la couverture d'une certaine zone et prennent en charge les mobiles dans leur voisinage.

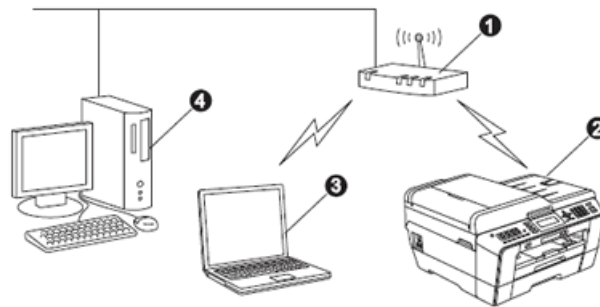


Figure 2.4. Le mode infrastructures IEE 802.11 (Wi-Fi) [30].

### 2.6.2 Le mode Ad Hoc

Le mode Ad Hoc, comme est montré dans la figure 2.5, consiste simplement à autoriser les communications entre deux mobiles à portée l'un de l'autre sans intervention de stations ou d'autres mobiles extérieurs.

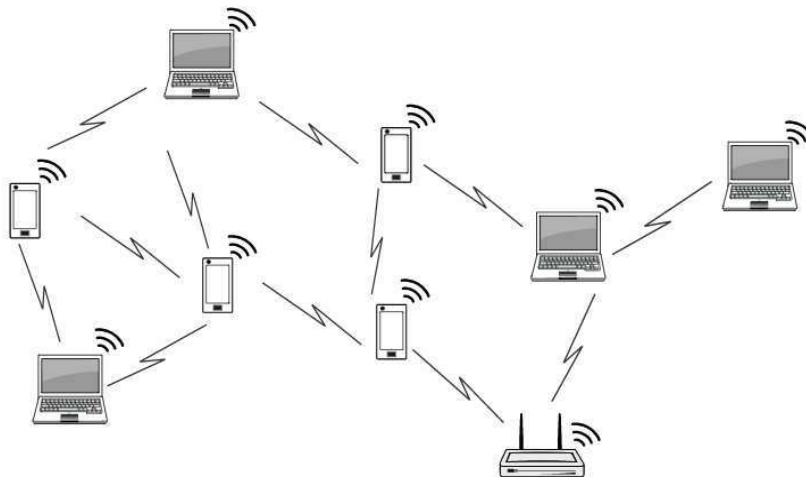


Figure 2.5. Le mode ad hoc [31].



## 2.7 Modèle en couche [32, 33]

Le modèle en couche de la norme 802.11, couvre les deux premières couches du modèle OSI qui sont :

1. La couche physique (niveau 1)
2. La couche liaison de données (niveau 2).

Tableau 2.2. Modèle en couche de l'IEEE 802.11 [33].

<b>Couche 2 OSI Liaison de données</b>	802.2 Logical Link Control (LLC)					
	802.11 Medium Access Control (MAC)					
<b>Couche 1 OSI Physique (PHY)</b>	IEEE 802.11			Wi-Fi 802.11b (DSSS)	Wi-Fi 802.11g	Wi-Fi 802.11a (OFDM)
	DSSS	FHSS	IR			

### 2.7.1 Couche physique

La couche physique est responsable de la bonne émission et réception de données, de la sélection des fréquences et de la détection du signal.

Pour la couche physique, le standard initial publié en 1997, proposait trois techniques de transmission [34] :

1. FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum);
2. DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum);
3. IR (InfraRed);
4. OFDM.

Les deux premières, fonctionnent dans la bande de fréquences de 2,4 GHz et peuvent offrir un débit maximal de 1 ou 2 Mbps. La version 802.11b publié en 1999 a retenu que le deuxième type de transmission physique et lui apporter des améliorations ((HR/DSSS) High Rate Direct Sequence Spread Spectrum) afin d'obtenir des débits pouvant aller jusqu'à 11 Mbps [35]. La version 802.11a choisit quant à elle d'utiliser une autre technique de transmission appelée OFDM, elle

change également la bande de fréquences utilisée à 5 GHz, avec des débits de transmission jusqu'à 54 Mbps [36]. Le même débit maximum caractérise aussi la dernière version du standard, 802.11g, apparue en 2001 et qui utilise la modulation OFDM dans la bande de 2,4 GHz pour rester compatible avec les équipements 802.11b existants [37].

Tableau 2.3. Les couches physiques de protocoles 802.11a, b et g [38].

Standard	Technologie de la couche physique	Bande de fréquences	Débit maximum
802.11	FHSS	de 2.4 GHz (2.400-2.4835GHz) 75 canaux de 1MHz	1 ou 2 Mbps
	DSSS	de 2.4 GHz (2.400-2.4835GHz) 14 canaux de 22MHz de recouvrant	
	IR		
802.11b	HR/DSSS Basé sur la modulation CCK (Complementary code Keying)	Bande de 2.4GHz (2.400-2.835GHz) 14 canaux de 22MHz de recouvrant	1, 2, 5.5, 11 Mbps
	DSSS pour la compatibilité avec le 802.11 original		
802.11a	OFDM	5GHz (5.15-5.825GHz) 12 canaux de 20MHz indépendantes	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, ou 54Mbps
802.11g	OFDM	de 2.4GHz (2.400-2.4835GHz) 14 canaux de 22 GHz de recouvrant	1,2, 5.5, 11 Mbps 6, 9, 12, 18, 24, 36,48, ou 54 Mbps
	DSSS avec CCK pour la compatibilité avec le 802.11b		

### 2.7.2 La couche liaison de données

La couche liaison de données en 802.11 est composée, à l'instar d'autres normes de la famille 802, de deux sous-couches :

1. Le contrôle de la liaison logique LLC (Logical Link Control) ;

2. Le contrôle d'accès au medium MAC (Medium Access Control).

### **2.7.2.1 La sous couche LLC**

La sous couche LLC (Logical Link Control) normalisée 802.2, permet de relier un WLAN 802.11 à tout autre réseau respectant l'une des normes de la famille 802 [39].

### **2.7.2.2 La sous couche MAC**

La sous couche MAC est spécifique à l'IEEE 802.11, car elle offre autres les fonctions d'une couche MAC classique (allocation du support, adressage, formatage des trames), des fonctionnalités supplémentaires telles que la sécurité des communications, l'économie d'énergie, la fragmentation, le réassemblage, le contrôle d'erreur ou encore comment assurer une bonne qualité de service, en particulier pour les communications multimédias .La couche MAC est donc en quelque sorte le « cerveau » du 802.11 [31, 41].

## **2.8 Conclusion**

Les réseaux sans fil tels que l'IEEE 802.11 (Wi-Fi) connaissent aujourd'hui une popularité sans précédent offrant des connexions réseaux à domicile, en entreprise ou dans des lieux publics.

Dans ce chapitre, une étude a été présentée en commençant par les réseaux sans fil et leurs catégories. Ensuite on a présenté la norme 802.11 sur laquelle repose un réseau Wi-Fi, cette norme couvre les deux premières couches du modèle OSI : couche physique et la couche liaison de données. Nous nous intéressons principalement à la technique OFDM qui sera abordée dans le chapitre suivant.

# *Chapitre 03*

## *Technique OFDM*

### 3.1 Introduction

Actuellement la modulation OFDM est employée dans différentes normes telles que la radio numérique DVB, la télévision numérique DVB-T, ainsi que pour le réseau local sans fil IEEE 802.11 [39].

L'OFDM consiste à transmettre des données numériques simultanément en les modulant sur un grand nombre de porteuses. Ce sont des techniques de multiplexage en fréquence qui existent depuis longtemps [40].

L'OFDM permet à l'utilisateur d'obtenir une meilleure efficacité spectrale due à l'orthogonalité des porteuses et au chevauchement fréquentiel des canaux.

OFDM divise la bande passante disponible en plusieurs canaux à bande étroite (typiquement 100-800Hz) [41].

Dans ce chapitre nous présentons une étude détaillée de la technique OFDM.

### 3.2 La technique OFDM [42]

L'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) est une technique de transmission ayant pour objectif de répartir sur un grand nombre de porteuses le signal numérique que l'on souhaite émettre (figure 3.1).

Les premières études sur les multi porteuses datent de la fin des années 1950. Le multiplex à division de fréquences orthogonales que l'on appelle OFDM est apparu une dizaine d'années plus tard. Délaissé lors du développement de la théorie de l'égalisation pour les systèmes mono porteuse, l'OFDM a vu son retour vers le milieu des années 1980. Les systèmes mono porteuse, par opposition à l'OFDM ne favorisent pas les conditions de résistance aux trajets multiples et de débit élevé pour un taux d'erreur binaire faible. Depuis, l'OFDM est resté une technique prépondérante car elle est utilisée pour de nombreuses applications comme la télévision numérique DVB (Digital Video Broadcasting) ou la norme ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) permettant des liaisons internet à haut débit ; cette technique OFDM s'adapte parfaitement aux communications mobiles, et paraît incontournable pour les standards de troisième et quatrième génération.

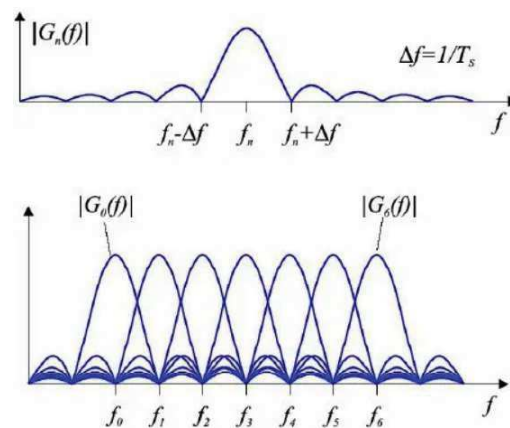


Figure 3.1. Répartition fréquentielle des porteuses [42].

### 3.2.1 Principe [43]

Le principe de l'OFDM consiste à diviser sur un grand nombre de porteuses le signal numérique que l'on veut transmettre. Comme si l'on combinait le signal à transmettre sur un grand nombre de systèmes de transmission (exemple: des émetteurs) indépendants et à des fréquences différentes.

Pour que les fréquences des porteuses soient les plus proches possibles et ainsi transmettre le maximum d'information sur une portion de fréquences donnée, l'OFDM utilise des porteuses orthogonales entre elles.

Les signaux des différentes porteuses se chevauchent mais grâce à l'orthogonalité n'interfèrent pas entre elles. Le signal à transmettre est généralement répété sur différentes fréquences porteuses. Ainsi dans un canal de transmission avec des chemins multiples où certaines fréquences seront détruites à cause de la combinaison destructive de chemins, le système sera tout de même capable de récupérer l'information perdue sur d'autres fréquences porteuses qui n'auront pas été détruites. Chaque porteuse est modulée indépendamment en utilisant des modulations numériques: QPSK, QAM-16, QAM-64,...etc.

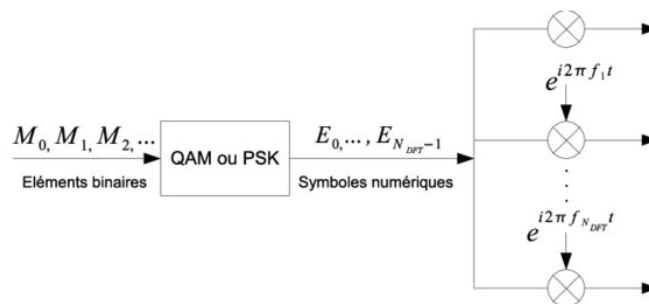


Figure 3.2. Schéma de principe d'un modulateur OFDM [43].

### 3.3 Canal à trajets multiples [44]

Avant d'exposer le principe des modulations multi-porteuses, nous allons donner quelques caractéristiques du canal pour lequel ce type de modulations est intéressant. Les premières applications ont concerné la diffusion du son numérique dans le canal radio mobile, c'est l'exemple de ce canal que nous prenons, en n'omettant pas le fait que le modèle de ce canal peut aussi s'appliquer à d'autres canaux très perturbés. D'après la figure 3.3, le signal émis en milieu urbain subit de nombreuses réflexions et le récepteur reçoit une série d'échos de provenances diverses et imprévisibles. Ces échos d'amplitudes variables introduisent de retards variables.

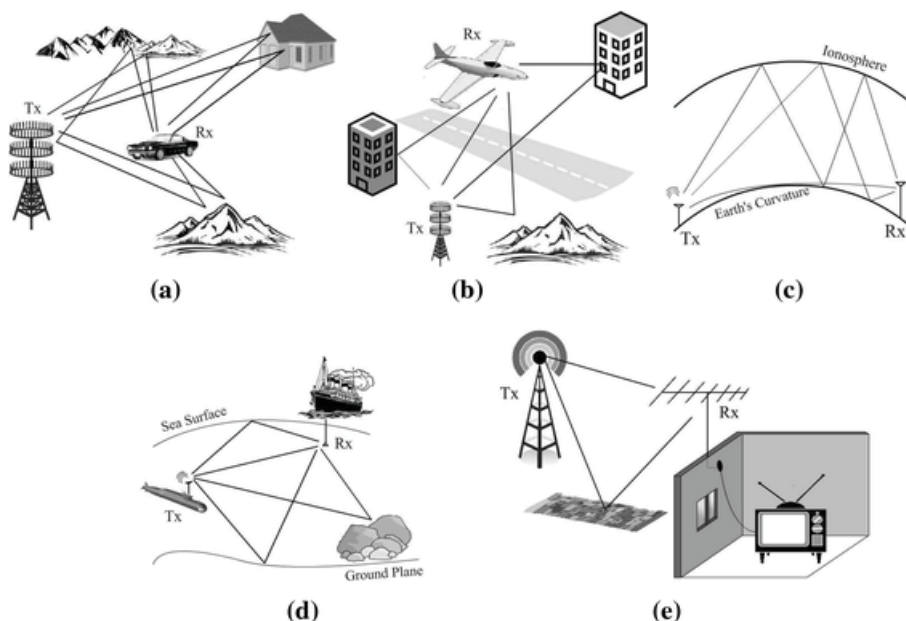


Figure 3.3. Signaux multi-trajets [45].

### 3.4 Le Multiplexage

Le multiplexage est une technique qui consiste à faire passer plusieurs informations à travers un seul support de transmission. Elle permet de partager une même ressource entre plusieurs utilisateurs [46].

Il existe essentiellement trois formes de multiplexage dans la gamme radiofréquence et hyperfréquence.

- 1- Le multiplexage fréquentiel ou spectral (En anglais : FDM, Frequency Division Multiplexing, ou FDMA, Frequency Division Multiple Access) ;
- 2- Le multiplexage temporel (En anglais : TDM, Time Division Multiplexing, ou TDMA, Time Division Multiple Access) ;
- 3- Le WDM (En anglais : Wavelength Division Multiplex).

Cette dernière, est une nouvelle forme de multiplexage, spécifique à la propagation sur des fibres optiques, s'est récemment développée et qui consiste à partager des fenêtres optiques disponibles sur une même fibre.

#### 3.4.1 Le Multiplexage Temporel [47]

Il consiste à affecter à un utilisateur unique la totalité de la bande passante pendant un court instant, ceci à tour de rôle pour chaque utilisateur comme est montré dans la figure 3.4. L'allocation de cette bande passante se fait en divisant l'axe du temps en périodes de durée fixe, et chaque utilisateur ne va transmettre que pendant une de ces périodes déterminée comme est montré dans la figure 3.5. Un intervalle de temps fixe (IT) est successivement assigné à une source.

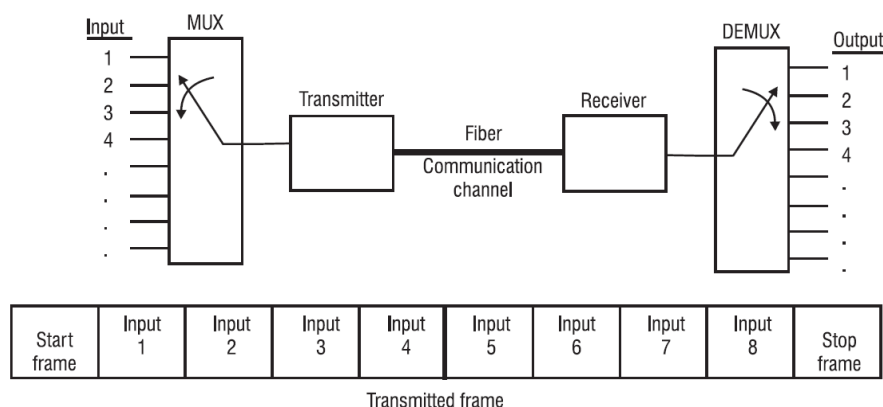


Figure 3.4. Répartition des périodes dans le cas d'un multiplexage TDM.



Le multiplexage TDM permet alors de regrouper plusieurs canaux de communications à bas débits sur un seul canal à débit plus élevé (par exemple, conception d'un débit 40 GBit/s, à partir de 4 séquences à 10 GBit/s).

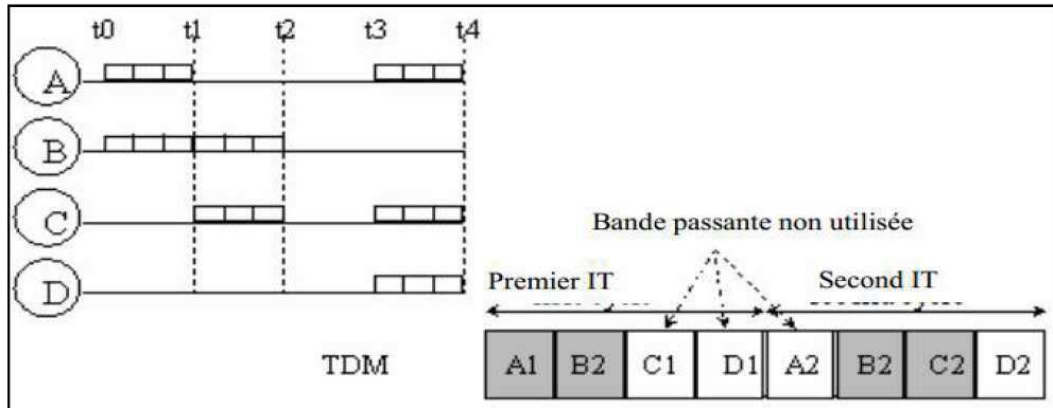


Figure 3.5. Représentation d'un multiplex TDM (4 voies vers 1) en fonction des données initiales.

### 3.4.2 Le Multiplexage en Longueur d'Onde [48]

Il repose sur le principe du multiplexage optique. Le principe consiste à transporter plusieurs signaux sur un brin de fibre optique. Chaque signal est placé sur une longueur donnée grâce à un transpondeur. Puis via un multiplexeur optique, toutes les longueurs d'onde sont envoyées sur le même brin de fibre optique. A l'autre extrémité, un démultiplexeur va séparer les longueurs d'onde les unes des autres, puis un transpondeur va reconvertir le signal en canal gris.

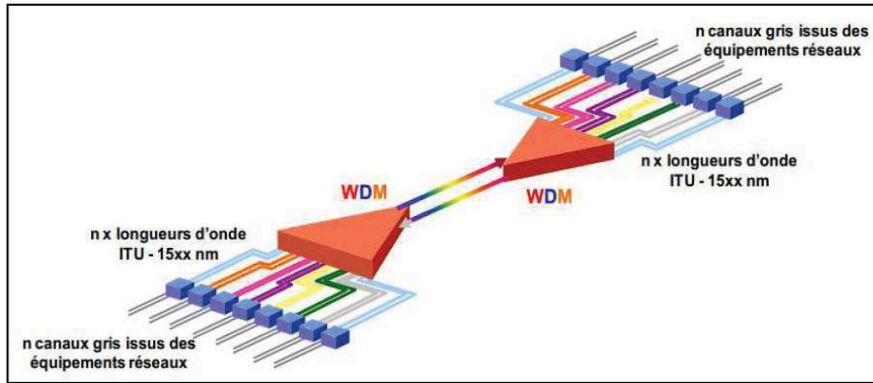


Figure 3.6. Technologie WDM.

Les ondes sont ensuite multiplexées par des systèmes optiques passifs. L'avantage de la technique WDM est qu'elle n'est pas tributaire de la vitesse des équipements électroniques. Cependant le nombre de longueurs d'onde qu'une fibre peut transporter est limité d'une dizaine de longueurs d'ondes il y à quelques années, on est passé à plusieurs centaines aujourd'hui.

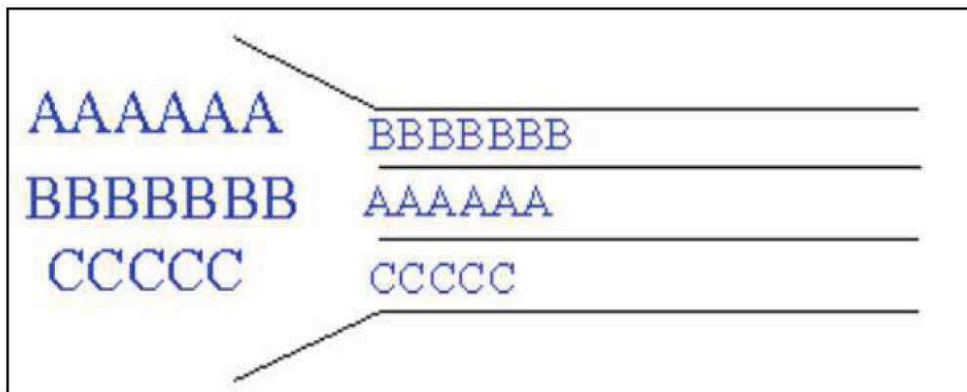


Figure 3.7. Répartition des sous-bandes dans le cas d'un multiplexage WDM.

De plus, en WDM, un seul amplificateur optique se substitue aux  $N$  régénérateurs en chaque site de ligne, procurant ainsi une économie d'équipements croissante avec la longueur de la liaison et le nombre de canaux [49].

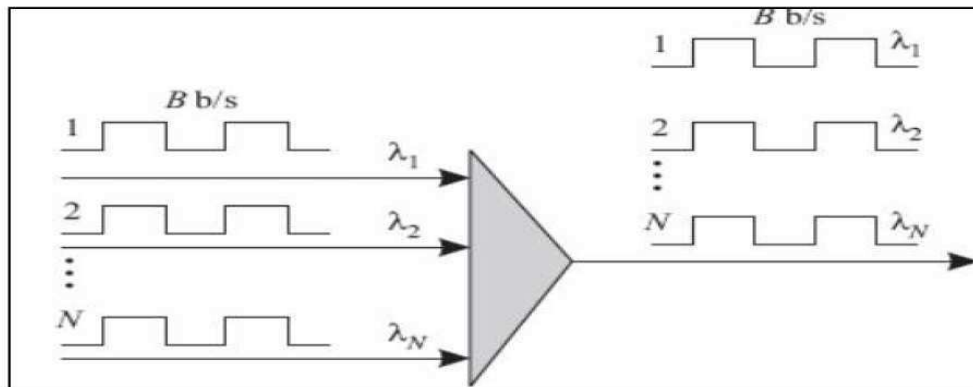


Figure 3.8. La technique de multiplexage WDM.

### 3.4.3. Le Multiplexage Fréquentiel [50]

C'est un multiplexage dans lequel des signaux indépendants occupent des bandes de fréquences distinctes dans le signal composite. La figure 3.9 donne un exemple de multiplexage fréquentiel 4 vers 1.

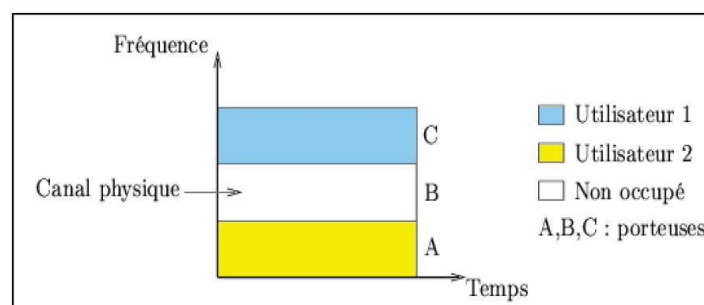


Figure 3.9. La technique de multiplexage FDM.

### 3.5 Les modulations multi-porteuses OFDM [51]

L'OFDM est une technique de codage numérique par répartition en fréquences orthogonales sous la forme de multiples sous-porteuses à bande étroite. Cette technique de transmission des données sur un ensemble de sous-porteuses a le mérite de transformer un canal multi-trajet large-bande en un ensemble de sous-canaux mono-trajet à bande étroite plus faciles à égaliser.

La plage de fréquence et de synchronisation de la porteuse est choisie de manière à augmenter l'efficacité de transmission et de réduire les interférences. Le développement de cette technique doit beaucoup à l'utilisation de la redondance

cyclique à l'émission qui permet de réduire la complexité des terminaux grâce à l'utilisation d'algorithmes à base de la transformée de Fourier rapide.

### 3.6 Notions d'orthogonalité [52]

L'orthogonalité de deux fonctions  $f(t)$  et  $g(t)$  dans l'intervalle  $[a, b]$ , est défini par la relation suivante :

$$\int_a^b f(t) \cdot g(t) dt = 0 \quad (3.1)$$

Cela signifie que ces deux fonctions sont disjointes sur le segment  $[a, b]$ . Pour réaliser une base orthogonale à  $N$  dimensions, il suffit de trouver  $N$  fonctions orthogonales deux à deux. Comme le montre la figure 3.10, un ensemble de  $N$  fenêtres rectangulaires régulièrement espacées d'un intervalle  $\delta$  sur l'axe des temps constitue une base orthogonale.

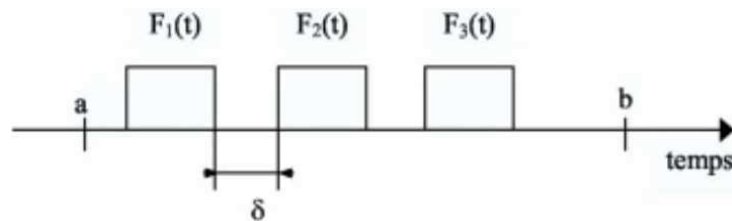


Figure 3.10. Exemple d'une base orthogonale.

L'orthogonalité est la propriété fondamentale qui permet de transmettre des signaux d'informations multiples dans un même canal et de les détecter sans interférence.

#### 3.6.1 Application au procédé OFDM dans le domaine temporel [52]

Envisageons tout d'abord des signaux continus, qui ne sont pas échantillonnés. Dans ce cas, un signal OFDM est composé d'une somme de  $N$  sinusoïdes de fréquences respectives  $f_k$  transmises durant une durée  $T_u$ ,  $k$  variant de 1 à  $N$ , et définie par  $f_k = \frac{k}{T_u}$ . Cette condition permettant, d'avoir un nombre

entier de sinusoides sur chaque sous-porteuse durant  $T_u$ . Chaque sous-porteuse  $S_k(t)$  réelle et non modulée peut se mettre sous la forme :

$$S_k(t) = \begin{cases} \sin\left(2\pi \frac{k}{T_u} t\right) & 0 < t < T_u \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad \text{pour } k \in [1, N] \quad (3.2)$$

Ainsi deux sous-porteuses  $S_i(t)$  et  $S_j(t)$  de fréquences respectives  $f_i$  et  $f_j$ , définies par l'expression (3.2), sont orthogonales sur l'intervalle  $[0, T_u]$ , puisqu'elles vérifient l'équation (3.1).

### 3.6.2 Application au procédé OFDM dans le domaine fréquentiel [52]

On peut aussi percevoir la notion d'orthogonalité du signal OFDM dans le domaine fréquentiel. En effet, si chaque sous-porteuse  $S_k(t)$  est transmise pendant la durée  $T_u$ , cela revient à appliquer à la sous-porteuse une porte de durée  $T_u$  dont l'enveloppe spectrale est un sinus cardinal qui s'annule aux premières fréquences  $f_{-z} = f_k - \frac{1}{T_u}$  et  $f_{+z} = f_k + \frac{1}{T_u}$ . On remarque que ces deux fréquences sont aussi respectivement égales à  $f_{k-1}$  et  $f_{k+1}$ . On obtient ainsi l'enveloppe spectrale représentée figure 3.11, le spectre (a) étant celui d'une sous porteuse  $i$ , de bande  $\Delta f = \frac{1}{T_u}$  et le spectre (b) celui du signal OFDM à  $N = 4$  sous-porteuses et, qui s'étale sur  $B = N \cdot \Delta f = \frac{N}{T_u}$ .

L'orthogonalité dans le domaine fréquentiel est réalisée puisque le maximum de chaque sous-porteuse correspond à un zéro des autres. Cette condition permet ainsi d'avoir une occupation spectrale idéale et d'éviter les interférences entre sous-porteuses.

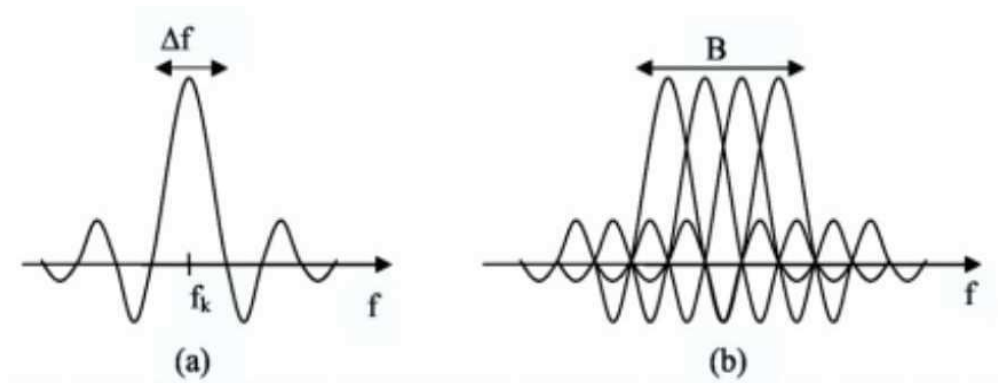


Figure 3.11. (a) spectre d'une sous porteuse, (b) spectre d'un signal OFDM.

### 3.6.3 Principe de la modulation OFDM [53, 54]

Le principe du multiplexage en fréquence est de grouper des données numériques par paquets de  $N$ , qu'on appellera symbole OFDM et de moduler par chaque donnée une porteuse différente en même temps.

Considérons une séquence de  $N$  données  $C_0, C_1, \dots, C_{N-1}$ . Appelons  $T_s$  la durée du symbole, c'est-à-dire le temps qui sépare deux séquences de  $N$  données où chaque donnée  $C_k$  module un signal à la fréquence  $f_k$ .

$$S_1(t) = C_k e^{2j\pi f_k t} \quad (3.3)$$

Le signal individuel s'écrit sous la forme complexe de l'équation 3.3.

Le signal  $s(t)$  total de l'équation 3.4, correspondant à toutes les données d'un symbole OFDM qui est la somme des signaux individuels.

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{2j\pi f_k t} \quad (3.4)$$

Le multiplexage est orthogonal si l'espace entre les fréquences est de  $\frac{1}{T_s}$ .

Alors

$$f_k = f_0 + \frac{k}{T_s}$$

Et

$$s(t) = e^{2j\pi f_0 t} \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{2j\pi \frac{kt}{T_s}} \quad (3.5)$$

Voici le schéma de principe de la modulation.

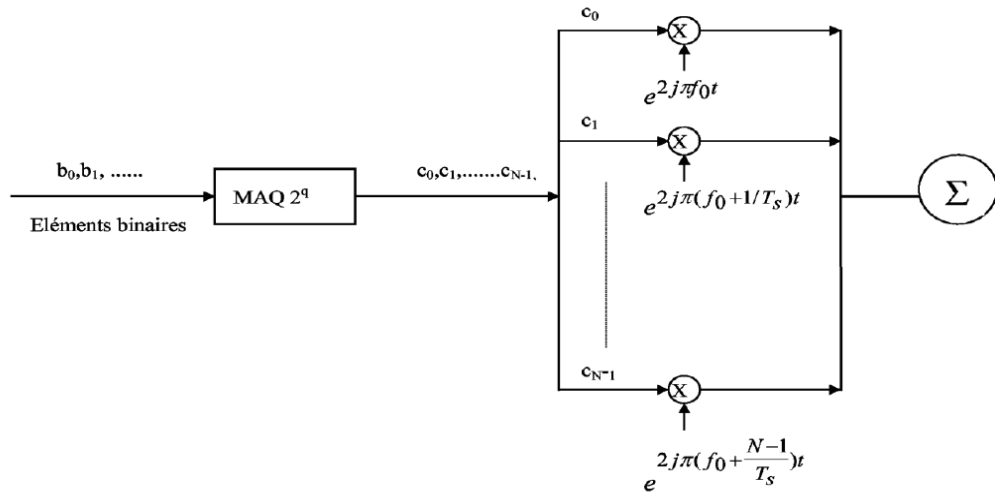


Figure 3.12. Schéma de principe d'un modulateur.

Plus précisément les données numériques  $C_k$  sont des nombres complexes définis à partir d'éléments binaires par une constellation (En anglais : mapping) correspondante à l'une des modulations numériques (à savoir : BPSK, QPSK,  $M$ -QAM où  $M = 4, 16, 32, 64$ ). Ces données sont des numériques. Il ne faut pas les confondre avec le symbole OFDM qui est un regroupement de  $N$  symboles numériques sur  $N$  porteuses. De l'équation 3.5, on peut déduire l'expression réelle du signal :

$$C_k = a_k + jb_k$$

$$\begin{aligned} S(t) &= Re(S(t)) = Re \left( \sum_{k=0}^{N-1} (a_k + jb_k) e^{2j\pi \left(f_0 + \frac{k}{T_s}\right)t} \right) \\ &= \sum_{k=0}^{N-1} a_k \cos \left( 2\pi \left(f_0 + \frac{k}{T_s}\right)t \right) - b_k \sin \left( 2\pi \left(f_0 + \frac{k}{T_s}\right)t \right) \end{aligned} \quad (3.6)$$

D'après l'expression du signal et la figure 3.12, le modulateur ainsi que le démodulateur devrait comporter  $N$  modulateurs individuels. Nous allons déterminer le spectre du signal OFDM.

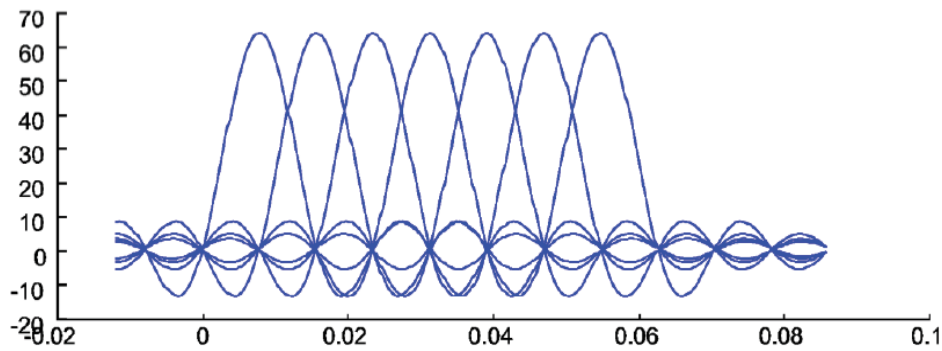


Figure 3.13. Spectres des différentes porteuses.

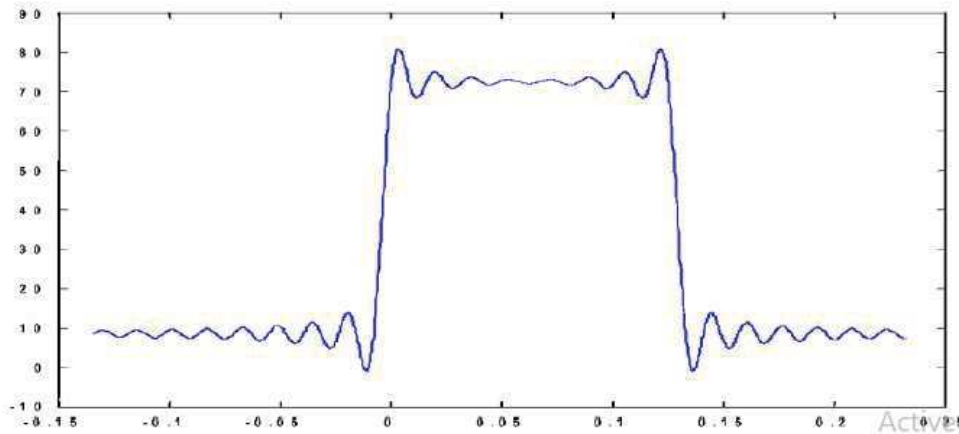


Figure 3.14. Spectre du signal OFDM pour 8 porteuses.

Chaque porteuse modulant une donnée pendant une fenêtre de durée  $T_s$ , son spectre est la transformée de Fourier de la fenêtre et le spectre totale est la somme des spectres individuels.

La figure 3.13 montre que l'espace entre chaque sous-porteuse  $\frac{1}{T_s}$  permet, lorsque le spectre d'une sous-porteuse est maximal, d'annuler le spectre de toutes les autres. C'est la condition d'orthogonalité. Cette condition d'orthogonalité permet d'avoir un recouvrement entre les spectres des différentes sous-porteuses, et



malgré ceci d'éviter les interférences entre sous-porteuse si l'échantillonnage est fait précisément à la fréquence d'une sous-porteuse.

La figure 3.14 montre que la bande en fréquence est occupée de façon optimum, puisque le spectre est presque plat dans cette bande. La bande occupée est à peu près  $B = N/T_s$  en excluant les lobes secondaires de part et d'autre de la bande, chaque sous-porteuse occupant à peu près  $1/T_s$ .

### 3.6.4 Principe de la démodulation OFDM [53, 54]

Le signal parvenant au récepteur s'écrit, sur une durée symbole  $T_s$

$$y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k H_k(t) e^{2j\pi(f_0 + \frac{k}{T_s})t} \quad (3.7)$$

$H_k(t)$  est la fonction de transfert du canal autour de la fréquence  $f_k$  et au temps  $t$ . Cette fonction varie lentement et on peut la supposer constante sur la période  $T_s$  ( $T_s \ll 1/Bd$ ). La démodulation classique consisterait à démoduler le signal suivant les  $N$  sous-porteuses suivant le schéma classique.

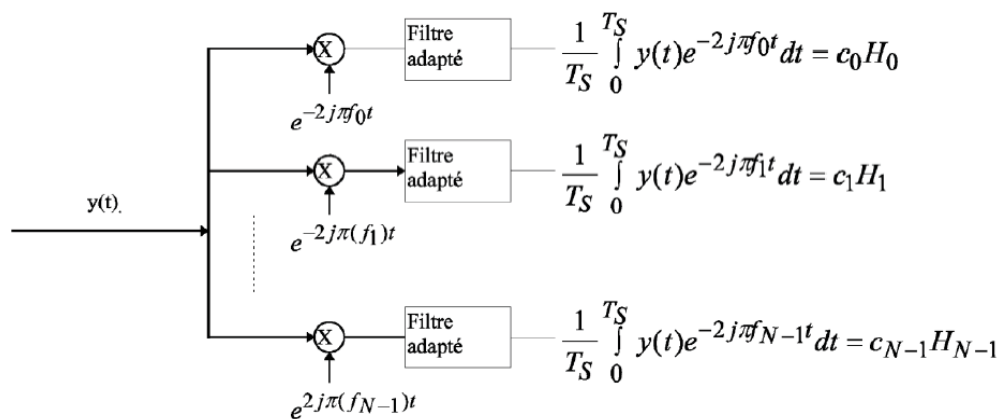


Figure 3.15. Schéma de principe du modulateur OFDM.

La condition d'orthogonalité montre que :

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} y(t) e^{-2j\pi f_i t} dt = \frac{1}{T_s} \sum_{k=0}^{N-1} \int_0^{T_s} C_k H_k e^{2j\pi(k-i)\frac{1}{T_s} t} dt = C_i H_i \quad (3.8)$$

Parce que

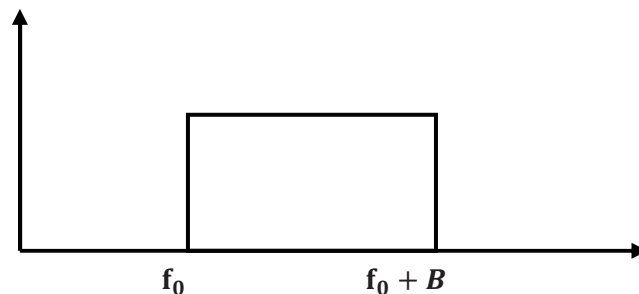
$$\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} e^{2j\pi(k-i)\frac{1}{T_s} t} dt = 0 \text{ si } k \neq i, 1 \text{ si } k = i$$

En pratique, comme pour la modulation, on remarque que la démodulation peut être réalisée par une transformée de Fourier.

### 3.6.5 Principe du modulateur et du démodulateur utilisant les transformées de Fourier discrètes [53, 55]

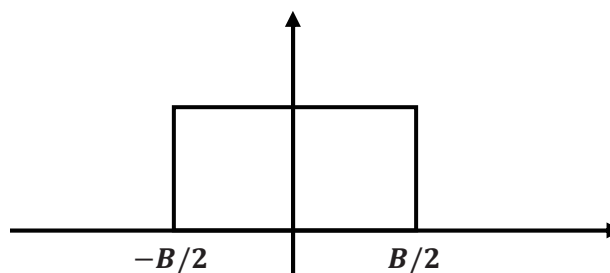
Pour discrétiser, il faut choisir une fréquence d'échantillonnage. Voyons comment la démodulation impose cette fréquence.

Le signal occupe la bande passante  $B$  autour de la fréquence d'échantillonnage  $f_0$  comme le montre le schéma suivant.



Pour démoduler, on va d'abord transposer le signal en bande de base, donc effectuer une translation de  $f_0 + B/2$ , fréquence médiane de la bande. Le spectre

occupera la bande  $\left[-B/2, B/2\right]$ , comme on le voit sur le schéma suivant.



La bande passante du signal étant  $B/2 = N/2T_s$ , et la fréquence d'échantillonnage doit être supérieure ou égale à  $2B/2$  soit  $N/T_s$ .

L'échantillonnage se fera aux temps  $tn = n T_s/N$ .

La chaîne de transmission est schématiquement la suivante :

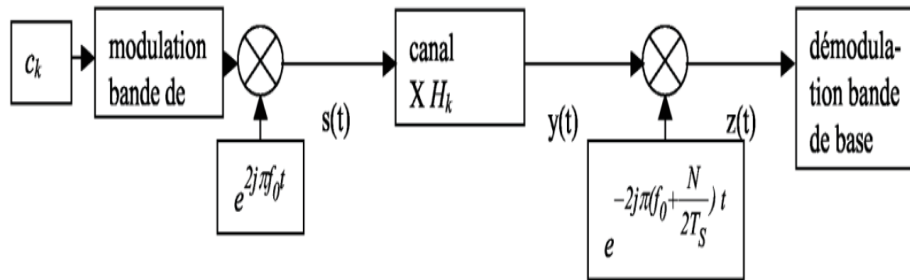


Figure 3.16. Chaîne de transmission.

Le signal reçu en bande de base après le décalage en fréquence de  $f_0 + B/2$  s'écrit alors sous la forme de l'équation 3.9.

$$z(t) = y(t)e^{-2j\pi(f_0 + \frac{N}{2T_s})t} = \sum_{k=0}^{N-1} C_k H_k e^{2j\pi(\frac{k-N}{T_s})t} \quad (3.9)$$

Puis après échantillonnage sous la forme.

$$z(t_n) = z(nT_s/N) = z_n = (-1)^n \sum_{K=0}^{N-1} C_k H_k e^{2j\pi\frac{kn}{N}} \quad (3.10)$$

On voit que  $z_n$  est la transformée de Fourier discrète inverse de  $C_k H_k$ , la démodulation consiste donc à effectuer une Transformée de Fourier directe discrète.

L'intérêt de cette discrétisation est qu'on peut réaliser ces Transformées de Fourier à l'aide des algorithmes FFT et IFFT.

Le schéma de principes du démodulateur se simplifie et prend la forme de la figure 3.17.

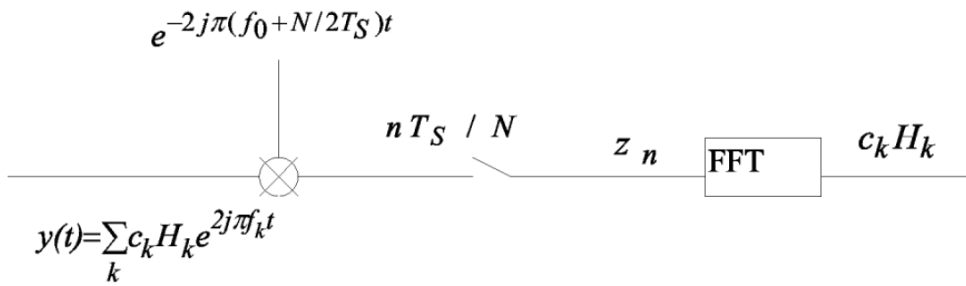


Figure 3.17. Démodulateur utilisant la FFT.

Si on suppose que le signal modulé en bande de base  $S(t)$  est lui aussi discrétisé, les échantillons  $S_n$  s'écrivent sous la forme de l'équation 3.11.

$$S_n = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{2j\pi \frac{kn}{N}} \quad (3.11)$$

Le schéma de principe du modulateur est le suivant est montré dans la figure 3.18.

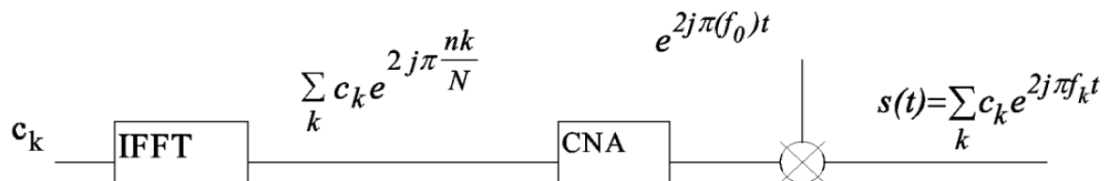


Figure 3.18. Modulateur utilisant l'IFFT.

Physiquement, les symboles numériques  $C_k$  sont les données dans l'espace fréquentiel, les échantillons du signal  $S_n$  sont les données dans l'espace temporel puisqu'on passe des premières aux secondes par une transformée de Fourier inverse.

Le spectre du signal OFDM est formé des  $C_k$  placés aux fréquences  $f_k$ , autour de ces données. Le spectre s'élargit suivant un sinus cardinal à cause du spectre de la fenêtre temporelle  $T_s$ .

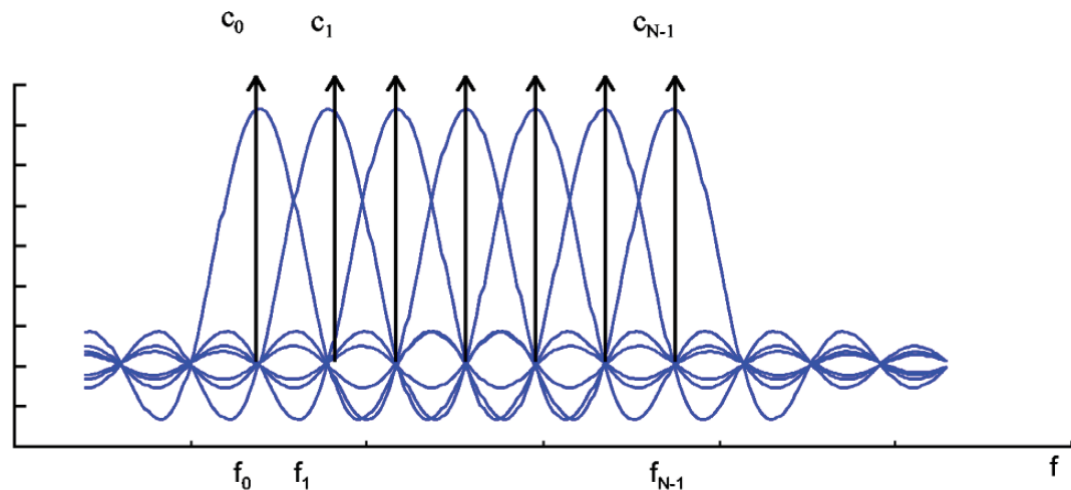


Figure 3.19. Spectre du signal OFDM.

### 3.7 Modulation de chaque sous-porteuse du signal OFDM [56]

Dans un système OFDM, les bits d'informations pour chaque sous-porteuse sont modulés par l'une des techniques de modulation présentées dans le chapitre 1. On peut augmenter le débit binaire en augmentant le nombre d'états dans une constellation, entraînant une diminution de distance entre les points de la constellation, ce qui accroît la sensibilité du système au bruit.

### 3.8 Problème des interférences [52]

Comme nous l'avons vu, les symboles subissent des échos et un symbole émis parvient au récepteur sous forme de plusieurs symboles atténués et retardés. Un symbole émis lors d'une période  $iT_s$  peut se superposer à un écho provenant du symbole émis à la période  $(i - 1)T_s$ . Il se produit alors des interférences.

Dans cette section, nous expliquons une technique qui permet d'éviter l'effet des interférences entre porteuses (En anglais : Inter Carrier Interference ICI) et les interférences entre trames OFDM. Ce dernier type d'interférences est communément appelé interférences entre symboles (En anglais : Inter Symbol Interference, ISI) même si ce terme n'est pas très bien adapté au procédé OFDM.

### 3.9 Intervalle de garde [57, 58]

Pour éliminer les interférences inter symboles (ISI), un intervalle de garde est rajouté pour chaque symbole OFDM, comme est montré dans la figure 3.22. On choisit la durée de l'intervalle de garde de telle sorte qu'elle soit supérieure par rapport à une durée de retard maximal causé par les phénomènes de propagation à trajets multiples et qu'un symbole ne puisse pas s'interférer avec le prochain symbole.

La Figure 3.22 illustre l'insertion d'un intervalle de garde dans un symbole OFDM. Les échantillons ajoutés au début du symbole pour former un intervalle de garde est la copie exacte des derniers échantillons du symbole OFDM. L'avantage de cette recopie est que chaque signal, issu d'un trajet multiple, possédera toujours un nombre entier de sinusoïdes sur la durée d'une trame OFDM sans son préfixe. Si le préfixe inséré au début d'une trame OFDM est muet (sans aucun signal), des interférences entre sous canaux (ICI) vont se produire. Afin d'éviter ces interférences, le préfixe ne doit pas être muet, mais être la recopie des derniers symboles de la trame OFDM. Dans le domaine fréquentiel, la sommation des signaux de la sous-porteuse issus des divers trajets ne détruira pas l'orthogonalité des sous-porteuses, elle introduira seulement un léger déphasage. Les interférences ISI se produisent lorsque le retard relatif est plus long que l'intervalle de garde [50].

La durée du symbole OFDM transmis peut être représentée comme suit :

$$T_s = T_g + T_u$$

Où  $T_g$  est la durée de l'intervalle de garde, et  $T_u$  est la durée du symbole OFDM dans le domaine temporel.

Étant donné leurs longues durées, les symboles OFDM sont assez résistants aux interférences ISI causées par les phénomènes de propagation à trajets multiples. Toutefois, en considérant chaque sous-porteuse à part, on est face à des phénomènes d'atténuation d'amplitude et de rotation de phase.

Malheureusement, l'insertion d'un intervalle de garde diminue le taux de symbole, mais si le nombre de sous-porteuses est assez grand, la durée de symbole

$T_s$  devient assez importante par rapport à l'intervalle de garde. Par conséquent, le débit binaire sera réduit de peu.

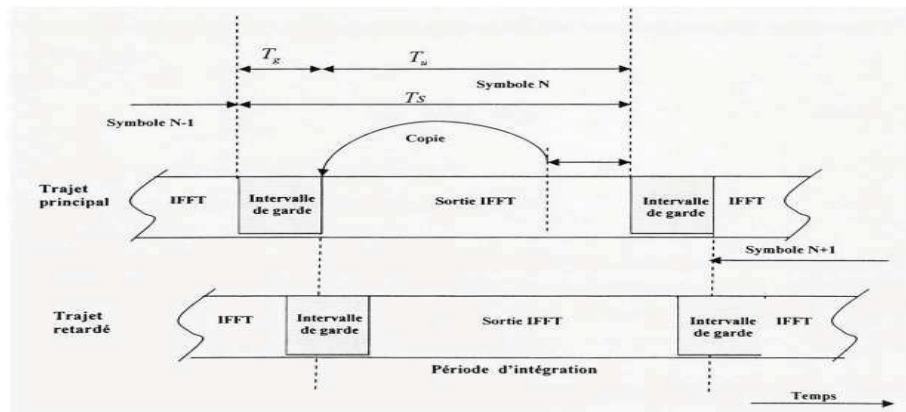


Figure 3.20 Intervalle de garde par prolongation cyclique.

### 3.10 Avantages et inconvénients de la technique OFDM [59, 60]

L'utilisation de la technique OFDM pour les systèmes de communications sans fil représente certains avantages et inconvénients. La décision d'utiliser une telle technique est toujours basée sur l'évaluation du rapport coût/performances. Dans certains scénarios tels que les communications mobiles d'intérieur, la réalisation de la technique OFDM s'avère obligatoire sinon la communication n'est pas fiable.

#### 3.10.1 Les principaux avantages de l'OFDM

L'OFDM présente les avantages suivants :

- 1- Une meilleure utilisation de la bande de fréquence allouée, et ceci par rapport à la technique FDM.
- 2- Une plus grande robustesse à l'évanouissement sélectif en fréquence que les systèmes à une seule-porteuse.
- 3- La génération des sous-porteuses est basée sur un algorithme bien connu et peu complexe qui est la FFT.
- 4- En implémentant la modulation différentielle, il n'y a aucun besoin de mettre en application une estimation du canal.
- 5- Un codage et entrelacement adapté permettent d'améliorer de façon importante le taux d'erreur.

### 3.10.2 Les inconvénients de l'OFDM

Le système utilisant la technique d'OFDM n'est pas parfait, il a des inconvénients qu'il faut prendre en considération en faisant la conception et surtout au niveau de sa mise en œuvre matérielle. L'OFDM a en effet certains inconvénients mentionnés ci-dessous par rapport à la modulation d'une seule porteuse.

- 1- Il est plus sensible au décalage de fréquence et au bruit de phase ;
- 2- Il représente des variations d'amplitudes sur des intervalles dynamiques assez larges.

Ceci exige des amplificateurs de puissances RF avec un taux de puissance crête à moyen relativement élevé.

### 3.11 Les domaines d'applications de l'OFDM [40]

La modulation OFDM est utilisée pour fournir des données à grande vitesse de connectivité. Elle est applicable dans les techniques suivantes.

- 1- ADSL (En anglais : Asymmetric Digital subscriber line) ;
- 2- PLC (En anglais : Power line communication) ;
- 3- IEEE802.11 ;
- 4- IEEE802.16 ;
- 5- DAB ;
- 6- DVB.

### 3.12 Conclusion

Dans ce chapitre une étude détaillée a été faite sur l'histoire, le principe et la théorie de la technique OFDM. L'OFDM permet d'assurer une bonne efficacité spectrale, et elle est robuste aux interférences causées par le canal grâce à l'ajout de préfix cyclique. Elle est très utilisée dans plusieurs standards de communication moderne. Elle fera l'objet d'une étude de ses performances dans le chapitre suivant.



# *Chapitre 04*

*Expérimentations et discussions*

## 4.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre une étude des performances de la techniques OFDM que nous avons présenté dans le troisième chapitre. Cette étude est réalisée par l'implémentation de la techniques OFDM sous MATLAB, et la simulation de la transmission d'un signal correspondant à une image. Plusieurs simulations de la transmission ont été réalisées sous différentes conditions tels que le type de modulation en présence de canal d'évanouissement bruité en absence du canal mais en présence de bruit. Le but de ces simulation est le test des différentes performances de la technique OFDM tel que le taux d'erreur binaire BER ainsi qu'un teste visuel de la constellation du signal reçu et l'image reçu.

## 4.2 description du système OFDM typique en base de bande

Dans cette section nous décrivons en détaille les différentes partie du système de transmission OFDM typique montrée dans la figure 4.1, qui est composé de trois parties principales, à savoir : l'émetteur, le canal de transmission et le récepteur.

## 4.3 L'émetteur OFDM

### Convertisseur parallèle série

Le flux binaire entrant de données est réarrangé en des blocs parallèles pour la modulation numériques et des traitements ultérieurs.

### Modulation numérique

Les données parallèles sont transformées en des symboles selon le plan de modulation choisi, à savoir : BPSK, QPSK, 16QAM,....etc.

### La transformée de fourier inverse

Chaque groupe de symboles est déplacé du plan IQ, qui correspond au domaine fréquentielle, au domaine temporel.

### **Convertisseur parallèle série**

Les données du domaine temporel parallèles sont réarrangées en des trames séries.

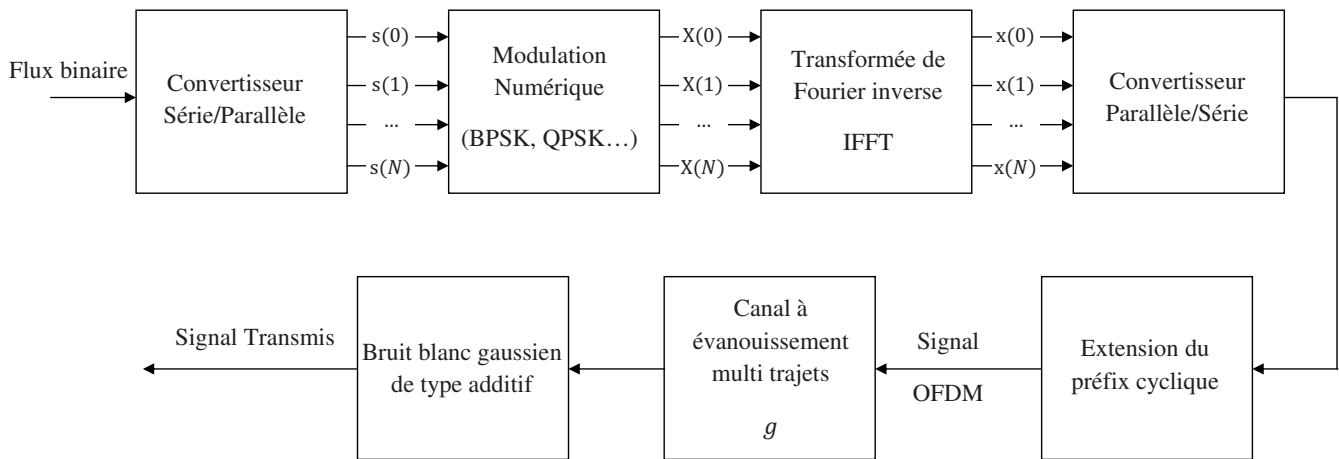


Figure 4.1. Schéma synoptique d'un modulateur OFDM.

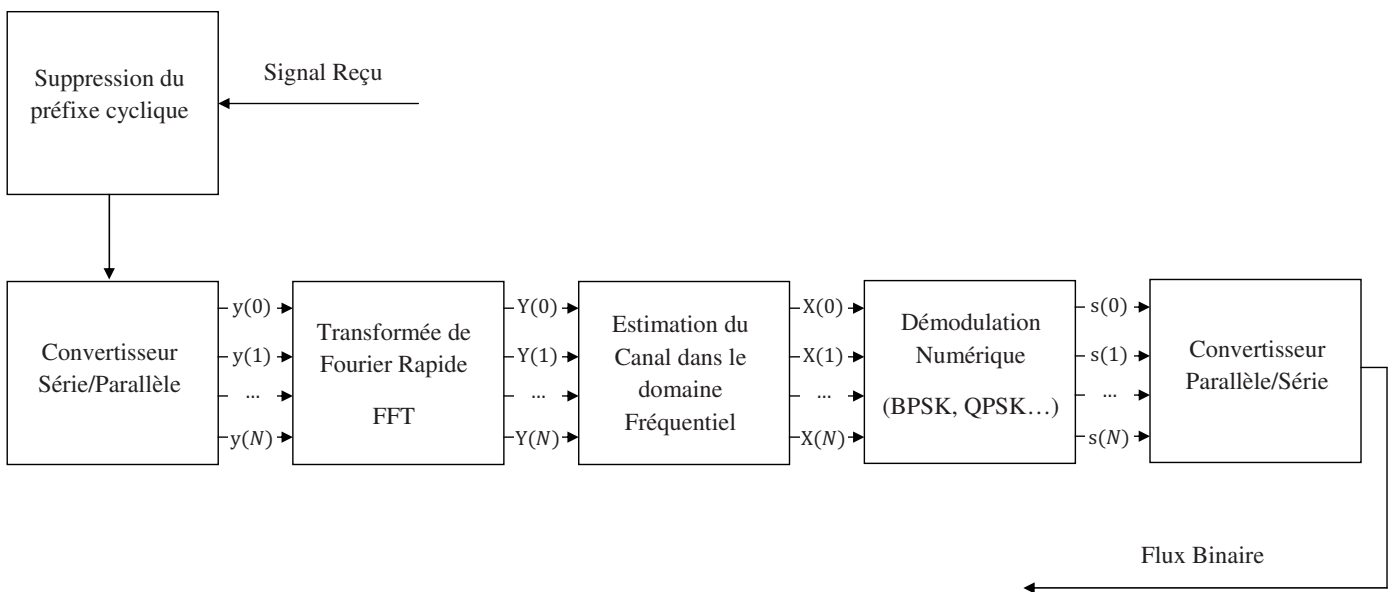


Figure 4.2. Schéma synoptique d'un démodulateur OFDM.

### **Extension de préfix cyclique**

Une extension de préfix cyclique ou intervalle de garde est ajoutée à chaque trame pour lutter contre l'interférence inter symboles (ISI).

### **Le canal de transmission**

#### **Canal d'évanouissement par trajets multiples (Multi path fading channel)**

Le signal OFDM propage à travers un canal d'évanouissement par trajets multiples modélisé par la réponse impulsionnelle  $g(t)$

### **Bruit blanc gaussien additive**

Le signal OFDM est soumis à un bruit blanc gaussien  $w(n)$

## **4.4 Le récepteur OFDM**

### **Suppression du préfixe cyclique**

L'extension du préfixe cyclique est supprimée de chaque trame.

### **Convertisseur série parallèle**

La trame série OFDM est réarrangée en un bloc parallèle.

### **Transformée de fourier rapide**

Les données dans le domaine temporel sont déplacées au domaine fréquentiel pour un traitement ultérieur.

### **Estimation du canal dans le domaine fréquentiel**

Une estimation du canal est calculée et utilisée pour égaliser les trames OFDM dans le domaine fréquentiel.

### **Démodulation numérique**

Les données du domaine fréquentiel sont démodulées à partir des symboles dans le plan IQ aux bits.

### **Convertisseur parallèle série**

Les données parallèles sont réarrangées en un flux binaire série.

#### **4.5 Modélisation du canal**

Dans le but d'effectuer des simulations avec des conditions réalistes. La transmission OFDM propage à travers un canal bruité avec un évanouissement multi trajets. Le canal de transmission est caractérisé par une réponse impulsionnelle  $g(t)$ .

Le signal  $y(t)$  est le signal OFDM corrompu obtenu à la sortie du canal. Il est exprimé sous la forme :

$$y(t) = x(t) * g(t) + w(t) \quad (4.1)$$

Où  $w(t)$  est le bruit de canal qui est dans notre cas un bruit blanc gaussien. Le symbole (\*) représente le produit de convolution.

#### **4.6 Evaluation des performances du système OFDM sous différentes conditions**

Nous évaluons les performances du système OFDM en présence d'un bruit blanc gaussien de type additif en absence et en présence des effets de l'évanouissement multi trajets (canal multi trajets). Le signal d'entrée correspond à une image \*.bmp en niveau de gris quantifié sur 8 bits ce qui donne 256 niveau de gris.

Lors de l'acquisition de l'image, cette dernière est convertie en une matrice dont les entrées sont des scalaires dont les valeurs sont comprises entre 0 et 255.

Les vecteur de la matrice correspondante à cette image sont convertis en des vecteur qui sont misent en cascade afin de formé un signal (flux binaire). Le signal ainsi obtenu et devisé par la suite en trames de longueur fixe.

#### **4.7 Evaluation en absence de l'effet de l'évanouissement de canal**

Les testes sont effectues pour différents type de modulations, à savoir :

1. La BPSK

2. La QPSK
3. La 16-QAM
4. La 32-QAM
5. La 64-QAM.

Le but derrière l'emploi de ces différentes techniques de modulation est l'examine de leurs effets sur les performances du système de transmission OFDM.

Le tableau 1 montre les valeurs des différents paramètres de la simulation.

Tableau 4.1 Paramètres de la simulation.

Taille de la FFT/IFFT	64
La longueur de l'extension du préfixe cyclique	16

Le taux d'erreur binaire (BER) des différentes configurations de modulation dans le système OFDM sont examinés à des différentes valeurs du SNR.

Les performances du système de transmission sont examinés en termes du taux d'erreur binaire pour les différentes types de modulation et pour différents niveaux du taux de signal sur bruit SNR (RSB).

Le tableau 2 résume les différents niveaux du BER obtenues pour les différentes techniques de modulation et pour différents niveaux de bruit. Il est clair d'après ce tableau que le niveau du BER augment d'une part avec l'augmentation de la valeur du SNR et d'autre part avec l'augmentation du nombre des états (BPSK : 02 états, QPSK : 04 états...etc).



Tableau 4.2. Taux d'erreur binaire (BER) en fonction des techniques de modulation et du SNR.

	Taux d'erreur binaire (BER)				
	SNR (dB)	0	5	10	20
<b>Techniques de Modulation</b>	<b>BPSK</b>	0.077	0.0056	$3.3 \cdot 10^{-6}$	0
	<b>QPSK</b>	0.21	0.054	0.0012	0
	<b>16-QAM</b>	0.31	0.2	0.065	$9.5 \cdot 10^{-7}$
	<b>32-QAM</b>	0.4	0.33	0.2	$9.9 \cdot 10^{-4}$
	<b>64-QAM</b>	0.37	0.31	0.22	0.013

#### 4.8 Interprétation des résultats présentés dans les figures

La figure 4.3, 4.7, 4.13, 4.19 et 4.23 représente le diagramme de constellation obtenue pour les modulations BPSK, QPSK, 16-QAM, 32-QAM et 64-QAM respectivement. Il s'agit d'une représentation polaire de la porteuse modulée, qui comporte un nombre points égale au nombre des états. L'augmentation du nombre d'états permet, à débit constant, d'occuper une bande BW de plus en plus faible, ce qui permet d'augmenter l'efficacité spectrale.

D'après les figures 4.5, 4.6, 4.9, 4.11, 4.15, 4.17, 4.19, 4.21, nous remarquons que la porteuse modulée voit son amplitude fluctuer, de même que sa phase. Par conséquence, les constellations sont formées de nuages de points.

Il est clair que la robustesse de ces modulations diminue avec le nombre d'états, surtout en présence de bruit. Nous remarquons d'après le tableau 4.2 que pour un même type de modulation BPSK ou QPSK, le BER est d'autant plus faible que le rapport signal bruit est bon. Par contre, pour un même rapport signal bruit, le BER

augmente fortement avec le nombre d'états. Par conséquent, une transmission de qualité est plus délicate avec une modulation à grand nombre d'états.

Nous remarquons d'après le tableau 4.2 qu'un BER identique nécessite un rapport signal bruit plus important quand le nombre d'états augmente. A rapport signal bruit donné, le BER croit fortement avec le nombre d'états.

### 4.9 Modulation BPSK

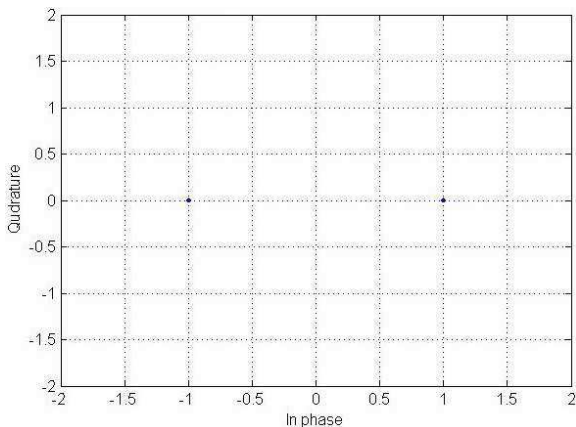


Figure 4.3. Diagramme de constellation BPSK.



Figure 4.4. Image originale Transmise.

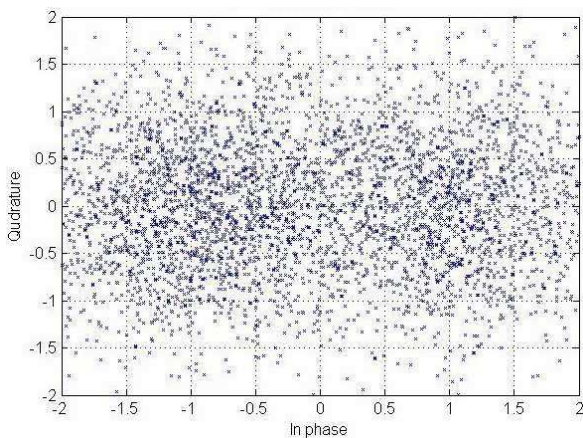


Figure 4.5. Diagramme de Constellation BPSK avec un SNR = 0 dB.

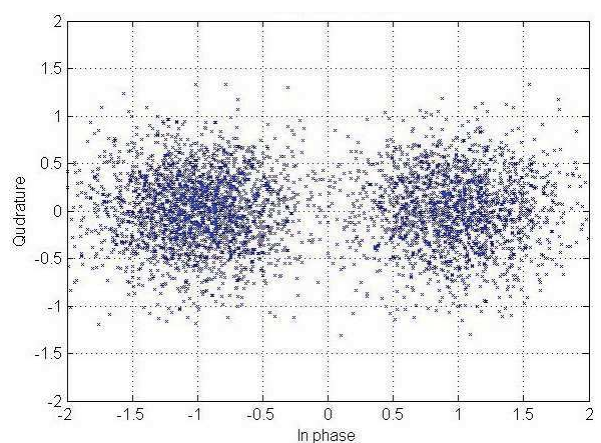


Figure 4.6. Diagramme de constellation BPSK bruité avec un SNR = 5 dB.

### 4.10 Modulation QPSK

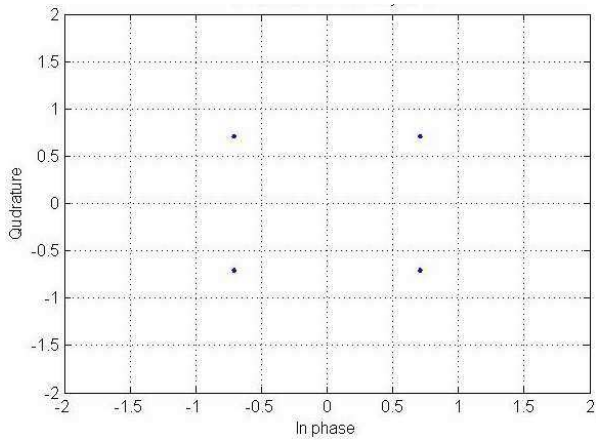


Figure 4.7. Diagramme de constellation QPSK.



Figure 4.8. Image originale Transmise.

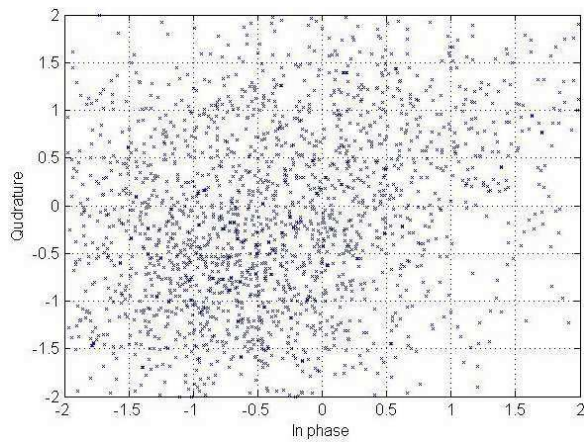


Figure 4.9. Diagramme de constellation QPSK bruité avec un SNR = 0dB.



Figure 4.10. Image reçue.

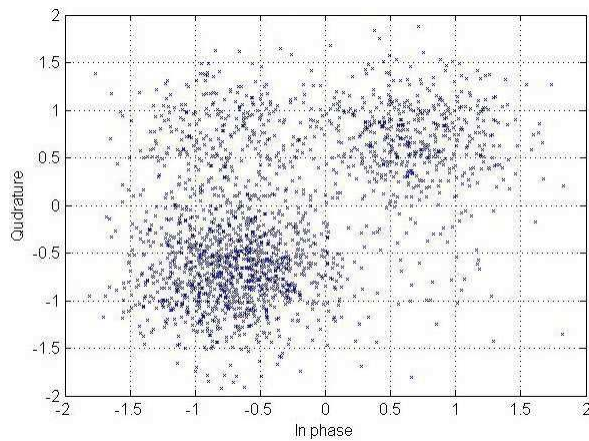


Figure 4.11. Diagramme de constellation QPSK bruité avec un SNR = 5 dB.



Figure 4.12. Image reçue.



### 4.11 Modulation 16-QAM

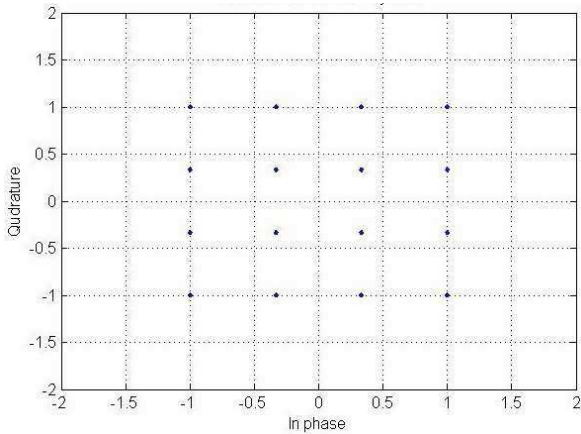


Figure 4.13. Diagramme de constellation 16-QAM.



Figure 4.14. Image originale Transmise.

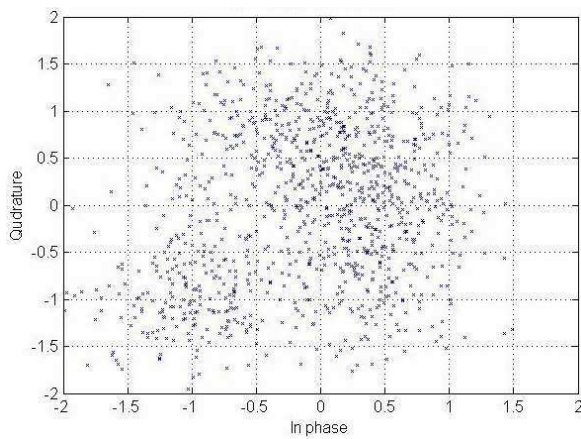


Figure 4.15. Diagramme de constellation 16-QAM bruité



Figure 4.16. Image reçue

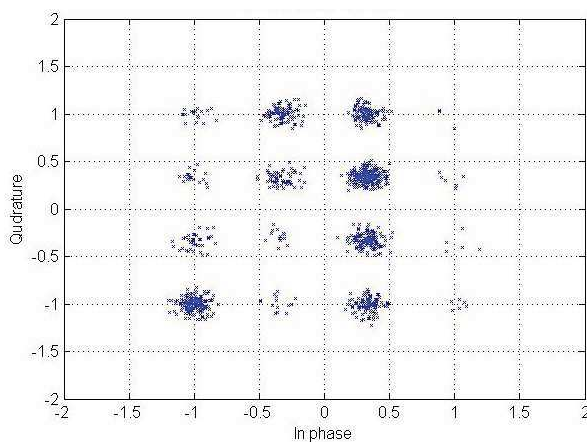


Figure4.17. Diagramme de constellation 16-QAM bruité avec un SNR = 20 dB.



Figure 4.18. Image reçue.

### 4.12 Modulation 32-QAM

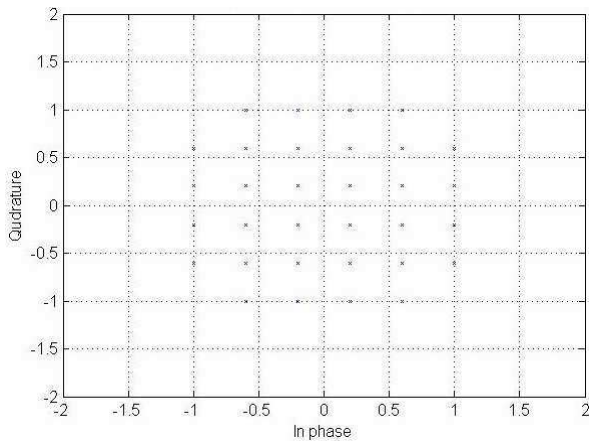


Figure 4.19. Diagramme de constellation 32-QAM.

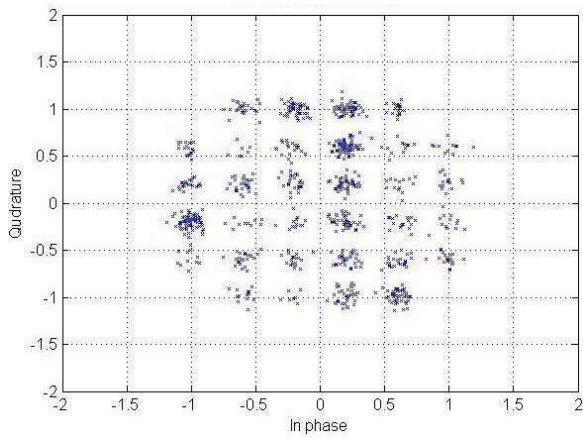


Figure 4.21. Diagramme de constellation 32-QAM bruité avec un SNR = 20 dB.

### 4.13 Modulation 64-QAM

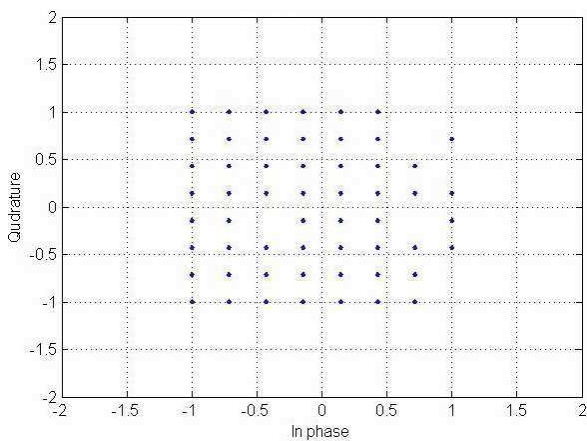


Figure 4.23. Diagramme de constellation 64-QAM.



Figure 4.20. Image originale Transmise.



Figure 4.22. Image reçue.



Figure 4.24. Image originale Transmise.



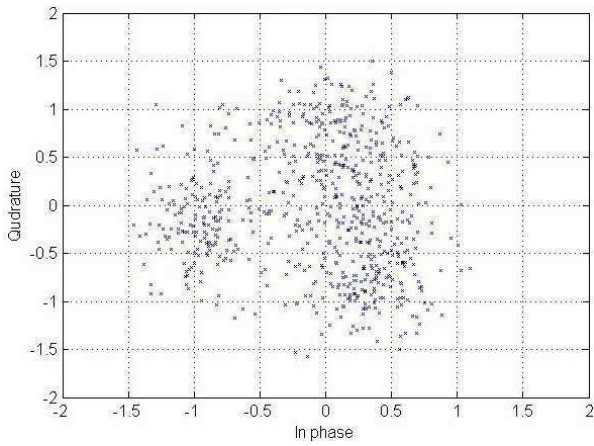


Figure 4.25. Diagramme de constellation 64-QAM bruité avec un SNR = 10 dB.

Figure 4.26. Image reçue

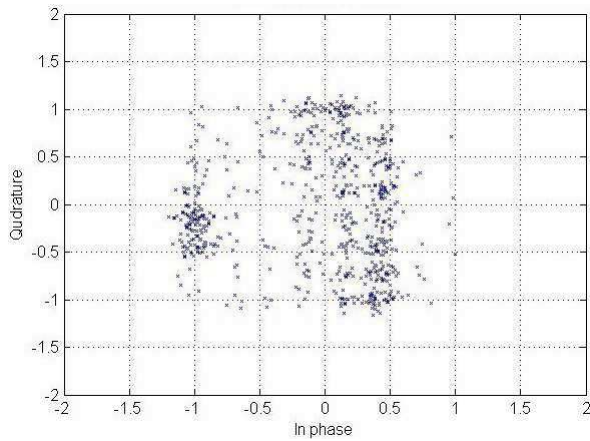


Figure 4.27. Diagramme de constellation 64-QAM bruité avec un SNR = 20 dB.

Figure 4.28. Image reçue.

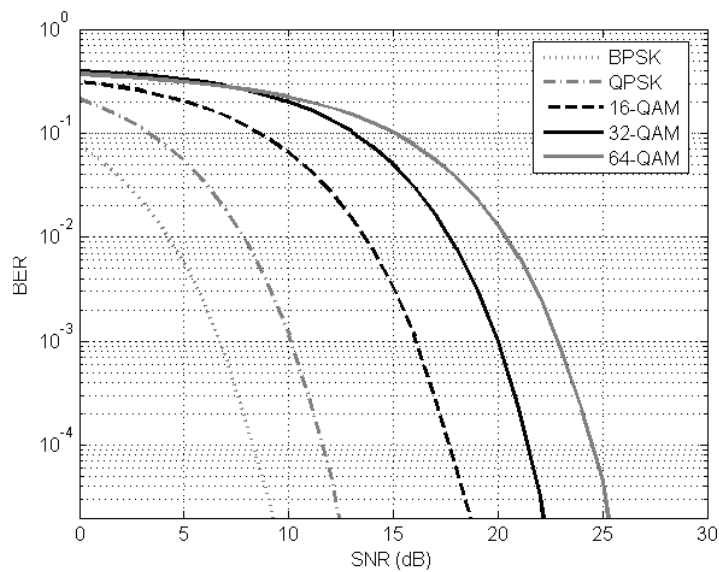


Figure 4.29. Taux d'erreur binaires obtenue pour différentes techniques de modulation et pour différents niveau du SNR.

#### 4.14 Evaluation en présence de l'effet de l'évanouissement de canal

Dans cette section nous présentons les simulations du système de transmission OFDM en présence d'un canal à évanouissement multi trajets. Le nombre des coefficients du canal sont égal à 8, dont la réponse impulsionnelle est présentée dans la figure 4.31. Le bruit de canal est un bruit blanc gaussien ajouté avec un SNR = 20 dB, la technique de modulation utilisée est la QPSK.

Il est claire d'après le résultat obtenu dans la figure 4.33 que l'image reçue est complètement distordue, ceci est du aux effets du canal de transmission à évanouissement.

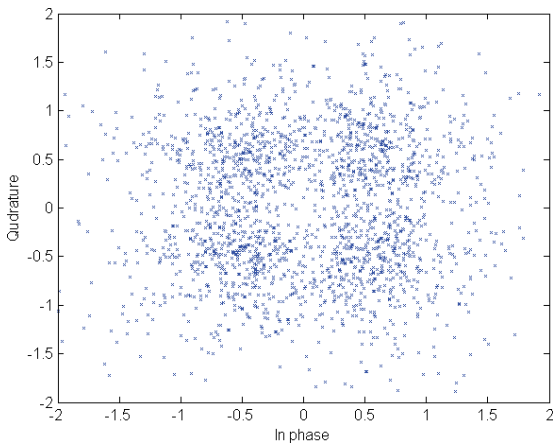


Figure 4.30. Diagramme de constellation QPSK bruité avec un SNR = 20 dB.

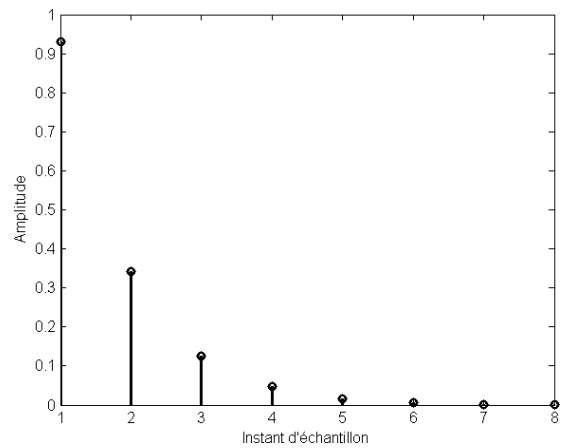


Figure 4.31. Réponse impulsionnelle du canal.



Figure 4.32. Image originale transmise.

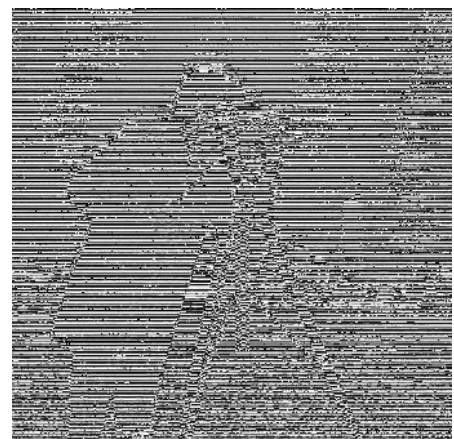


Figure 4.33. Image reçue.

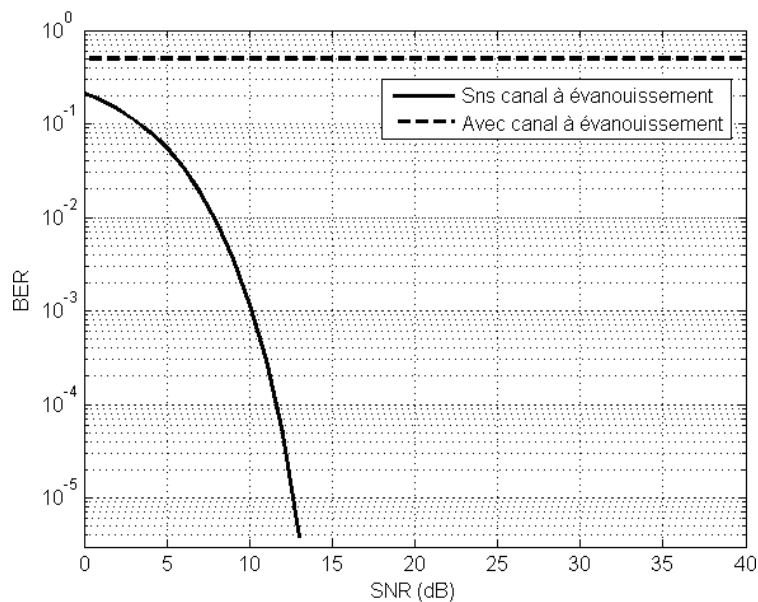


Figure 4.34. Taux d'erreurs binaires obtenus pour la QPSK et pour différents niveaux du SNR, avec et sans canal à évanouissement.

La figure 4.34 montre le BER pour le cas d'une modulation QPSK pour différents niveaux du SNR en absence et en présence du canal à effet d'évanouissement. Pour le cas où le canal présente un effet d'évanouissement le BER est constant et égal à 1 pour toutes les valeurs du SNR, par conséquent le signal reçu (Image) sera complètement distordu.

#### 4.15 Conclusion

L'implémentation d'un système de transmission OFDM a été décrite, et simulé pour un signal d'entrée représentant le flux binaire issu de la conversion d'une image.

Différentes techniques de modulation (BPSK, QPSK, M-QAM) ont été utilisées, en absence et en présence d'un canal à effet d'évanouissement et en présence du bruit.

Les résultats obtenus ont montré que quand le nombre d'états de la technique de modulation utilisée augmente, le BER augmente en fonction du SNR. Nous avons constaté que le canal à effet d'évanouissement influe dramatiquement sur la qualité du signal reçu (image reçue).



# *Conclusion Générale*

Dans ce mémoire, nous avons présenté une étude et une analyse théorique et expérimentale des performances de la technique OFDM, ainsi qu'une étude théorique de son implémentation dans les communications sans fil basé sur le standard IEEE 802.11.

Nous avons présenté les notions de base sur l'échantillonnage, la quantification, la modulation et leurs types ainsi que la transformée de Fourier directe et son inverse. Nous avons décrit les principales caractéristiques d'une transmission numérique.

Le standard l'IEEE 802.11 a été présenté en commençant par les réseaux sans fil et leurs catégories. Cette norme couvre les deux premières couches du modèle OSI qui sont la couche physique et la couche liaison de données. La technique OFDM est utilisée au niveau de la couche physique pour moduler les données. L'OFDM permet d'assurer une bonne efficacité spectrale. Sa robustesse aux interférences, causées par le canal, vienne de l'ajout de préfix cyclique. L'OFDM permet une meilleure utilisation de la bande de fréquences allouée, et ceci par rapport à la technique FDM.

Nous avons implémenté et simuler un système de transmission OFDM. Le signal d'entrée représente le flux binaire issu de la conversion d'une image. Nous avons utilisé différentes techniques de modulation (à savoir : BPSK, QPSK, M-QAM), en absence et en présence d'un canal à effet d'évanouissement et en présence du bruit. Les résultats de ces simulations ont montré que quand le nombre d'états de la technique de modulation utilisé augment, le BER augmente en fonction du SNR. Nous avons constaté que le canal à effet d'évanouissement influe dramatiquement sur la qualité du signal reçu (image reçue).

# *Bibliographie*

- [1] Theory and Applications of OFDM and CDMA Wideband Wireless Communications Henrik Schulze and Christian Lüdgers Both of Fachhochschule Südwestfalen Meschede, Germany, John Wiley & Sons Ltd.
- [2] Abrief\_History\_of\_OFDM,  
Site internet : [http://www.wimax.com/commentary/wimax\\_weekly/sidebar-1-1-a-brief-history-of-ofdm](http://www.wimax.com/commentary/wimax_weekly/sidebar-1-1-a-brief-history-of-ofdm)
- [3] Lui, Hui and Li, Guoqing. OFDM-Based Broadband Wireless Networks Design and Optimization Wiley-Interscience 2005.
- [4] Maha George Zia, 'channel estimation using adaptive filtering in ofdm system', Proceedings of the IASTED International Conference Signal and Image Processing (SIP 2009) August 17 - 19, 2009 Honolulu, Hawaii, USA.
- [5] Hikmet SARI, techniques de l'ingénieur, 1995.
- [6] FRANCIS COTTET, traitement du signal, aide-mémoire, Nouvelle présentation, 2005 © Dunod, Paris, 2000.
- [7] Gasquet C., witomski P., analyse de fourier et applications,(Masson,1995).
- [8] PSI-PSI\* DUNOD Nouveaux programmes 2014, ELECTRONIQUE- Thierry GERVAIS-VUIBERT.
- [9] <http://perso.fundp.ac.be/~jllongue/syllabus/Eing2120-5.pdf>.
- [10] Bakir Hadj Ali, « Exploitation de l'association des techniques MIMO OFDM pour la transmission dans les réseaux locaux sans fil », Mémoire Pour l'obtention du Diplôme de Magister, Université Abou Bakr Belkaid – Tlemcen, 2012.
- [11] J. D. Parsons, « The Mobile Radio Propagation Channel », vol. 2. Wiley, October 2000.
- [12] « Transmission d'informations », Disponible sur : <http://www.web>.
- [13] cours LAUNAY Féridéric .transmission en bande de base.
- [14] Claude Lahache. Modulation numérique. cours en ligne.
- [15] M. Joindot et A. Glavieux, « Introduction aux Communications Numériques », Collection Pédagogique de Télécommunication, Ellipses, 1995.

- [16] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Modulation\\_du\\_signal](http://fr.wikipedia.org/wiki/Modulation_du_signal).
- [17] <https://fr.scribd.com/doc/67439060/2/i-2-principe-2-la-modulation-multi-porteuse>.
- [18] M. Éric BACHARD, M. Claude PETIT-JEAN, Aide-mémoire « la modulation de signaux analogiques et la boucle à verrouillage de phase dans les télécommunications » Automne 2004.
- [19] « Transmission d'informations », Disponible sur : <http://www.web>.
- [20] A Choumane, " Synthèse d'un canal de propagation par système multi-antennes pour la caractérisation de terminaux mobiles à diversité," Thèse de doctorat, Université De Limoges, France, 2011.
- [21] Transformée de Fourier- futurasiences, disponible sur : <https://www.futura-sciences>.
- [22] G.BAUDOIN et J.-F.BERCHER, Transformée de Fourier Discrète, novembre 2001-version 0.1.
- [23] « Radiotechnique HF, chap.1 », Editions Léone,2000,disponible sur :[http://www.epsic.ch/cours\\_radio\\_HF/PDF/100.pdf](http://www.epsic.ch/cours_radio_HF/PDF/100.pdf).
- [24] Frank ITOUA ENGOTI/thèse de doctorat/ Université de Limoges/2018.
- [25] P.van Zeijl et al., « A bluetooth radio in 0.18- $\mu$ m CMOS »,IEEE,G.Solid-State Circuit,vol,37,no12 p.
- [26] <http://www.calvados-strategie.com>.
- [27] K. AL AGHA, G. PUJOLLE, G. VIVIER, Réseaux de mobiles et réseaux sans fil. Eyrolles, 2001.
- [28] <https://web.maths.unsw.edu.au/~lafaye/CCM/wireless/wlintro.htm>.
- [29] FRANK ITOUA ENGOTI, réalisation d'une plate-forme pour l'optimisation de réseaux de capteurs sans fil appliqués au bâtiment intelligent, thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université de Limoges, 12mars 2018.
- [30] P.vanZeijl et al., “ A Bluetooth radio in 0.18- $\mu$ m CMOS “, IEEE G.Solid-State Circuits, vol.37,n°12,p.1679-1687,décembre 2002.
- [31] K.Casey, A.Lim, et G.Dozier, « A Sensor Network Architecture for Tsunami Detection and Response”, Int.J.Distrib.sens.Netw., vol.4,no 1,p.2742,janv.2008.

- [32] ANSI/ISO. Information Processing Systems - Basic Reference Model for Open Systems Interconnection (OSI). ISO/IEC 7498-1:1994.
- [33] M.Terré, Wi-Fi, mars 2007.
- [34] IEEE Standards for Information Technology. Telecommunications and Information Exchange between Systems – Local and Metropolitan Area Network – Specific Requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification. ISO/IEC DIS 8802-11:1997, IEEE Std. 802.11-1997.
- [35] IEEE Standards for Information Technology. Telecommunications and Information Exchange between Systems – Local and Metropolitan Area Network – Specific Requirements – Part 11: Supplement to 802.11-1997, Wireless LAN MAC and PHY specifications: Higher speed Physical Layer (PHY) extension in the 2.4 GHz band. IEEE Std. 802.11-1999.
- [36] IEEE Standards for Information Technology. Telecommunications and Information Exchange between Systems – Local and Metropolitan Area Network – Specific Requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification – Amendment 1: High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band. ISO/IEC DIS 8802-11:1999/Amd 1:2000(E), IEEE Std. 802.11a-1999.
- [37] IEEE Standards for Information Technology. Telecommunications and Information Exchange between Systems – Local and Metropolitan Area Network – Specific Requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification – Amendment 4: Further Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band. IEEE Std. 802.11g-2003.
- [38] L.S.PAUN, Gestion de la mobilité dans les réseaux ambiants, thèse de doctorat, INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE, novembre 2005.
- [39] ETSI EN 300 401, Radio Broadcasting Systems; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers, May 2001.
- [40] <http://www.wireless-techbook.com/ofdm/64-introduction-ofdm.html>.
- [41] Kamran Arshad. Channel Estimation in OFDM Systems, Thesis Master of Science king fahd university of Petroleum and Minerals, Dhahran. June 2003.

- [42] Z. Zhongyi, T. Zhaosheng, “Modulation and Demodulation Technique of Constant Envelope OFDM “, IEEE, 4ème Conference International on Instrumentation and Measurement Computer, Communication and Control, pp 156-160, China 2014.
- [43] [techno-science.net/définition/3917.html](http://techno-science.net/définition/3917.html).
- [44] Mérouane Debbah. OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) Mobile Communications Group, Institute Eurecom.
- [45] Amin, B., Mansoor, B., Nawaz, S.J. *et al.* Compressed Sensing of Sparse Multipath MIMO Channels with Superimposed Training Sequence. *Wireless Pers Commun* 94, 3303–3325 (2017).
- [46] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Multiplexage>.
- [47] Jean-Louis VERNEUIL, « Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 GBits/s », Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2003, disponible sur :<http://epublications.unilim.fr/theses/2003/verneuil-jean-louis/verneuil-jean-louis.pdf>.
- [48] Xiang Yang, Yang Hechao, « The Application of OptiSystem in Optical Fiber Communication Experiments », University Jiaozuo,China, Proceedings of the Third International Symposium on Computer Science and Computational Technology(ISCST '10), Jiaozuo, P. R.China, 14-15, August 2010, pp. 376-378.
- [49] SelkaSoufyane, Benzerdjeb Choukri, « ENCODAGE DE L'AMPLITUDE SPECTRALE POUR OCDMA », Master en Photoniques Réseaux Optiques de Télécommunications, Soutenu à Tlemcen, UNIVERSITE ABOU BAKR BELKAID, le 26 Juin 2013, 89 pages.
- [50] Pierre GRUYER, Simon PAILLARD. Modélisation d'un modulateur et démodulateur OFDM. décembre 2005.
- [51] C. Berrou, “Codes et Turbocodes”, Springer Verlag, France, 2007.
- [52] Virginie Dégardin. Analyse de la faisabilité d'une transmission de données haut Débit sur le réseau électrique basse tension. Thèse de doctorat en électronique Université des sciences et technologies de Lille Décembre 2002.
- [53] Annick Le Glaunec Modulations Multiporteuses.

- [54] Damien Prêle, « Squids et Méthodes De Multiplexage », mai 2009, Disponible sur [:http://www-ecole-drtbt.grenoble.cnrs.fr/UserFiles/file/drtbt09/drtbt09\\_14\\_prele.pdf](http://www-ecole-drtbt.grenoble.cnrs.fr/UserFiles/file/drtbt09/drtbt09_14_prele.pdf).
- [55] Geneviève Baudoin, Radiocommunications numériques, Tome 1 : Principes, modélisation et simulation, Dunod Electronique, 2002.
- [56] R.V. Née & R. Prasad, « OFDM for Wireless Multimedia Communications », Artech House Publishers, 2000.
- [57] W. Henkel, G. Taubock, P. Odiing, P. Borjesson, and N. Petersson, "The cyclic prefix of OFDM/DMT - an analysis," in International Zurich Seminar on Broadband Communications. Access, Transmission, Networking, Zurich, Switzerland, Feb. 2002.
- [58] B. Muquet, M. de Courville, P. Duhamel, and G.B. Giarmakis, OFDM with Trading Zéros versus OFDM with Cyclic Prefix: Links, Comparisons and Application to the HiperLAN/2 System. In Proceedings of the Int. Conf. On Communications, volume 2, pages 1049-1053, New-Orleans, USA, June 2000.
- [59] Salvatore RAGUSA, « Écrêtage Inversible pour l'Amplification Non-Linéaire des Signaux OFDM dans les Terminaux Mobiles », Thèse de doctorat, UJF de Grenoble, 2006.
- [60] W. G. Jean, K. H. Chang, and Y. S. Cho, « An equalization technique for orthogonal frequency-division multiplexing systems in time-variant multipath channels », IEEE Trans.Commun., vol. 47, pp. 27-32, Jan. 1999.