

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Ecole Nationale Polytechnique



Département d'électronique  
Laboratoire De Communication et Conversion Photovoltaïque  
Mémoire de Master  
pour l'obtention du diplôme Master en électronique

---

# Caractérisation d'un système COFDM avec une estimation semi-aveugle

---

**Sidahmed BOUDOUMI**

Sous la direction de  
**Dr .Zidane TERRA**

Présenté et soutenu publiquement le 20/06/2016

## Composition du Jury :

Président	M .Med.Salah AIT CHEIKH	Pr	ENP
Rapporteur/Promoteur	M .Zidane TERRA	MAA	ENP
Examineur	M .Rachid ZERGUI	MAA	ENP

**ENP 2016**



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Ecole Nationale Polytechnique



Département d'électronique  
Laboratoire De Communication et Conversion Photovoltaïque  
Mémoire de Master  
pour l'obtention du diplôme Master en électronique

---

# Caractérisation d'un système COFDM avec une estimation semi-aveugle

---

**Sidahmed BOUDOUMI**

Sous la direction de  
**Dr .Zidane TERRA**

Présenté et soutenu publiquement le 20/06/2016

## Composition du Jury :

Président	M .Med.Salah AIT CHEIKH	Pr	ENP
Rapporteur/Promoteur	M .Zidane TERRA	MAA	ENP
Examineur	M .Rachid ZERGUI	MAA	ENP

**ENP 2016**

## ملخص:

يتوجب على أجهزة الاتصالات اللاسلكية اقتراح خدمات تتطلب تبادل المعلومات بتدفق عال، وذلك مع حركة أكثر للمستعملين. لأجل ذلك وجب تقديم تقنيات جديدة لمعالجة الإشارة. تعتبر تقنية OFDM واحدة من ضمن هذه التقنيات، و هي تكون حالياً محورا هاما للبحث في مجال الاتصالات. هذه التقنية التي تعتمد على مبدأ تعامد المرشحات لا تحتاج إلى تعادل لكن تحتاج إلى تقدير الاستجابة الترددية لكل عنصر متنقل.

وخصص هذا العمل إلى تصميم نموذج محاكاة لسلسلة الإرسال COFDM مع استعمال تقنية تقدير قناة التواصل مع أخذ بالاعتبار المعيار IEEE 802.11a.

**كلمات مفتاحية:** تقدير قناة، نظام توزيع متعدد العوامل المتعامدة (OFDM)، القنوات متعددة المسالك.

## Abstract:

High bit rates services focusing in the telecommunications domain are leading to an increasing interest for OFDM modulation in actual research. This technique is based on orthogonal modulating filters and doesn't need the use of an equalizer, but it requires the estimation of the channel frequency response for each transmitted symbol. Today's propagation contexts met in high bit rate mobile communications may be really tough to precisely estimate.

This work was devoted to modeling and simulation of a COFDM transmission system using a semi-blind estimation of the communication channel. The simulation of the COFDM system was set up following the IEEE 802.11a standard.

**Key words:** Estimate, OFDM, Channels multipath.

## Résumé :

L'orientation des télécommunications vers les hauts-débits fait de la technique de modulation OFDM l'un des centres d'intérêts privilégiés de la recherche actuelle. Cette technique basée sur le principe d'orthogonalité des "filtres" réalisant la modulation ne nécessite pas d'égalisation à proprement parler, mais requiert une estimation de la réponse fréquentielle du canal pour chaque symbole transmis.

Ce travail a été consacré à la modélisation et à la simulation d'une chaîne de transmission COFDM en utilisant une estimation semi-aveugle du canal de communication. La simulation du système COFDM a été réalisée en respectant la norme IEEE 802.11a.

**Mots clés :** Estimation, OFDM, Canaux à trajets multiples

# Dédicace

*" À mes parents qui m'ont enseigné ce qu'est le plus important à enseigner, à savoir les valeurs de la vie surtout la patience, le respect et l'appréciation du travail et du savoir. À mes frères et sœurs pour leurs encouragements, et soutiens continus pendant toute ma formation. À mes amis et camarades, à toutes les personnes qui m'ont enseigné tout au long de mon parcours."*

*-Sidahmed BOUDOUMI.*

# Remerciements

En préambule, nous voulons remercier **M. Z. TERRA** pour son soutien continu, sa disponibilité, son aide et ses précieux conseils.

Nous tenons à remercier chaleureusement monsieur **M. Med.S. AIT CHEIKH** pour nous avoir fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire, ainsi que **M. R. ZERGUI** pour avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous remercions toute personne qui, d'une manière ou d'une autre a contribué à l'élaboration de ce travail (Malik, khirou, djamel, Mohamed). Enfin, Nous tenons à remercier tous nos amis et camarades ainsi que tous les enseignants du département d'Électronique de l'ENP.

# Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux

Abréviations

<b>Introduction générale</b>	<b>10</b>
<b>1 Principes de base de l'OFDM et codage</b>	<b>11</b>
1.1 Introduction . . . . .	11
1.2 Principes de bases de l'OFDM . . . . .	12
1.2.1 La technique OFDM . . . . .	12
1.2.2 Notion d'orthogonalité : . . . . .	13
1.2.3 Émission et réception du signal OFDM : . . . . .	14
1.2.4 Conversion série-parallèle : . . . . .	15
1.2.5 Modulation des sous-porteuses : . . . . .	15
1.2.6 Génération des sous-porteuses : . . . . .	16
1.2.7 Intervalle de garde : . . . . .	17
1.2.8 canal radio mobile . . . . .	18
1.3 Codage de canal dans un système OFDM . . . . .	18
1.3.1 Codage du canal . . . . .	18
1.3.2 Code en bloc (RS) . . . . .	19
1.3.3 Entrelacement . . . . .	20
1.4 Estimation de canal . . . . .	22
1.4.1 Modulation différentielle . . . . .	22
1.4.2 Les pilotes . . . . .	24
1.4.3 Détection cohérente . . . . .	25
1.5 Conclusion . . . . .	27

<b>2</b>	<b>Modélisation et simulation</b>	<b>28</b>
2.1	Introduction . . . . .	28
2.2	Chaîne de transmission COFDM avec estimation . . . . .	29
2.3	Simulations et Résultats : . . . . .	30
2.4	Conclusion . . . . .	33
	<b>Conclusion générale</b>	<b>34</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>35</b>



# Table des figures

1.1	Comparaison entre les spectres des signaux FDM et OFDM formé par 10 canaux [7]. . . . .	12
1.2	Spectre d'un signal OFDM formé par 5 sous porteuses. [7] . . . . .	13
1.3	Schéma fonctionnel d'un émetteur-récepteur OFDM de base . . . . .	14
1.4	Modulation multi-porteuses avec $N_c = 4$ sous-porteuses [3]. . . . .	15
1.5	Constellation QPSK . . . . .	16
1.6	Schéma de notre modulateur OFDM. . . . .	16
1.7	Ajout de l'intervalle de garde au signal OFDM . . . . .	17
1.8	Diagramme bloc d'un système OFDM. . . . .	19
1.9	mot-code de Reed-Solomon. . . . .	20
1.10	Entrelacement par block de 48 bits. . . . .	21
1.11	Diagramme bloc du récepteur OFDM avec détection différentielle . . . . .	22
1.12	Détection différentielle dans le domaine temporel . . . . .	23
1.13	Détection différentielle dans le domaine fréquentielle . . . . .	24
1.14	Positions des pilotes de références dans le domaine du temps et de la fréquence . . . . .	25
1.15	Diagramme bloc du récepteur OFDM avec détection cohérente . . . . .	26
2.1	Schéma d'une chaîne de transmission COFDM. . . . .	29
2.2	Spectre d'un signal OFDM. . . . .	30
2.3	Constellation QPSK avant et après le canal de transmission. . . . .	31
2.4	TEB en fonction du SNR du Système COFDM Avec et sans estimation. . . . .	32

# Liste des tableaux

2.1	Paramètres du système OFDM . . . . .	30
2.2	Paramètre de la configuration. . . . .	31

# Abréviations

les abréviations les plus utilisées dans ce PFE.

<i>OFDM</i>	: Orthogonal Frequency Division Multiplexing
<i>TDMA</i>	: Time Division Multiple Access
<i>CDMA</i>	: Code Division Multiple Access
<i>WLAN</i>	: Wireless Local Area Network
<i>DAB</i>	: Digital Audio Broadcasting
<i>DVB – T</i>	: Digital Video Broadcasting-Terrestrial
<i>ADSL</i>	: Asymmetric Digital Subscriber Line
<i>BER</i>	: Bit Error Rate (la probabilité d'erreur d'un bit)
<i>dB</i>	: Décibel
<i>PAPR</i>	: Peak-to-Average Power Ratio
<i>bps</i>	: Bits per second
<i>Mbps</i>	: Mega bits per second ( $10^6$ bps)
<i>MHz</i>	: Mégahertz ( $10^6$ Hz)
<i>FFT</i>	: Fast Fourier Transform
$F_s$	: Sample Frequency
<i>HiperLAN2</i>	: High Performance Radio Local Area Network
<i>IEEE802.11a</i>	: WLAN standard (U.S.), data rate of 54 Mbps
<i>IEEE802.11b</i>	: WLAN standard (U.S.), data rate of 11 Mbps
<i>ICI</i>	: Inter-Carrier Interférence
<i>IFFT</i>	: Inverse Fast Fourier Transform
<i>IQ</i>	: Inphase Quadrature
<i>ISI</i>	: Inter-Symbol Interférence (interférence entre symboles)
<i>QAM</i>	: Quadrature Amplitude Modulation
<i>QPSK</i>	: Quadrature Phase Shift Keying
<i>SNR</i>	: Signal to Noise Ratio : rapport signal à bruit

# Introduction générale

Les systèmes de télécommunication ont atteint des développements considérables, et le besoin d'avoir des débits de transmission élevés avec une bonne qualité de transmission ne cesse de s'accroître au fil des années. De ce fait, une nouvelle technique de modulation multi-porteuses très efficace a été introduite. C'est la technique de multiplexage par division de fréquences orthogonales OFDM. Cette technique permet de réduire la bande passante en améliorant l'efficacité spectrale. Elle résiste mieux au phénomène de multi-trajets dans les canaux de communications.

Dans le cadre de notre master, notre travail va se porter sur la Modélisation et la simulation d'un système de communication multi-porteuses COFDM avec une estimation du canal de communication. Cette technique semi-aveugle envoie en temps réel une séquence d'apprentissage pour estimer le canal, et de ce fait, une égalisation au niveau de la réception permet une correction des erreurs de transmission. Notre travail a été réalisé par l'environnement Simulink Matlab.

# Chapitre 1

## Principes de base de l'OFDM et codage

### 1.1 Introduction

Les systèmes de télécommunication ont atteint des développements considérables, et le besoin d'avoir des débits de transmission élevés avec une bonne qualité de transmission ne cesse de s'accroître au fil des années. De ce fait, une nouvelle technique de modulation multi-porteuses très efficace a été introduite. C'est la technique de multiplexage par division de fréquences orthogonales OFDM. Pour que les systèmes OFDM soient les plus efficaces possible, un codage de canal correcteur d'erreur a été introduit afin de corriger les éventuelles erreurs de transmission qui sont dues aux perturbations intervenant dans le canal de communication.

Dans ce chapitre, nous allons présenter le principe de fonctionnement de l'OFDM, les différentes techniques de codage du canal et d'entrelacement. Nous allons aussi présenter la technique d'estimation du canal de communication.

## 1.2 Principes de bases de l'OFDM

### 1.2.1 La technique OFDM

Le principe de l'OFDM repose sur le multiplexage par division de fréquence FDM (Frequency Division Multiplexing) auquel on ajoute la notion d'orthogonalité permettant ainsi une amélioration considérable de l'efficacité spectrale du système.

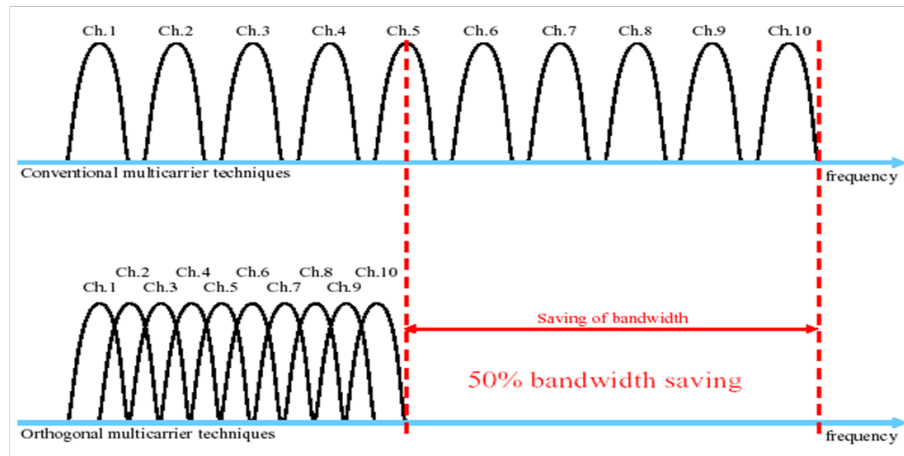


FIGURE 1.1 – Comparaison entre les spectres des signaux FDM et OFDM formé par 10 canaux [7].

Comme le montre la figure 1.1 Dans le cas classique de l'FDM, l'efficacité spectrale est limitée à cause de la bande de séparation obligatoire entre les canaux pour éliminer le phénomène d'interférence inter-canaux. Par contre, en introduisant la notion d'orthogonalité, les différentes sous porteuses synchronisées en temps et en fréquence peuvent se chevaucher dans le domaine fréquentiel sans avoir d'interférence entre porteuse ICI (Intercarrier Interference), ce qui implique une réduction de la bande de séparation et une amélioration de l'efficacité spectrale.

Le signal OFDM est détecté en utilisant la transformée de Fourier discrète DFT. La fréquence d'échantillonnage est choisie de telle sorte que les échantillons correspondent juste aux valeurs maximales des sous-porteuses. De ce fait, la région de chevauchement fréquentiel n'affecte pas le spectre vu par le récepteur, et par conséquent elle n'affecte pas la transmission OFDM comme le montre la figure 1.2 :

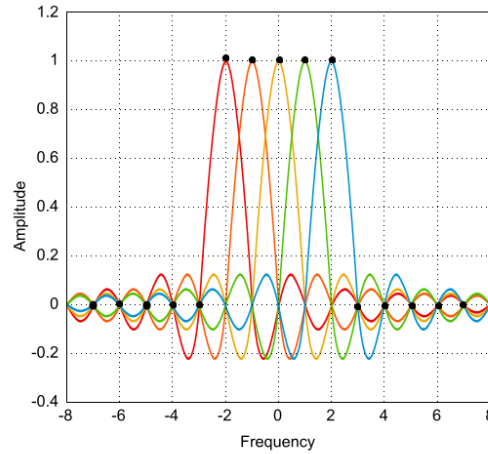


FIGURE 1.2 – Spectre d'un signal OFDM formé par 5 sous porteuses. [7]

### 1.2.2 Notion d'orthogonalité :

Un symbole OFDM  $s(t)$  s'écrit sous la forme suivante :

$$s(t) = \sum_{K=0}^{N-1} c_k e^{2j\pi k t/T} \quad (1.1)$$

Où

$c_k$  : sont les symboles de donnée.

$N$  : le nombre de sous-porteuses.

$T$  : la durée du bloc OFDM.

L'espacement entre les sous-porteuses est de  $1/T$  Hz. Ce dernier est choisi de telle sorte à rendre les sous-porteuses orthogonales entre elles. On dit que deux fonctions sont orthogonales entre elle si elles vérifient la condition suivante :

$$s(t) = 1/T \int_0^T (e^{2j\pi k_1 t/T})' (e^{2j\pi k_2 t/T}) dt = 1/T \int_0^T e^{2j\pi(k_2 - k_1)t/T} dt = \begin{cases} 1 ; k_1 = k_2 \\ 0 ; k_1 \neq k_2 \end{cases} \quad (1.2)$$

Où

$(')$  : Correspond à l'opérateur conjugué complexe.

$T$  : est la durée du symbole.

Dans le cas de l'OFDM, des fonctions orthogonales sinusoïdales représentent les sous-porteuses d'un signal OFDM réel.

$$S_k(t) = \begin{cases} \sin(2\pi k f_0 t) & 0 < t < T_{FFT} \quad k=1,2,\dots,M \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (1.3)$$

Où

$f_0$  : est l'espacement entre les sous porteuses.

$T_{FFT}$  : est la durée du symbole OFDM.

Le signal OFDM est réalisé donc à partir d'une somme de sinusoïdes, chaque sinusoïdes correspond à une sous porteuse. La fréquence, en bande de base, de chaque sous porteuse est un multiple de l'inverse de la durée du symbole OFDM, ce qui implique que chaque sous porteuse a un nombre entier de période par symbole OFDM. Cette propriété entraine la vérification de la condition d'orthogonalité entre les sous-porteuses [1].

Pour répartir les données à transmettre sur les N sous-porteuses, on groupe les symboles  $c_k$  par paquets de N. Les  $c_k$  sont des nombres complexes définis à partir des éléments binaires par une constellation souvent de modulation QPSK (Quaternary Phase Shift Keying) ou QAM (Quadrature Amplitude Modulation) à 4, 16, 64 états.

### 1.2.3 Émission et réception du signal OFDM :

La génération des signaux OFDM se fait de manière numérique. Les données émises sont transmises sur un grand nombre de sous-porteuses modulées à bas débit [2]. La figure 1.3 représente le schéma fonctionnel d'un émetteur-récepteur OFDM :

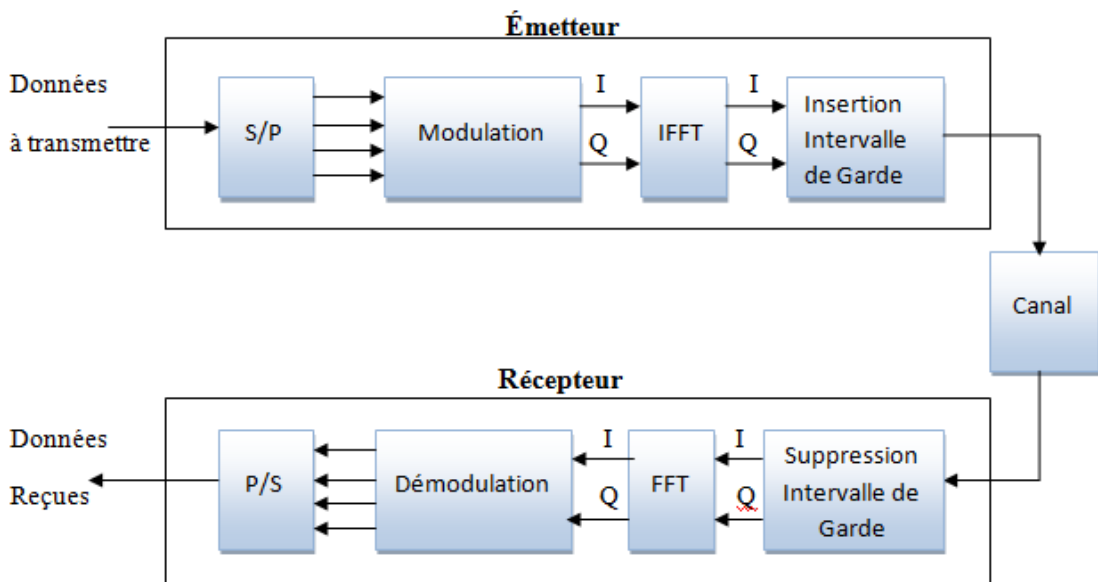


FIGURE 1.3 – Schéma fonctionnel d'un émetteur-récepteur OFDM de base



La trame du signal binaire est convertie une première fois en série/ parallèle puis modulé en symbole (amplitude et phase) qui sera transmis par chaque sous-porteuse. La sortie du modulateur est injectée au bloc modulateur OFDM qui est constitué d'un bloc qui réalise l'IFFT et l'insertion des pilotes puis d'un bloc qui ajoute un intervalle de garde au début de chaque trame. Après le passage de notre signal par le canal, le récepteur réalise l'opération inverse, il supprime l'intervalle de garde et les pilotes, démodule grâce à la FFT puis démodule une seconde fois pour avoir le signal binaire original.

### 1.2.4 Conversion série-parallèle :

La conversion série-parallèle est la première étape dans un système de transmission, elle consiste comme le montre la figure 1.4 en la conversion d'un flux de données à haut débit série sur plusieurs sous-flux à faibles taux parallèles. Chaque sous-flux est modulé par des sous-porteuses. Étant donné que le débit de symbole sur chaque sous-porteuse est nettement inférieur au débit initial, les effets des retards de propagation, à savoir l'ISI, diminue significativement.

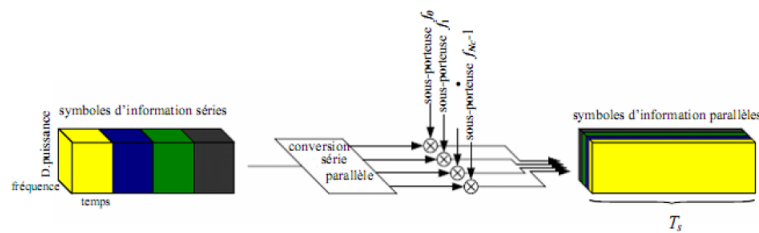


FIGURE 1.4 – Modulation multi-porteuses avec  $N_c = 4$  sous-porteuses [3].

### 1.2.5 Modulation des sous-porteuses :

Dans un système OFDM, les bits d'informations pour chaque sous-porteuse sont modulés généralement par la modulation QPSK ou QAM. On peut augmenter le débit binaire en augmentant le nombre d'états dans une constellation, entraînant ainsi une diminution de distance entre les points de la constellation, ce qui accroît la sensibilité du système au bruit [4]. Les sous porteuses sont modulées grâce à des nombres complexes représentés par un vecteur IQ dans la constellation. Les deux parties réelle et imaginaire des symboles sont déphasées de  $90^\circ$  :

$$S(t) = I(t)\cos(\omega t) + Q(t)\sin(\omega t) \quad (1.4)$$

La Figure 1.5 représente une constellation à quatre états d'une modulation QPSK où chaque symbole de la constellation contient deux bits d'informations.

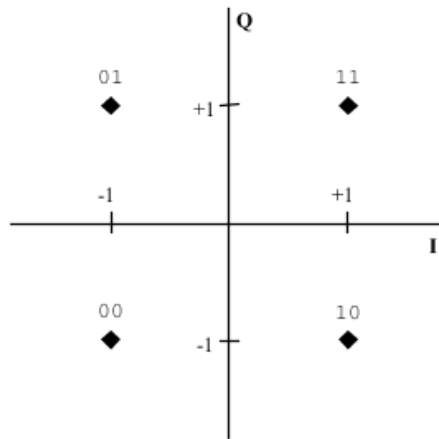


FIGURE 1.5 – Constellation QPSK

### 1.2.6 Génération des sous-porteuses :

Après avoir modulé les symboles d'information, la sortie du modulateur est injectée au bloc modulateur OFDM. Comme le montre la figure 1.6, le modulateur est constitué d'un bloc de conversion série parallèle, puis d'un autre bloc qui ajoute 4 pilotes. On utilisera l'insertion des quatre porteuses pilotes pour résoudre les problèmes de décalage en fréquence et de synchronisation [5]. On complète les sous-porteuses non utilisées par des zéros de sorte à avoir un nombre égale a une puissance de 2 à l'entrée d'IFFT. Après, on applique transformée de Fourier inverse IFFT pour générer les sous-porteuses. A la sortie de l'IFFT, on réalise une conversion parallèle / série.

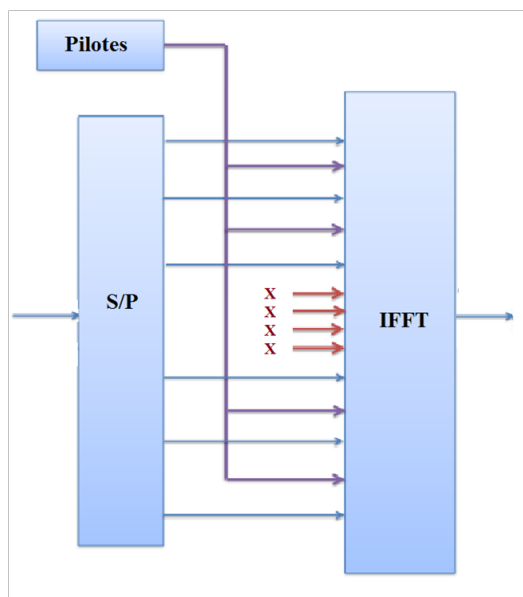


FIGURE 1.6 – Schéma de notre modulateur OFDM.

### 1.2.7 Intervalle de garde :

Une des raisons importantes pour laquelle on utilise la modulation OFDM est sa robustesse face aux problèmes de transmission dans un environnement à trajets multiples. Pour éliminer les interférences inter symboles (ISI), un intervalle de garde est rajouté pour chaque symbole OFDM. On choisit la durée de l'intervalle de garde de telle sorte qu'elle soit supérieure au retard maximal causé par les trajets multiples et qu'un symbole ne puisse pas interférer avec le prochain symbole [6], [7].

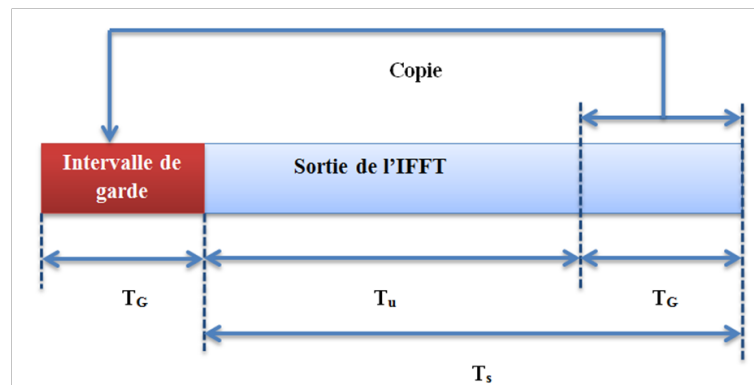


FIGURE 1.7 – Ajout de l'intervalle de garde au signal OFDM

La Figure 1.7 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 sont la copie exacte des derniers échantillons du symbole 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 [8].

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

$$T_S = T_g + T_u \quad (1.5)$$

Où

$T_g$  : Durée de l'intervalle de garde.

$T_u$  : Durée du symbole OFDM après l'IFFT.

### 1.2.8 canal radio mobile

La connaissance et la compréhension des caractéristiques du support de communication est indispensable pour aborder des travaux dans ce domaine. Les canaux radio mobiles sont considérés en particulier comme étant des canaux souffrant de nombreuses imperfections comme le multi-trajet, l'effet Doppler, l'atténuation par parcours (Path Loss) et l'effet de masque (Shadowing). Ces facteurs perturbateurs peuvent affecter les informations transmises. Le signal reçu sera donc la somme de répliques atténuées, réfléchies, réfractées et diffractées du signal transmis. Donc l'optimisation de notre système de communication en prenant en compte ces imperfections devient vraiment primordiale [1].

Dans le canal radio mobile, le signal transmis souffre de plusieurs effets, à savoir les Multi-trajets, l'effet Doppler, les atténuation par parcours (Path Loss) ainsi que l'effet de masque (Shadowing).

## 1.3 Codage de canal dans un système OFDM

### 1.3.1 Codage du canal

Les imperfections de tout système de communication jumelées aux imperfections des canaux de communication utilisés induisent des erreurs de transmission que le codage de canal s'efforce de combattre. Actuellement, tous les systèmes OFDM utilisent un codage correcteur d'erreurs pour diminuer le taux d'erreur du signal transmis et de ce fait pour améliorer les performances du système. Une augmentation de la puissance du signal transmis ou du signal sur bruit (SNR) réduit généralement le taux d'erreurs par bit et peut rendre l'information reçue utile. Les conséquences économiques d'une telle approche sont coûteuses. Il est donc important d'utiliser le principe de codage correcteur d'erreurs qui fournit une solution plus acceptable à ce problème [9], [10].

Le but du codage de canal est de protéger le message contre les perturbations du canal, et cela, en introduisant une redondance à l'information utile dans le message à transmettre. La redondance et l'information utile sont liées par des algorithmes bien spécifiques. A la réception, le décodeur de canal exploite la redondance produite par le codeur dans le but de détecter, puis de corriger si c'est possible les erreurs introduites lors de la transmission. Le codage convolutif et le codage par bloc sont le plus souvent utilisés pour la correction d'erreurs. Ce point sera détaillé encore plus dans les sections suivantes.

La figure 1.8 illustre le diagramme bloc du système OFDM. On y retrouve des modules qui sont utilisés pour la réalisation de différents systèmes de communication numérique. Les paramètres de chaque module de la figure 1.8 seront fixés en accord avec la norme de IEEE802.11a qui définit les spécifications du système OFDM pour les communications sans fil.

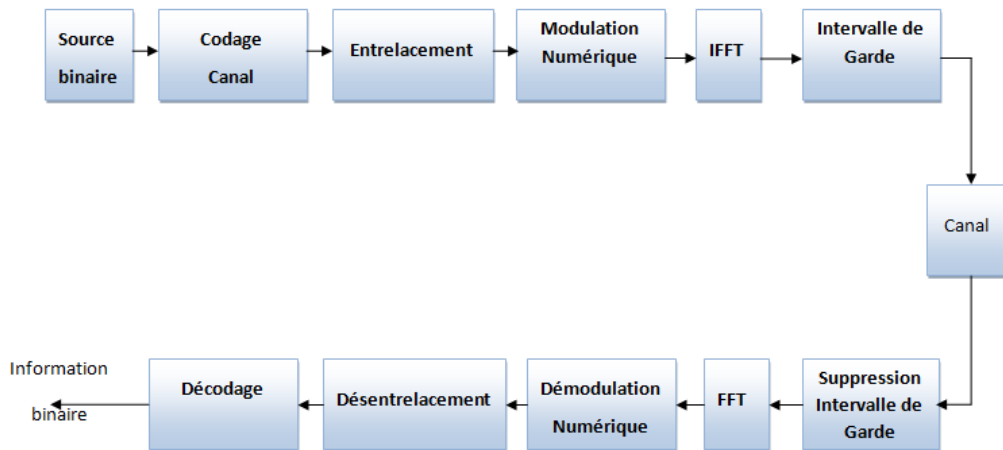


FIGURE 1.8 – Diagramme bloc d'un système OFDM.

### 1.3.2 Code en bloc (RS)

Un code en bloc formé de  $k$  bits d'information en  $n$  symboles, où  $n$  est plus grand que  $k$ . Le but d'ajouter  $(n-k)$  bits de parité est d'augmenter la distance minimale Hamming  $d_{min}$ , qui mesure la différence entre les deux mots de code les plus similaires.

Pour une distance minimale Hamming  $d_{min}$ , le code peut corriger  $t$  erreurs, cette distance peut être représentée comme suit :

$$d_{min} \leq (2t) + 1 = (n - k) + 1 \quad (1.6)$$

Un code en bloc permet de corriger une ou plusieurs erreurs dans un mot-code en ajoutant aux informations des symboles redondants, autrement dits, des symboles de contrôle. Le code de Reed-Solomon représente le meilleur compromis entre le nombre de symboles de parité ajoutés aux informations et la difficulté de codage.

#### Code de Reed-Solomon (RS)

Les codes de Irving S.Reed et Gustave Solomon sont les codes en bloc les plus populaires. Ces codes correcteurs d'erreurs sont basés sur les corps de Galois. Les champs de Galois finis sont des ensembles d'éléments fermés sur eux-mêmes. Le codeur prend  $k$  symboles de donnée et ajoute après l'information des symboles de contrôle pour construire  $n$  symboles, ce qui

donne  $n-k$  symboles de contrôle. Le décodeur peut corriger au maximum  $t$  symboles, ou  $2t=n-k$ .

Le diagramme ci-dessous montre une trame constituée avec le codeur Reed-Salomon :

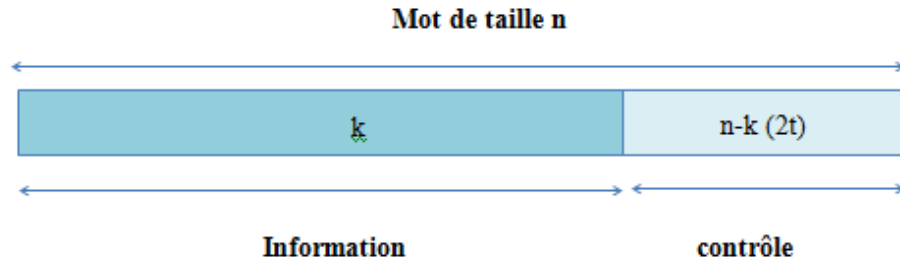


FIGURE 1.9 – mot-code de Reed-Solomon.

La longueur maximale d'un code de Reed-Solomon est définie comme :

$$n = k + 2t = 2^s - 1 \quad (1.7)$$

Avec :

$n$  : Longueur du bloc RS.

$k$  : nombre de symboles d'information.

$2t$  : nombre de symboles de contrôle.

$s$  : nombre de bits par symbole.

On note un codage de Reed-Solomon RS ( $n, k$ ) ou RS ( $n, k, t$ )

Le décodeur traite chaque bloc et corrige les éventuelles erreurs. A la fin de ce traitement, les données originale seront restaurées.

Grâce à un ajout de redondance, ces codes permettent de corriger deux types d'erreurs :

- les erreurs induisant une modification des données ;
- les erreurs provoquant des pertes d'informations.

### 1.3.3 Entrelacement

Dans le système de communication qui utilise l'OFDM et pour un canal radio mobile, l'évanouissement profond dans le spectre de fréquences peut rendre des groupes de sous porteuses moins fiables que d'autres. Ceci génère des erreurs dites par paquets au lieu d'être aléatoirement dispersées.

La plupart des codes correcteurs d'erreurs sans voie de retour ne peuvent être utilisés avec des paquets d'erreurs. Donc la technique d'entrelacement par bloc fonctionne sur un bloc entier de bits en même temps. Les bits codés sont permutés d'une certaine manière tel que les bits adjacents soient séparés par plusieurs bits non erronés après l'entrelacement. Cela implique une répartition des erreurs de façon aléatoire et donc une facilitation de la correction d'erreur par le décodage.

La figure 1.10 montre un entrelacement par bloc d'une matrice de taille 6\*8. La profondeur de l'entrelaceur est de 48 bits :

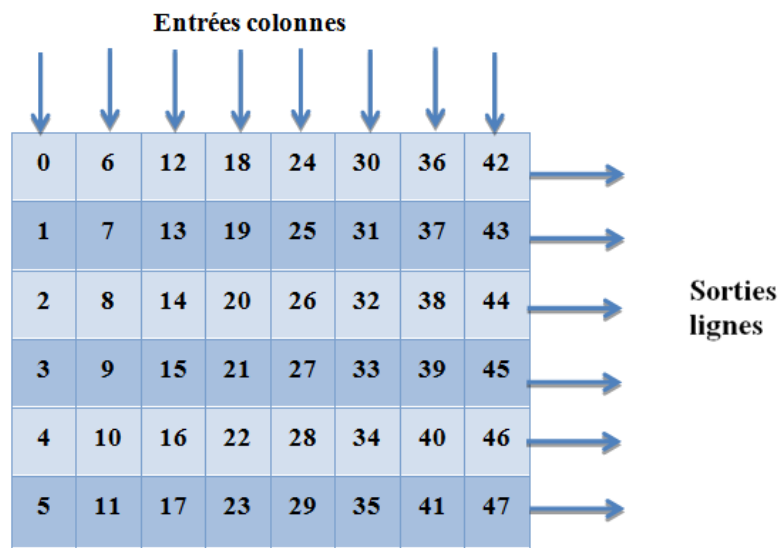


FIGURE 1.10 – Entrelacement par block de 48 bits.

## 1.4 Estimation de canal

Dans le système OFDM, considéré dans cet ouvrage, les bits d'informations sont modulés en QPSK ou en MQAM. Pour estimer les bits au récepteur, il faut connaître à l'avance l'amplitude et la phase de chaque point de la constellation. Chaque sous-porteuse qui arrive au récepteur n'a pas la phase et l'amplitude qu'elle avait à l'émetteur. La phase et l'amplitude de la constellation sont modifiées à cause du décalage de fréquence, décalage dans le temps, et de l'évanouissement sélectif. Pour faire face à ces variations de phases et amplitudes inconnues, il existe deux approches différentes. La modulation différentielle et la démodulation cohérente. La détection différentielle est moins compliquée au récepteur que celle de la détection cohérente. Elle est souvent utilisée dans les systèmes de communications sans fil. Dans cette technique, l'information est codée dans la différence entre deux symboles consécutifs et il n'est pas nécessaire de connaître des valeurs de références pour déterminer l'amplitude et la phase. Dans la détection cohérente, l'amplitude et la phase sont estimés pour avoir la meilleure région de décision dans la constellation pour chaque sous-porteuse. En utilisant cette méthode il faut faire face à deux problèmes. Premièrement, comment il faut transmettre les valeurs des références, que l'on nomme pilote. Deuxièmement, la réalisation d'un estimateur à la réception avec une bonne performance et moins de complexité.

### 1.4.1 Modulation différentielle

Dans la modulation différentielle on utilise à la réception, la détection différentielle. Un bloc pour la détection est ajouté au récepteur avant la démodulation MQAM ou QPSK, comme le montre la figure 1.11.

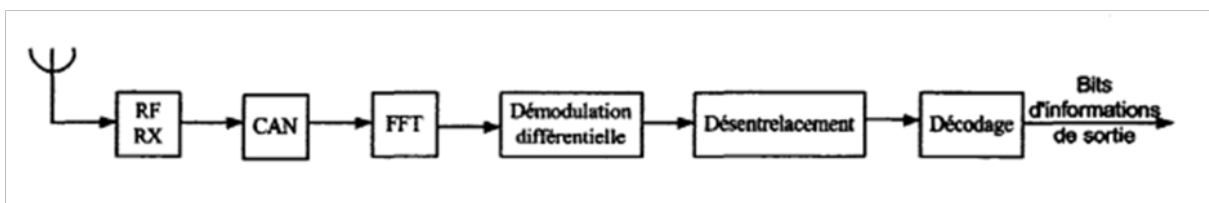


FIGURE 1.11 – Diagramme bloc du récepteur OFDM avec détection différentielle

Dans la détection différentielle on a besoin des valeurs des références, et aussi d'appliquer des méthodes pour estimer le canal. Dans ce cas, on peut appliquer deux méthodes seulement la détection différentielle dans le domaine du temps et dans le domaine de la fréquence.



### différentielle dans le domaine du temps

La détection différentielle dans le domaine du temps consiste à comparer chaque symbole numérique de chaque sous-porteuse du symbole OFDM présent, au symbole numérique de la même sous-porteuse du symbole OFDM précédent, tel qu'illustré par la figure 1.12. Pour que la détection différentielle soit possible, il faut ajouter un codage différentiel à l'émetteur avant la modulation numérique. D'après (Nee & Prasad, 2000)[4], pour un PSK, les phases différentielles codées sont :

$$\Phi_{i,j} = \sum_{k=0}^j \phi_{i,j} \text{mod}(2\pi) \quad (1.8)$$

où  $i$  et  $k$  sont les numéros du symbole OFDM,  $j$  est le numéro de sous-porteuses, et  $\phi_{i,j}$  la phase initiale du signal PSK.

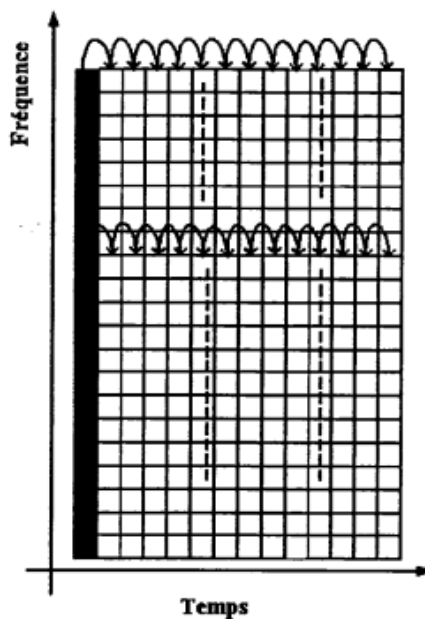


FIGURE 1.12 – Détection différentielle dans le domaine temporel

### Détection différentielle dans le domaine de la fréquence

La détection différentielle dans le domaine de la fréquence consiste à comparer chaque sous-porteuse à la sous-porteuse précédente dans le même symbole d'OFDM, tel qu'illustré dans la figure 1.13. Pour que la détection différentielle soit possible, il faut ajouter un codage différentiel à l'émetteur avant la modulation numérique. D'après (Nee & Prasad, 2000)[4], pour une

modulation PSK, les phases différentielles codées sont :

$$\Phi_{i,j} = \sum_{k=0}^j \phi_{i,j} \text{mod}(2\pi) \quad (1.9)$$

où  $i$  et  $k$  sont les numéros des sous-porteuses dans un symbole OFDM,  $j$  est le numéro de symbole OFDM, et  $\phi_{i,j}$  la phase initiale du signal PSK.

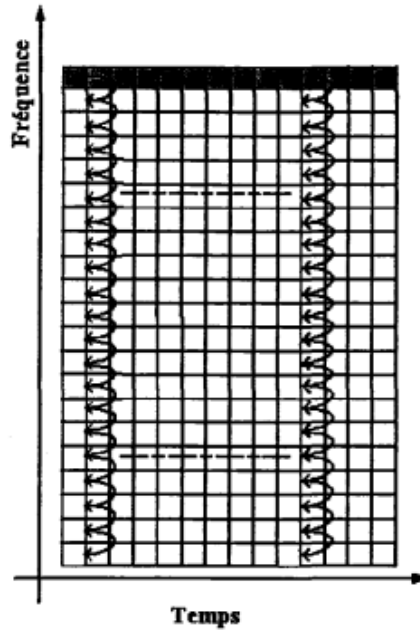


FIGURE 1.13 – Détection différentielle dans le domaine fréquentielle

### 1.4.2 Les pilotes

Dans l'estimation du canal en général on utilise des pilotes comme références. Les pilotes d'informations doivent être transmis régulièrement pour atténuer l'erreur de propagation. Dans le système d'OFDM le concept des pilotes est d'envoyer des symboles numériques connus sur des sous-porteuses à des instants prédéfinis. L'insertion des pilotes se fait d'après les critères suivants. Premièrement, il faut choisir quelle modulation numérique doit être utilisée pour envoyer des pilotes quand on connaît à l'avance leurs valeurs. Deuxièmement, il faut savoir comment envoyer les pilotes dans un symbole OFDM. Pour ceci, la figure 1.14 illustre trois emplacements possibles des pilotes suivant l'axe de temps et l'axe de fréquence.

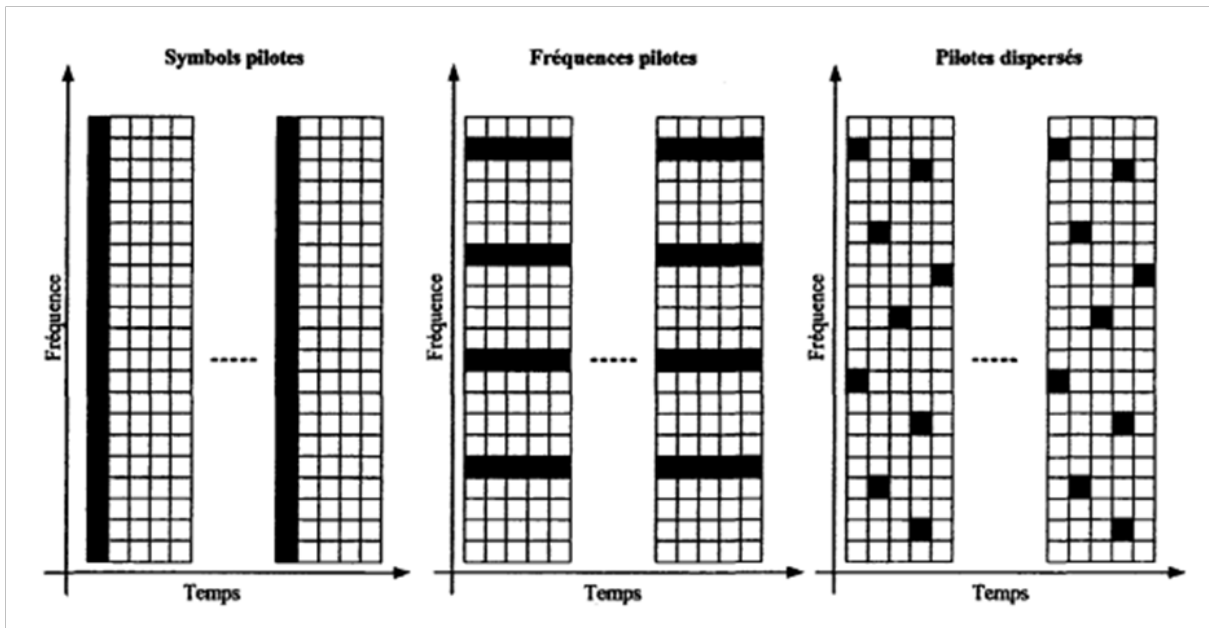


FIGURE 1.14 – Positions des pilotes de références dans le domaine du temps et de la fréquence

Les symboles pilotes forment une trame de symboles numériques connus. Les symboles pilotes donnent une évaluation du canal à tous les sous-canaux (sous-porteuses). Cette estimation sera réservée jusqu'à ce que le second symbole de pilote soit transmis. Les fréquences pilotes utilisent certaines sous-porteuses dans le symbole OFDM pour transmettre des informations connues. Dans le cas de pilotes dispersés, les informations connues sont dispersées dans le domaine du temps et de la fréquence. Ceci exige une interpolation dans le domaine temporelle et dans celui de la fréquence.

### 1.4.3 Détection cohérente

La démodulation cohérente ou la détection cohérente est illustrée par la figure 1.15. Cette figure montre les blocs utilisés dans un récepteur cohérent d'OFDM. On sait que le FFT est utilisée pour démoduler les  $N$  sous-porteuses dans un symbole OFDM. A la sortie on obtient les  $N$  valeurs complexes qui représentent les symboles numériques qui ont été modulés par le modulateur MQAM ou QPSK. Ces symboles numériques contiennent des phases aléatoires décalées et des variations d'amplitudes provoquées par le canal à trajets multiples, par les oscillateurs et le décalage du temps. Le rôle de la technique d'estimation du canal  $c$  est de calculer les phases et amplitudes de toutes les sous-porteuses, pour faciliter au démodulateur MQAM ou QPSK la tâche de générer les bons bits.

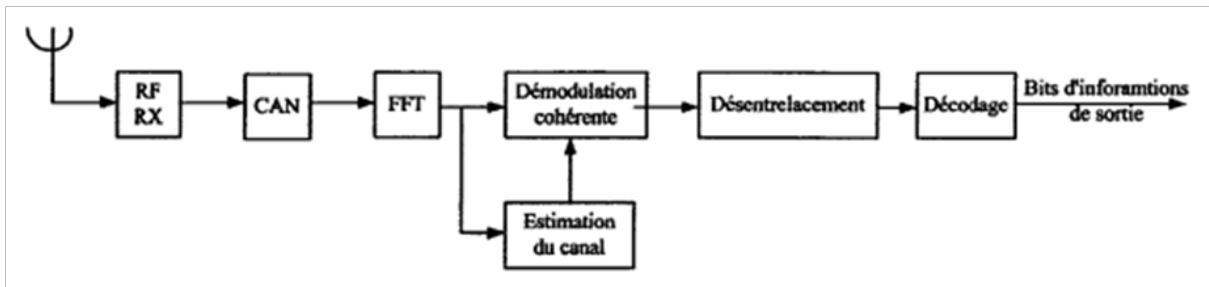


FIGURE 1.15 – Diagramme bloc du récepteur OFDM avec détection cohérente

Il existe plusieurs méthodes pour l'estimation du canal. Parmi ces méthodes on a l'estimation du canal à deux dimensions, et l'estimation du canal à une seule dimension. Ces méthodes sont utilisées dans des systèmes à transmission continue comme les systèmes de radiodiffusion numérique et la diffusion vidéo numérique. En effet ces méthodes utilisent des pilotes dispersés sur plusieurs symboles OFDM, ce qui introduit des délais sur plusieurs symboles avant que le premier symbole soit estimé. Ce genre de délai est indésirable dans la transmission par paquet. La technique utilisée dans ce cas exige d'envoyer des symboles pilotes après chaque paquet transmis. Pour l'estimation du canal dans des systèmes de transmission par paquets, l'approche la plus appropriée est l'utilisation d'un ou plusieurs symboles connus au début de chaque paquet (symboles pilotes) puis après l'utilisation des fréquences pilotes. Les symboles connus utilisés au début de chaque paquet sont utilisés pour l'estimation du canal et pour le décalage de fréquence. Les fréquences pilotes sont utilisées dans les systèmes de réseaux sans fils, tel que défini par le standard IEEE802.11 a. Ceci permet de rendre la détection cohérente robuste contre le bruit de phase et le décalage en fréquence. D'après IEEE 802.11a les fréquences pilotes utilisées sont modulées en BPSK par une séquence binaire pseudo-aléatoire pour éviter la génération des raies spectrales. La seule chose qui reste à déterminer dans l'estimation du canal pour les systèmes des réseaux sans fils est le nombre de symboles pilotes pour chaque paquet. Deux symboles pilotes sont utilisés pour estimer le canal et la fréquence de décalage et quatre fréquences pilotes dans chaque symbole OFDM. Chaque sous-porteuse qui est à bande étroite (312.5 KHz), subit un évanouissement plat et peut être écrit sous la forme suivante :

$$S(n) = H(n)d(n) + N(n) \quad (1.10)$$

où  $S(n)$  est la sous-porteuse reçue,  $H(n)$  est la réponse impulsionnelle du canal,  $d(n)$  est la donnée transmise et  $N(n)$  est le bruit. L'estimation du canal  $H(n)$  est donnée par la formule suivante :

$$\hat{H}(n) = \frac{S(n)}{d(n)} \quad (1.11)$$

## 1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une étude détaillée sur le principe de fonctionnement d'un système OFDM ainsi que les différents codes correcteurs d'erreurs, et plus précisément le codage convolutif, le codage Reed-Solomon ainsi que la technique d'entrelacement.

Ce chapitre passe en revue les différentes stratégies d'estimation de canal à l'aide des symboles pilotes dans les systèmes OFDM. Il décrit trois types d'arrangements des symboles pilotes dans la grille temps-fréquence.

# Chapitre 2

## Modélisation et simulation

### 2.1 Introduction

Ce chapitre présente la modélisation et la simulation du système de transmission COFDM avec estimation de canal (transmission semi-aveugle). Le travail a été réalisé en utilisant l'environnement Simulink Matlab. Une analyse et une évaluation des performances du système COFDM sans et avec estimation du canal ont été faite, et ce, en traçant la variation du BER en fonction du SNR.

## 2.2 Chaîne de transmission COFDM avec estimation

Le modèle du système COFDM, utilisé dans notre simulation, est le même que celui utilisé dans le cadre du projet de fin d'étude. On ajoute à ce modèle un bloc réalisant une estimation du canal. Le modèle est basé donc sur les paramètres spécifiés par la norme IEEE802.11a. Cette norme est adoptée par plusieurs systèmes de communications. L'implémentation de ce système est réalisée par l'utilisation des différents blocs disponibles dans la Library simulink Matlab. Cette riche Library fournit les différents blocs pour réaliser le modèle COFDM. Toutefois le choix de blocs réels et leurs paramètres a été une tâche assez complexe.

La chaîne de transmission COFDM avec estimation du canal est illustrée par la figure 2.1 :

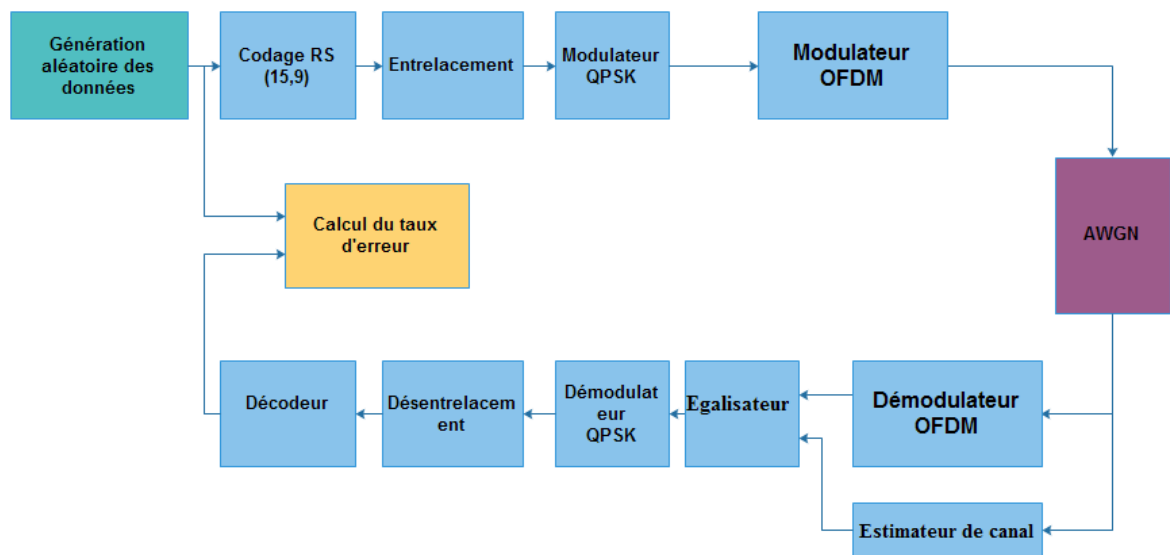


FIGURE 2.1 – Schéma d'une chaîne de transmission COFDM.

## 2.3 Simulations et Résultats :

Nous avons implémenté la chaîne de transmission COFDM avec estimation du canal par l'utilisation des blocs disponible dans la library Simulink Matlab.

Les paramètres du système OFDM utilisés dans notre simulation sont représentés dans Le tableau 2.1.

Paramètre	Valeur
Nombre de sous-porteuses données	48
La taille de l'IFFT	64
Taille de l'Intervalle de garde	1/4
Taux de codage	1/2
Nombre de sous-porteuses pilotes	4

TABLE 2.1 – Paramètres du système OFDM

La visualisés, après le bloc de l'IFFT , du spectre du signal COFDM avec estimation est représenté par la figure 2.2. On constate que la forme de se spectre est conforme avec celui donné par la théorie. On remarque aussi que ce spectre est constitué de 64 sous-porteuses dont 4 sous-porteuses pilotes (Tableau 2.1), ajouté pour résoudre les problèmes de décalage en fréquence et de synchronisation, sur une bande de fréquence de 20 MHz.

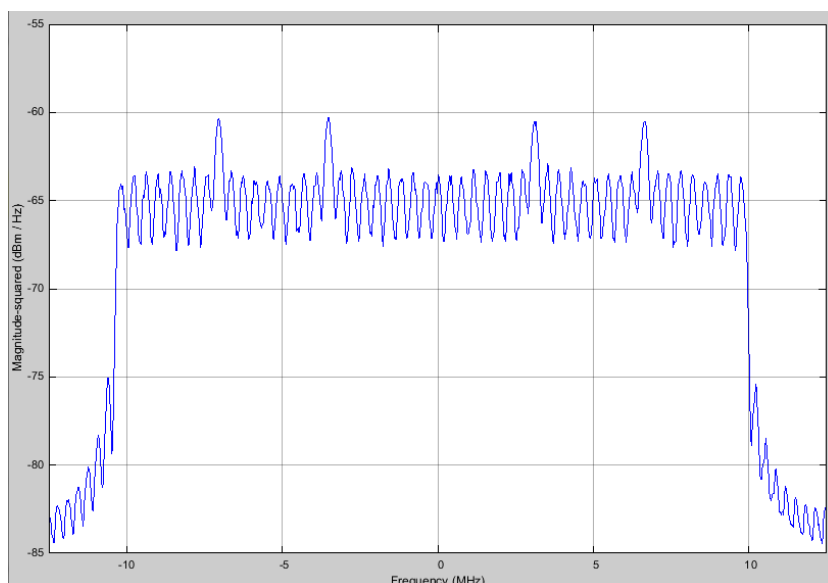


FIGURE 2.2 – Spectre d'un signal OFDM.



Le constellation de la modulation pour un SNR égale à 20 dB est visualisées par les figures 2.3. On constate que l'effet du bruit AWGN, qui modifie clairement les constellations, est visible a la réception (figure 2.3(b)).

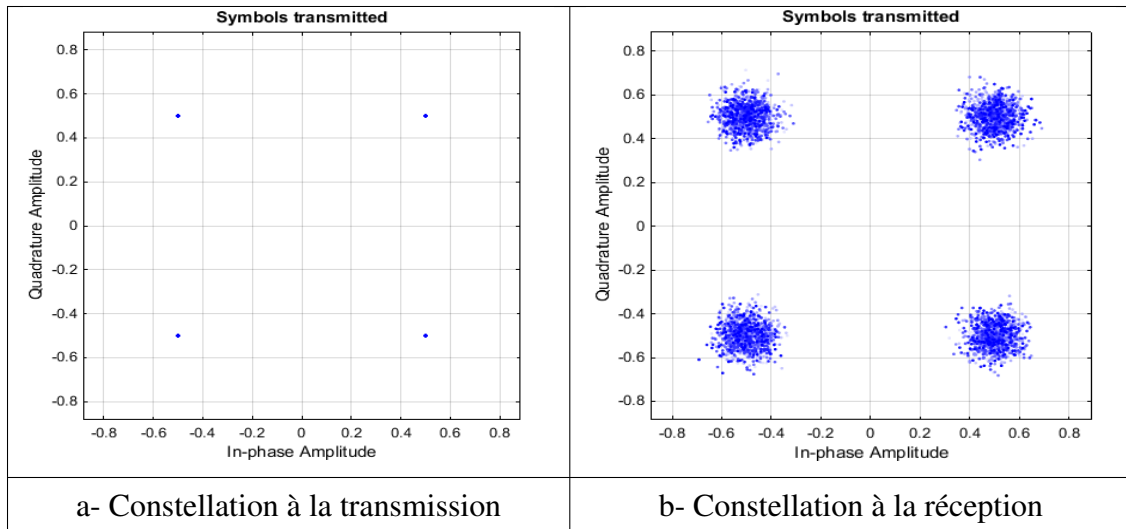


FIGURE 2.3 – Constellation QPSK avant et après le canal de transmission.

Les paramètres du système COFDM utilisés pour cette configuration sont présentés dans le tableau 2.2 :

Paramètre	Valeur
Nombre de sous-porteuses données	48
La taille de l'IFFT	64
Taille de l'Intervalle de garde	1/4
Nombre de sous-porteuses pilotes	4
Type de codage	RS(15,9)
Types de modulation des sous-porteuses	QPSK
Fréquence $F_s = \frac{1}{T}$	20 Mhz
Canal	AWGN

TABLE 2.2 – Paramètre de la configuration.

La variation du taux d'erreur par bit (BER) en fonction du rapport signal/bruit SNR pour un système COFDM avec et sans estimation est illustrée par la figure 2.4 :

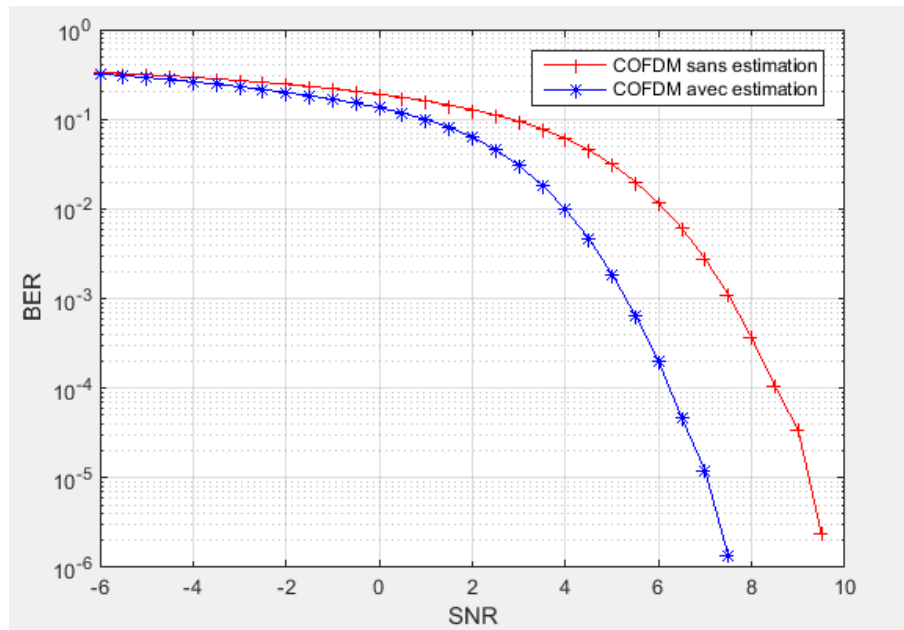


FIGURE 2.4 – TEB en fonction du SNR du Système COFDM Avec et sans estimation.

On constate, d'après la simulation du système COFDM avec et sans estimation ( voir figure 2.4) , que les performances obtenues sont en conformité avec la théorie. En effet, on remarque que le système avec estimation présente de meilleurs résultats comparés au système sans estimation. Cela est due au fait que l'estimation qui est une technique semi-aveugle, envoi une séquence d'apprentissage (pilotes) pour estimer le canal , et de se fait peut faire une égalisation des symbole transmis.

## 2.4 Conclusion

Ce travail présente la modélisation et la simulation du système de transmission COFDM avec et sans estimation de canal. Le travail a été réalisé en utilisant l'environnement Simulink Matlab. Une nouvelle technique qui améliore les performances du système COFDM a été introduite. C'est la transmission semi-aveugle. Cette technique diminue de ce fait la probabilité d'erreurs à la réception. Par contre elle présente aussi un inconvénient. C'est ça complexité de réalisation.

# Conclusion générale

Ce master a été consacré à la modélisation d'une chaîne de transmission COFDM utilisant l'estimation du canal (transmission semi-aveugle). La simulation respectant la norme IEEE 802.11a ont été réalisées sous l'environnement Simulink Matlab. Pour ce faire, nous avons commencé notre travail par donner une description détaillée du principe de fonctionnement d'un système OFDM puis, par les différents types de codage et d'entrelacement utilisés dans les systèmes COFDM ainsi que cette technique d'estimation.

Nous avons constaté que l'introduction de l'estimation dans le système COFDM améliore de façon significative les performances du système. Cette dernière réduit la probabilité d'erreur et de ce fait est très efficace. L'inconvénient que présente cette technique de transmission semi-aveugle est sa complexité de réalisation.

# Bibliographie

- [1] Y. BEN HAMIDOUCHE, "*Etude d'un système OFDM codé pour les applications à haut débit* .", PFE, ENP Alger. 2014.
- [2] A. EL KHETTABI, "*Conception du système de transmission OFDM codé pour les applications à haut débit* ", Mémoire de maîtrise e électronique, Université de Québec, Ecole de Technologie Supérieure, 2008.
- [3] S. Kaiser et K. Fazel, "*Multi-carrier and spread spectrum systems : From OFDM and MCCDMA to LTE and WiMAX*", deuxième édition, Wiley, G Bretagne, 2008.
- [4] R. V. Nee & R. Prasad, "*OFDM for Wireless Multimedia Communications*", Artech House-Publishers, 2000.
- [5] Kai-Uwe Schmidt, Markus Muck, Jens Schoenthier, and Marc de Courville, "Time or Frequency Domain Pilots for Channel Tracking in Wireless OFDM Systems ?" In International OFDM Workshop, Dresden, Germany, September 2004.
- [6] W. Henkel, G. Taubock, P. Odling, 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.
- [7] B. Muquet, M. DeCourville, P. Duhamel, G. B. Giannakis, "*OFDM with Trailing Zeros 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.
- [8] Stefan Muller-W, "*OFDM for Wireless Communications : Nyquist Windowing, Peak-Power Reduction and Synchronization*", Shaker Verlag, 2000.
- [9] Dib ROGER, "*Conception et validation d'un simulateur de système OFDM pour les réseaux intérieurs sans ?l*", Mémoire de maîtrise électronique, Université de Québec, Ecole de Technologie Supérieure, 2003.
- [10] P. Elias, "*Coding for Noisy Channels* ", IRE conv. Rec., vol. 3, pt. 4, pp. 37-46, 1955.