

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

---

# Concaténation série des codes RS et convolutifs dans un système COFDM

---

**Nassim Abdeldjalil CHAIB**

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

---

# Concaténation série des codes RS et convolutifs dans un système COFDM

---

**Nassim Abdeldjalil CHAIB**

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:

عرفت أنظمة الاتصال تقدما كبيرا، والحاجة لتدفق عالي مع الحفاظ على إرسال ذو جودة عالية لا تزال في تزايد مستمر. ولذلك تم إدخال تقنية التوزيع متعددة الحوامل جد فعالة في حماية القنوات متعددة المسالك . تعرف هذه التقنية بنظام توزيع متعدد الحوامل المتعامدة (OFDM).

وخصص هذا العمل إلى تصميم نموذج محاكاة لسلسلة الإرسال COFDM. مع الاستعمال في الترميز تسلسل سلسلة من الترميز RS و الترميز convolutifs. أجريت محاكاة نظام COFDM مع أخذ بالاعتبار المعيار IEEE 802.11a .

**كلمات مفتاحية:** نظام توزيع متعدد الحوامل المتعامدة (OFDM) ، القنوات متعددة المسالك ، نظام الترميز .

## Abstract:

The telecommunications systems have achieved considerable development, and the need for high transmission rates with good quality continues to increase over the years.

Therefore, a very efficient technique of multi-carrier modulations providing strong protection for multipath channels was introduced. It is the OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

This work was devoted to modeling and simulation of a COFDM transmission chain using as coding a serial concatenation of RS and convolution codes. The simulation of the COFDM system was set up following the IEEE 802.11a standard.

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

## Résumé :

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 technique de modulations multi-porteuses très efficace offrant une forte protection pour les canaux à trajets multiples a été introduite. C'est l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

Ce travail a été consacré à la modélisation et à la simulation d'une chaîne de transmission COFDM en utilisant comme codage une concaténation série des codes RS et convolutifs. La simulation du système COFDM a été réalisée en respectant la norme IEEE 802.11a.

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

# Dédicace

*" Je dédie ce travail à toute ma famille. À mes chers parents pour tous leurs sacrifices consentis pour mon éducation et ma formation, sans eux je ne serais jamais arrivé à ce niveau. À mon frère et ma sœur pour leurs précieux soutiens et encouragements. À tous mes amis et camarades, à toutes les personnes qui m'ont enseigné tout au long de mon parcours. À tous ceux que je n'ai pas cités et que je n'oublierai jamais leurs soutiens et leurs aides."*

*-Nassim Abdeldjalil CHAIB.*

# 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 Émission et réception du signal OFDM : . . . . .	14
1.2.3 Modulation des sous-porteuses : . . . . .	15
1.2.4 Génération des sous-porteuses : . . . . .	16
1.2.5 Intervalle de garde : . . . . .	17
1.2.6 canal radio mobile . . . . .	18
1.3 Codage de canal dans un système OFDM . . . . .	18
1.3.1 Le codage convolutif : . . . . .	19
1.3.2 Code en bloc (RS) . . . . .	21
1.3.3 Entrelacement . . . . .	23
1.3.4 Concaténation série des codes RS et convolutifs . . . . .	24
1.4 Conclusion . . . . .	25
<b>2 Modélisation et simulation</b>	<b>26</b>
2.1 Introduction . . . . .	26
2.2 Chaîne de transmission COFDM avec estimation . . . . .	27
2.3 Simulations et Résultats : . . . . .	27
2.4 Conclusion . . . . .	31

<b>Conclusion générale</b>	<b>32</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>33</b>



# Table des figures

1.1	Comparaison entre les spectres des signaux FDM et OFDM formé par 10 canaux [1]. . . . .	12
1.2	Spectre d'un signal OFDM formé par 5 sous porteuses. [1] . . . . .	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	Code de convolutif [10]. . . . .	20
1.10	exemple d'un codeur convolutionnel avec un taux de codage $R = 1/2$ . . . . .	20
1.11	Représentation en treillis du code convolutif. . . . .	21
1.12	mot-code de Reed-Solomon. . . . .	22
1.13	Entrelacement par block de 48 bits. . . . .	23
1.14	Récupération de l'information grâce à un codage OFDM avec entrelacement. .	24
1.15	Récupération de l'information grâce à un codage OFDM avec entrelacement. .	24
2.1	Schéma d'une chaine de transmission COFDM. . . . .	27
2.2	Spectre d'un signal OFDM. . . . .	28
2.3	Constellation QPSK avant et après le canal de transmission. . . . .	28
2.4	TEB en fonction du SNR du Système COFDM Avec et sans codage concaténé.	29

# Liste des tableaux

2.1	Paramètres du système OFDM . . . . .	28
2.2	Paramètre de configuration . . . . .	29

# 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 concaténation série des codes RS et convolutifs. Cette technique est utilisée dans divers systèmes de communications tels que les modem ADSL, modem satellite IDR/SMS, DVB-S, etc ). Dans cette technique, le codage Reed-Solomon, renforcé par un entrelaceur est accompagné d'un codeur convolutif. 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 de concaténation série des code RS et convolutifs.

## 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.

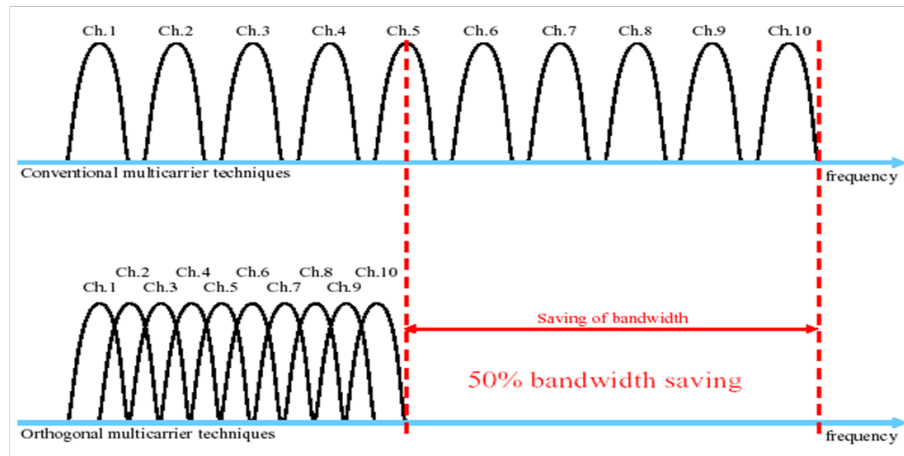


FIGURE 1.1 – Comparaison entre les spectres des signaux FDM et OFDM formé par 10 canaux [1].

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 :

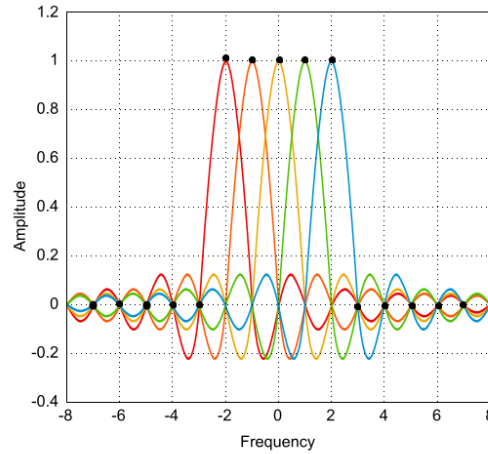


FIGURE 1.2 – Spectre d'un signal OFDM formé par 5 sous porteuses. [1]

### Notion d'orthogonalité :

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

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

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 :

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

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.

### 1.2.2 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 :

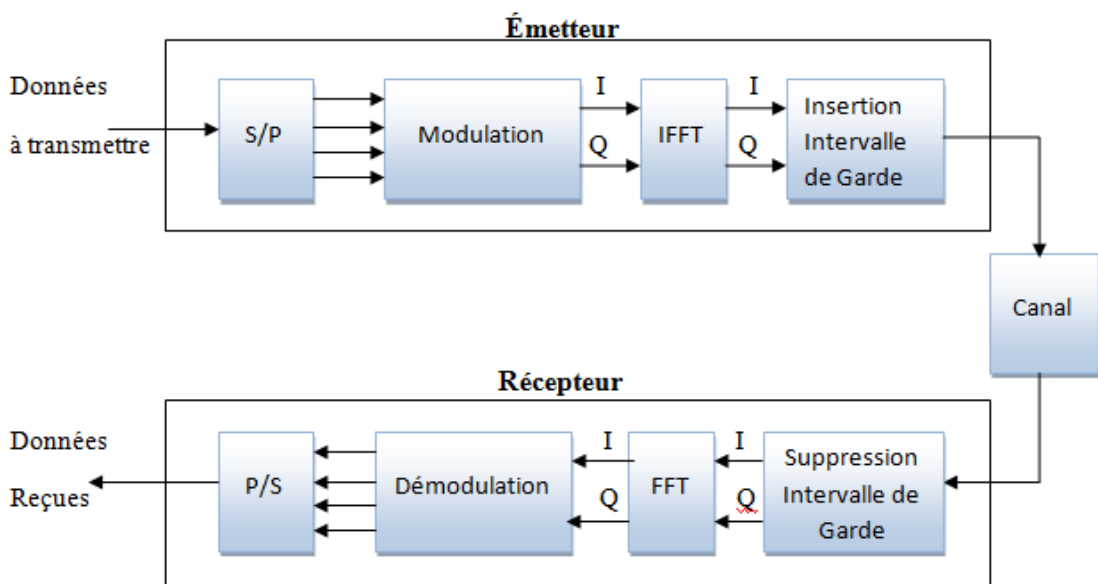


FIGURE 1.3 – Schéma fonctionnel d'un émetteur-récepteur OFDM de base



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.

### 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.

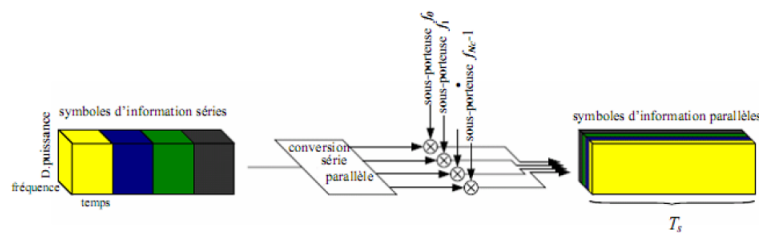


FIGURE 1.4 – Modulation multi-porteuses avec  $N_c = 4$  sous-porteuses [3].

### 1.2.3 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 ou chaque symbole de la constellation contient deux bits d'informations.

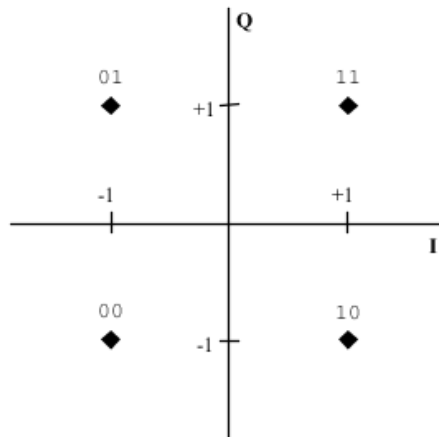


FIGURE 1.5 – Constellation QPSK

### 1.2.4 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.

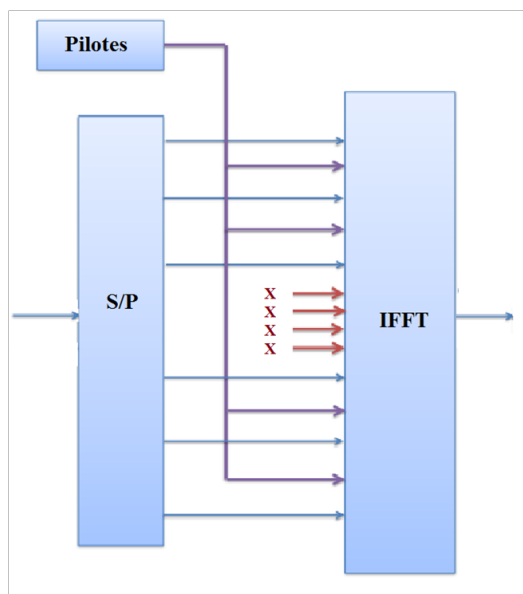


FIGURE 1.6 – Schéma de notre modulateur OFDM.

### 1.2.5 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].

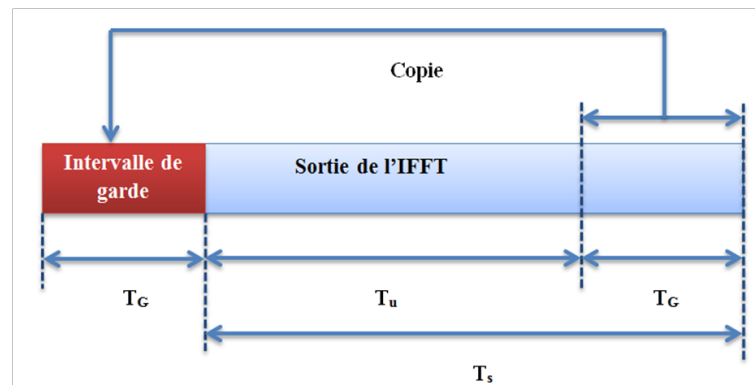


FIGURE 1.7 – Ajout de l'intervalle de garde au signal OFDM

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.

### 1.2.6 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 [3].

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

### 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.

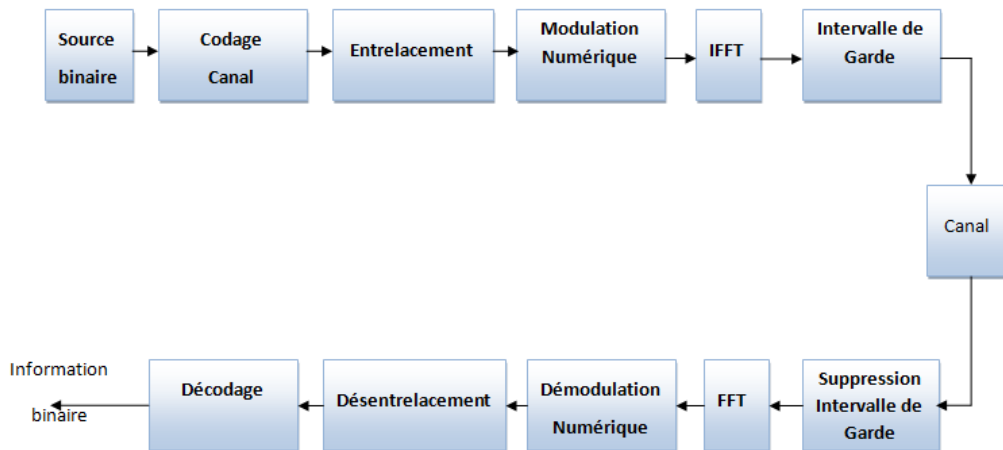


FIGURE 1.8 – Diagramme bloc d'un système OFDM.

### 1.3.1 Le codage convolutif :

Les codes convolutifs, introduits en 1955 par Elias [10], forment une classe extrêmement souple et efficace de codes correcteurs d'erreurs. Ce sont les codes les plus utilisés dans les systèmes de télécommunications fixes et mobiles surtout dans les systèmes cellulaires adoptant les standards GSM, IEEE 802.11a et ainsi que l'HIPERLAN/2 [11].

Le codage convolutif est une technique de codage, utilisant des registres à décalage linéaire d'état fini et des additionneurs formés par des "ou exclusif". Le registre à décalage est constitué de L sections, de longueur k bits. Le paramètre L est défini comme étant la longueur de contrainte. Le nombre de « OU exclusifs » est égal à la séquence codée formée des bits. Le nombre d'états possibles pour ce code  $2^{(L-1)}$  états [12].

La figure 1.9 montre un schéma de codage convolutif :

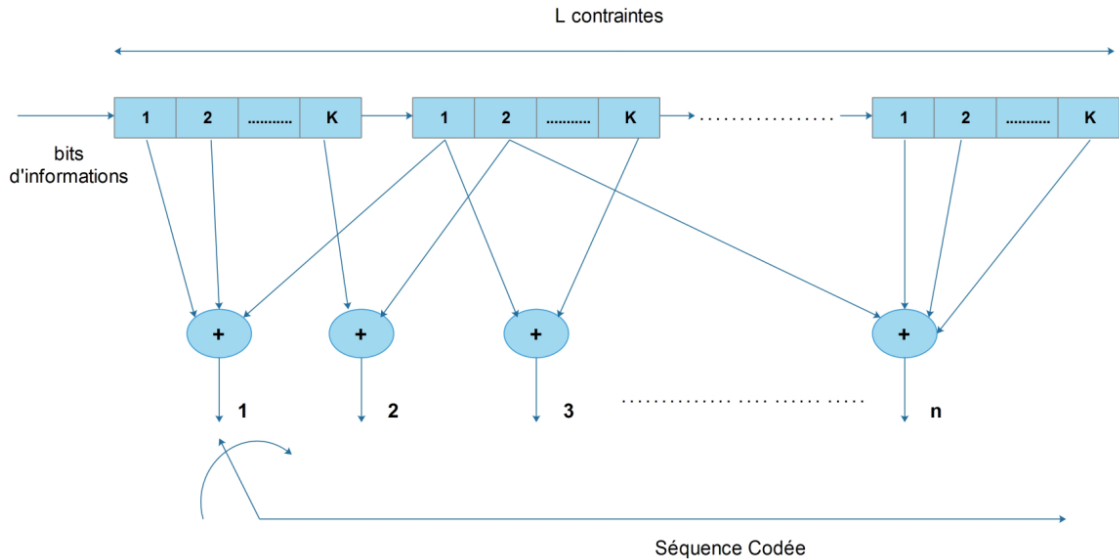


FIGURE 1.9 – Code de convolutif [10].

Les bits d'information à l'entrée de l'encodeur sont décalés de  $k$  bits à la fois. Pour  $k$  bits à l'entrée on a une séquence des bits codés à la sortie du codeur, donc le taux de codage est défini par  $R_c = k/n$ .

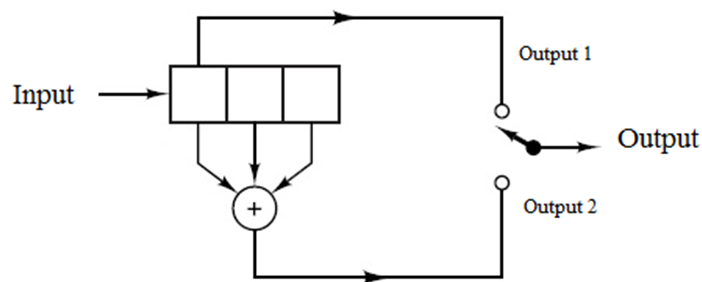


FIGURE 1.10 – exemple d'un codeur convolutionnel avec un taux de codage  $R = 1/2$ .

La Figure 1.10 représente un codeur convolutionnel de taux de codage  $R = 1/2$  et de longueur de contrainte  $k = 3$ . Le codeur fonctionne de la manière suivante :

Le registre à décalage est initialisé à zéro au début du codage, Les bits d'information arrivent à l'entrée du codeur de façon continue. La séquence des symboles codes est obtenue en échantillonnant les additionneurs modulo-2 à l'aide de commutateurs.

Le code de convolution est décrit par sa matrice génératrice, le terme « convolutif » s'applique à cette classe de codes parce que la suite de bits codés peut s'exprimer comme le résultat de la convolution de la suite de bits d'information  $e$  par les coefficients  $g$ . En effet, puisque le code est linéaire, nous avons :  $s = e.G$ .

Une fois la matrice génératrice obtenue, on peut déterminer, les connexions entre les registres, les additionneurs modulo 2, le taux de codage, le diagramme d'états, l'arbre d'encodage, et le diagramme de treillis. Ce dernier est une représentation du codeur convolutif qui tient compte du fait que le nombre d'états du codeur est fini. Le treillis est constitué de noeuds représentant les états du codeur en question, et de branches reliant les noeuds du treillis représentant les transitions entre les états du codeur. La longueur du treillis représente la profondeur dans la séquence des bits d'information, et sa largeur représente le nombre d'états du codeur.

La Figure 1.11 représente le treillis d'un code convolutif. On peut constater qu'on a toujours deux branches sortantes de chaque état.

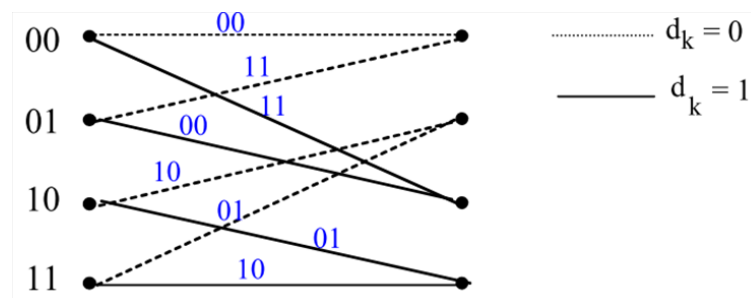


FIGURE 1.11 – Représentation en treillis du code convolutif.

La technique de modulation codée en treillis est une combinaison de codage convolutif et d'une application par répartition. La procédure de répartition des codes en treillis optimaux pour les canaux à bande limitée en présence d'un bruit AWGN est basée sur le critère de la minimisation de la distance libre Euclidienne du code.

### Décodage

Le décodage est une opération qui transforme les séquences binaires codées en informations intelligibles. Le décodage le plus courant est basé sur l'algorithme de Viterbi. Cet algorithme consiste à chercher dans l'arbre, le chemin qui correspond à la séquence la plus probable, c'est à dire celle qui est à la distance minimale de la séquence reçue ou encore la séquence la plus probable. Cet algorithme est utilisé dans le cas où les codes convolutifs ont une longueur de contrainte  $L \leq 10$  [12].

### 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-Solomon :

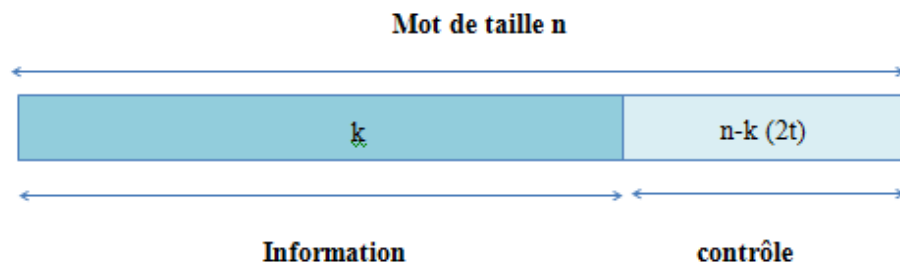


FIGURE 1.12 – mot-code de Reed-Solomon.

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

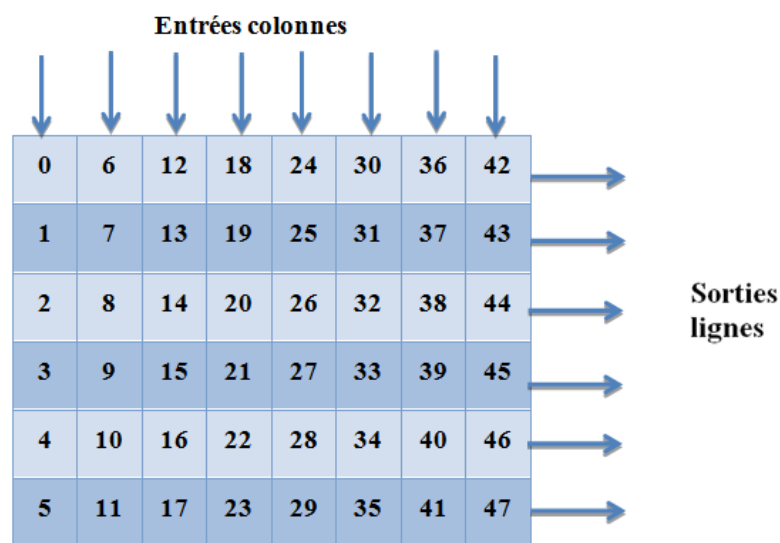


FIGURE 1.13 – Entrelacement par block de 48 bits.

Enfin un exemple montrant l'intérêt de l'entrelacement est montré par la figure 1.14 où l'information après codage, est récupérée grâce à un entrelacement dans un canal à évanouissement.

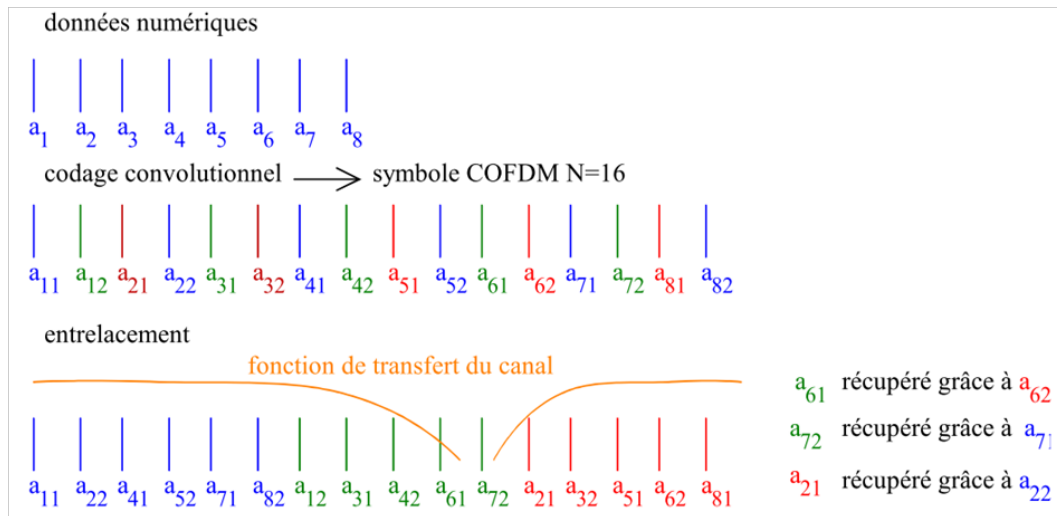


FIGURE 1.14 – Récupération de l'information grâce à un codage OFDM avec entrelacement.

### 1.3.4 Concaténation série des codes RS et convolutifs

La concaténation série est une technique de codage intégré sur des systèmes utilisant l'OFDM. Elle est utilisée dans de multiples applications dans le domaine des télécommunications à savoir les modems ADSL, modem satellite IDR/SMS, DVB-S, etc...

Dans cette technique (voir figure 1.15), le codage Reed-Solomon, renforcé par un entrelacement est accompagné d'un codeur convolutif. En réception, les erreurs résiduelles non corrigées par le décodeur de Viterbi seront alors désentrelacées dans les blocs d'origine et corrigées par le décodeur Reed-Solomon dans la mesure de son pouvoir correcteur.

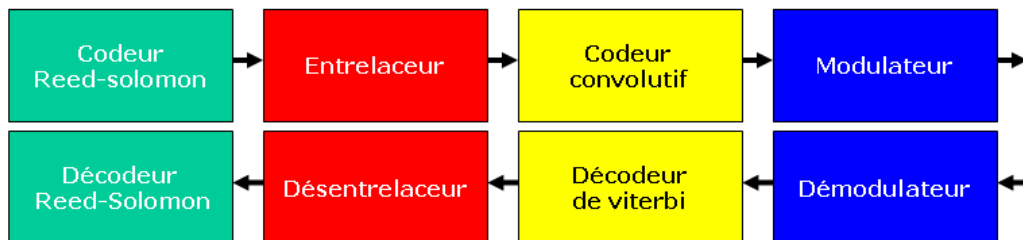


FIGURE 1.15 – Récupération de l'information grâce à un codage OFDM avec entrelacement.

## **1.4 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. Nous avons aussi abordé la technique de concaténation série des codes RS et convolutifs utilisé dans notre système COFDM et qui fera l'objet d'une modélisation et sa simulation dans le chapitre suivant.

# Chapitre 2

## Modélisation et simulation

CHAPITRE 1. PRINCIPES DE BASE DE L'OFDM ET CODAGE

### 2.1 Introduction

Ce chapitre présente la modélisation et la simulation du système de transmission COFDM avec une concaténation des code RS et convolutif. Le travail a été réalisé en utilisant l'environnement Simulink Matlab. Une analyse et une évaluation des performances du système COFDM 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, et le même que celui utilisé dans le cadre du projet de fin d'étude. On ajoute a ce modèle une concaténation des code RS et convolutif. 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 paramétrage a été une tâche assez complexe.

La chaîne de transmission COFDM avec codage concaténé est illustrée par la figure 2.1 :

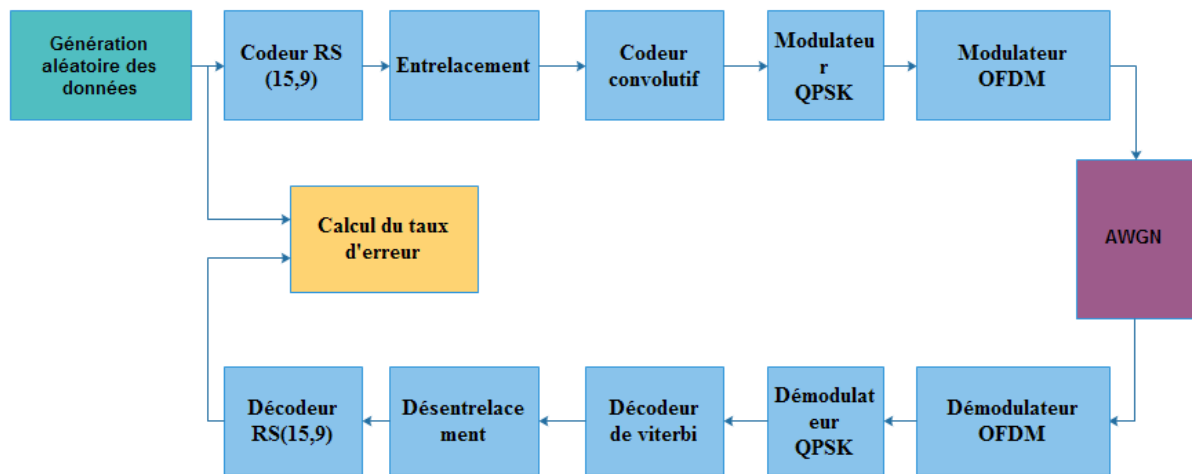


FIGURE 2.1 – Schéma d'une chaîne de transmission COFDM.

## 2.3 Simulations et Résultats :

Nous avons implémenté la chaîne de transmission COFDM avec concaténation des code 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.

La visualisés, après le bloc de l'IFFT , du spectre du signal COFDM avec concaténation des code RS et convolutif 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.

Paramètres	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

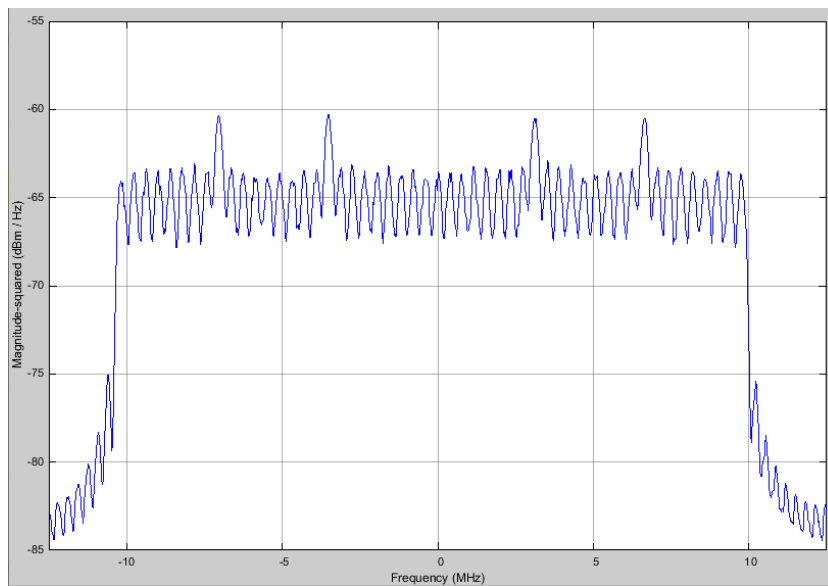


FIGURE 2.2 – Spectre d'un signal OFDM.

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)).

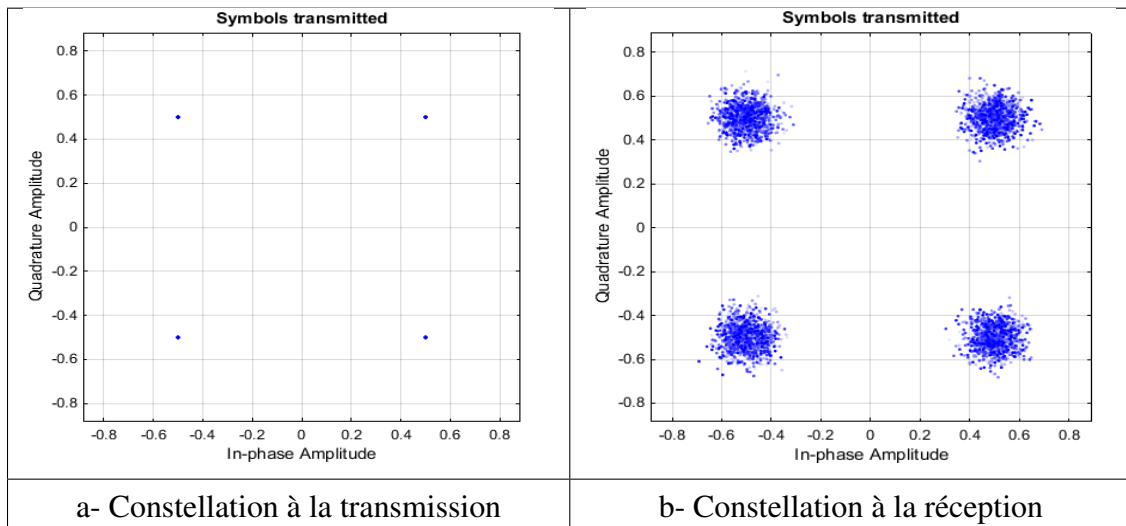


FIGURE 2.3 – Constellation QPSK avant et après le canal de transmission.

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) et Convolutif
Types de modulation des sous-porteuses	QPSK
Fréquence $F_s = \frac{1}{T}$	20 Mhz
Canal	AWGN

TABLE 2.2 – Paramètre de configuration .

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

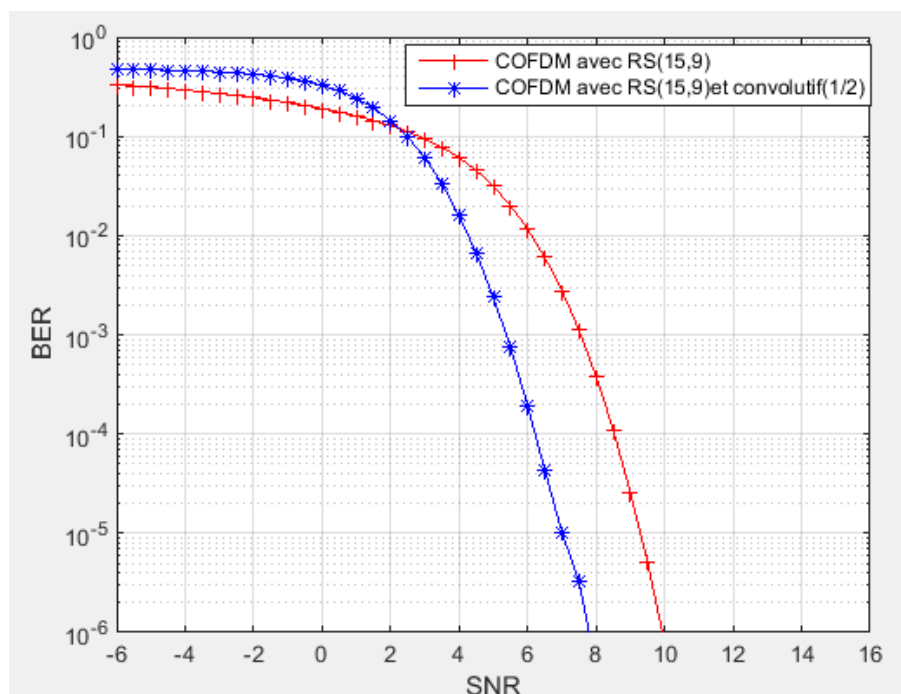


FIGURE 2.4 – TEB en fonction du SNR du Système COFDM Avec et sans codage concaténé.

On constate, d'après la simulation du système COFDM avec concaténation série des codes RS et des codes convolutifs et du système avec codage RS( voir figure 2.4) que l'utilisation de

codage concaténé dans un système COFDM apporte une amélioration sur le plan des performances par rapport au codage RS. Par exemple, pour un SNR égale a 6, le BER égale a  $2 \cdot 10^{-4}$  pour un système avec codage cocatéiné et de  $10^{-2}$  pour un système avec un codage RS. on note par contre , qu'il est clair que la système COFDM avec concaténation présente une grande complexité de réalisation comparé au système avec un simple codeur RS.



## 2.4 Conclusion

Ce travail présente la modélisation et la simulation du système de transmission COFDM avec concaténation série des codes RS et convolutif. Le travail a été réalisé en utilisant l'environnement Simulink Matlab. Une concaténation des codes RS et convolutif dans le système COFDM a été introduite. Nous avons constaté que l'introduction de la concaténation série dans le codage correcteur d'erreur 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. En effet, les erreurs résiduelles non corrigées par le décodeur de Viterbi seront alors désentre-lacées dans les blocs d'origines et corrigées par le décodeur Reed-Solomon dans la mesure de son pouvoir correcteur. Par contre, nous pouvons noter qu'elle présente aussi un inconvénient. C'est sa complexité de réalisation.

# Conclusion générale

Ce master a été consacré à la modélisation d'une chaîne de transmission COFDM utilisant la concaténation série des codes RS et des codes convolutifs. 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 de concaténation série.

Nous avons constaté que l'introduction de la concaténation série dans le codage correcteur d'erreur 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 . En effet, les erreurs résiduelles non corrigées par le décodeur de Viterbi seront alors désentrelacées dans les blocs d'origines et corrigées par le décodeur Reed-Solomon dans la mesure de son pouvoir correcteur.

# Bibliographie

- [1] Y. BEN HAMIDOUICHE, "*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.
- [11] Terry J, Heiskala J, "*OFDM wireless LANs : a theoretical and practical guide* ", fudiana-polis, 2002.

- [12] Proakis, J. G. "*Digital communications (4th ed.)*". New York, N.Y. : McGraw-Hill,(2001).