

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique

تخصص أنظمة اتصالات سلكية ولا سلكية

Spécialité Systèmes de télécommunication



## Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

KETTANI WALID

&

BOUZOUIDJA MOHAMED YACINE

Pour l'obtention du diplôme Master en Systèmes de Télécommunications (S.T)

---

Thème

---

# Etude de la synchronisation dans les systèmes OFDM

---

Proposé par : Professeur MELIANI HAMZA

Année Universitaire 2018-2019

---

# Dédicaces

---

*Je dédie ce travail à :*

*Mes chers parents Grace à leurs encouragements et leurs grands sacrifices afin que je puis poursuivre mes études. Aucun mot peut exprimer mon respect et mes profonds sentiments envers eux. Je prie Allah de les bénir, de veiller sur eux, en espèrent qu'ils seront toujours fiers de moi.*

*A ma chère famille, mes sœurs Aziza, Ratiba et Siham. A mon frère Moussa, je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et réussite pour vous et vos enfants.*

*A mes cher(e)s ami(e)s: Mohamed, Khaled, Walid, Neserine, Ahmed, Ikram, Zino, Wahab, Hanaa, Sarah, Asma, Hamza. J'espère que notre amitié reste pour l'infinité. A toutes la section Télécommunication promo 2018-2019, je vous souhaite que du bonheur et de la réussite dans votre vie professionnelle et personnelle.*

*Spécialement à mon binôme Yacine, je te remercie pour ta présence à mon côté et pour tes encouragements, que ce travaille garde notre amitié pour toujours.*

*Enfinement je tiens à faire une dédicace à mon promoteur Mr. Meliani Hamza qui m'a énormément aidé durant toute l'année.*

*Walid*

---

# Dédicaces

---

*Je dédie ce mémoire à mes chers et respectueux parents qui m'ont soutenu et encouragé pendant ces années d'études. Je voudrais leur exprimer mes sincères remerciements.*

*À mon frère et à mes sœurs, mes cousins et mes cousines et à tous les personnes qui mon encouragé ou aidé au long de mes études.*

*A mes amis : Hamza, Youcef, Abderrahmane, Aziz, Amine, Abdellah, Oussama, Kheireddine ...*

*A mon binôme Walid et tout sa famille.*

*A tous mes amis sans oublier tous les étudiants de la promotion 2018/2019 de M2 ST. A tous ceux que j'aime, et à tous ceux qui m'aime.*

*A mon promoteur Mr. Meliani Hamza qui m'a énormément aidé durant toute l'année.*

*Yacine*

---

# Remerciements

---

*Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant le maître de l'univers, qui nous a donné la force, la patience et la volonté d'accomplir ce modeste travail, qui a été réalisé au niveau de la faculté de technologie, département d'électronique de l'université de Saâd Dahleb Blida 01.*

*En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Monsieur Meliani, nous en exprimant notre gratitude d'avoir accepté de proposer et d'encadrer ce travail ainsi que pour ces remarques et sa patience infinie durant toute la période du travail.*

*Nous adressons également nos remerciements les plus sincères 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.*

*Enfin, Nous à remercions vivement tous nos enseignants ayant contribué de près ou de loin à notre formation ainsi que toutes les personnes qui ont participé encourager et sans oublier nos chères parentes, nos familles et nos amis.*

---

---

## ملخص:

تعتبر OFDM من بين التقنيات التي تتمحور حولها البحوث الحديثة في مجال الاتصالات بسبب للإيجابيات التي تقدمها، رغم انها لا تخلو من بعض النقصان التي قد تسبب مشاكل عويصة إذا لم يتم تداركها، من بين اهم السلبيات تعرض الإشارة الى إزاحة وتحول في الترددات ومشكل التأخر الزمني. يتمحور موضوع بحثنا هذا على القيام بدراسة التزامن في التوقيت والترددات بين الارسال والاستقبال، حيث ان التأخر الزمني وكذلك مشكل الازاحة بين الترددات يمكن ان يسبب تدمير التعامدية بين الناقلات الفرعية واختلاط الإشارة. من اجل تقدير الإشكالية المطروحة في التزامن الوقتي والترددي قمنا بدراسة مجموعة من الخوارزميات الحسابية بمساعدة MATLAB الذي مكنا من القيام بتقدير التأخر الزمني وتقدير ازاحة الترددات وكذا دراسة تأثيرها على معدل الخطاء (BER) وكوكبة رموز الإشارة في المجال الترددي (Constellation).

**كلمات المفاتيح: OFDM, التزامن, إزاحة الترددات, التأخر الزمني, التعامدية, اختلاط الإشارة.**

---

## Résumé :

L'OFDM est l'une des technologies sur lesquelles la recherche récente se base dans le domaine des Télécommunications en raison de ses nombreux avantages. Cependant, Certains défauts comme le décalage de la fréquence porteuse (CFO) et le décalage temporel (STO) risquent de causer des problèmes lors de la réception du signal s'ils ne sont pas corrigés. L'objet de cette recherche est de réaliser une étude de synchronisation temporelle et fréquentielle entre l'émetteur et le récepteur, le CFO et le STO pouvant causer la destruction de l'orthogonalité entre les sous-porteuses ainsi que le problème d'interférences (ISI et ICI). Afin d'estimer le problème de synchronisation temporelle et fréquentielle, nous avons étudié un ensemble d'algorithmes à l'aide de MATLAB, ce qui nous a permis d'estimer le STO et le CFO, ainsi que leurs effets sur le BER et la constellation.

**Mots clés : OFDM, Synchronisation, STO, CFO, Orthogonalité, ISI, ICI**

---

## Abstract:

The OFDM is one of the technologies on which recent research in Telecommunication are based because of its advantages. In spite of all, some disadvantages such as Carrier Frequency Offset (CFO) and Time Offset (STO) can cause serious problems at the receiver side if they are not corrected. The purpose of this research is to carry out a temporal and frequency synchronization study between the transmitter and the receiver, the CFO and the STO, which can cause the destruction of the orthogonality between the sub-carriers as well as the problem of interference (ICI & ISI). In order to estimate the STO and the CFO problem, we studied a set of algorithms using MATLAB, which allowed us to estimate the STO and the CFO, as well as their effects on the BER and the constellation.

**Keywords : OFDM, Synchronization, STO, CFO, Orthogonality, ISI,ICI**

---

# Liste des Abréviations

ADSL : Asymmetric digital subscriber line

AP : Amplificateur de Puissance

BER: Bit Error Rate

BPSK: Binary Phase Shift Keying.

CAN : Convertisseur Analogique Numérique.

CFO : Carrier Frequency Offset

CNA : Convertisseur Numérique Analogique.

CP : Cyclic Prefix.

CS: Cyclic Suffix

DAB: Digital Audio Broadcasting.

DFT: Discrete Fourier Transfer.

DSP: Digital Signal Processor.

DVB: Digital Audio Broadcasting

DVB – H: Digital Video Broadcasting Handheld

DVB – T: Digital Video Broadcasting Terrestrial

FDM: Frequency Division Multiplexing.

FFO: fractional frequency offset

FFT: Fast Fourier Transform.

FSK: Frequency Shift Keying.

ICI: Inter Carrier Interference.

IDFT: Inverse Discrete Fourier Transform.

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

IEP : Interférence Entre Porteuses.

IES : Interférences Entre Symbole.

IFFT: Inverse Fast Fourier Transform.

IFO: Integer Frequency Offset

IOT: Internet of Things

ISI: Inter Symbol Interference

LAN: Local Area Network

LTE: Long Term Evolution.

MSE : Mean Square Error

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing.

PAPR: Peak-to-Average Power Ratio.

PSK: Phase Shift Keying.

QAM: Quadrature Amplitude Modulation

SNR: Signal-to-Noise Ratio

STO: Symbol Timing Offset

TNT : Télévision Numérique Terrestre

UWB : Ultra Wide Band

VC: Virtual Carriers

WAN: Wide Area Network

Wi-Fi: Wireless fidelity

WiMAX: Worldwide Interoperability for Microwave Access

WLAN: Wireless Local Area Network

ZP: Zero Padding

# Table des matières

I. Introduction Général .....	1
-------------------------------	---

## **Chapitre 1 : Généralités sur la technique OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)**

1.1 Introduction .....	4
1.2 Canal Radio Mobile .....	4
1.3 Problèmes d'Interférences .....	5
1.4 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) .....	5
1.4.1 Intervalle de Garde entre Symboles .....	6
a- Insertion du Préfixe Cyclique .....	6
b- Insertion du Suffixe cyclique (CS).....	7
c- Insertion des zéros (ZP) .....	7
1.4.2 Notion Orthogonalité .....	8
1.4.3 Chaîne de Transmission OFDM .....	9
1.4.4 Le principe de modulation de la technique OFDM .....	10
1.4.5 Le principe de la démodulation OFDM .....	11
1.5 Applications de l'OFDM .....	12
1.5.1 Paramètres OFDM utilisés dans le standard IEEE802.11.a (Wi-Fi).....	12
1.6 Avantages de l'OFDM .....	13
1.7 Problèmes et Inconvénients de l'OFDM .....	13
1.7.1 Problèmes dus au PAPR .....	13
1.7.2 Problèmes d'estimation de Canal .....	14
1.7.3 Problèmes de Synchronisation .....	14

1.8 Conclusion .....	15
----------------------	----

## **Chapitre 2 : La Synchronisation dans la modulation OFDM**

2.1 Introduction .....	16
2.2 La synchronisation .....	16
2.3 La synchronisation temporelle dans les systèmes OFDM.....	17
2.3.1 L'effet du Décalage temporel STO .....	17
2.4 La synchronisation fréquentielle dans les systèmes OFDM .....	19
2.4.1 L'effet du décalage fréquentiel (CFO).....	20
a- L'effet du Décalage Doppler.....	20
b- L'effet de la fréquence porteuse .....	21
2.4.2 Effet du décalage de fréquence de la porteuse entière IFO .....	22
2.4.3 Effet du décalage de la fréquence de la porteuse fractionnaire FFO.....	22
2.5 Estimation du Décalage Temporel (STO) et du Décalage Fréquentiel (CFO) .....	23
2.5.1 Techniques d'estimation du STO en utilisant le préfixe cyclique CP .....	24
2.5.2 Estimation du décalage de fréquence porteuse (CFO) .....	25
a- Technique d'estimation du CFO en utilisant le préfixe cyclique (CP) .....	25
b- Technique d'estimation du CFO en utilisant la méthode de Moose (Préambules) .....	26
c- Technique d'estimation du CFO avec la méthode de Classen (utilisation des Pilotes)....	27
2.7 Conclusion .....	28

## **Chapitre 3 : Simulations & Présentations des résultats**

3.1 Introduction .....	29
------------------------	----

<b>3.2 Simulation du décalage temporel (STO) en utilisant le préfixe cyclique (CP)</b> .....	29
<b>3.2.1 Conclusion</b> .....	31
<b>3.3 Simulation du décalage fréquentiel (CFO)</b> .....	31
<b>3.3.1 L'effet du préfixe cyclique (CP) sur le décalage fréquentiel (CFO)</b> .....	31
<b>3.3.2 L'effet des itérations dans la technique de Moose sur le MSE</b> .....	32
<b>3.3.3 L'effet des itérations dans la technique de Classen sur le MSE</b> .....	33
<b>3.3.4 L'effet du CFO sur le MSE</b> .....	34
<b>a- Méthode CP</b> .....	35
<b>b- Méthode de Moose (préambules)</b> .....	35
<b>c-Méthode de Classen (pilotes)</b> .....	36
<b>d- Comparaison des trois méthodes</b> .....	37
<b>3.3.5 Conclusion</b> .....	38
<b>3.4 L'effet du décalage fréquentiel CFO sur le BER</b> .....	39
<b>3.5 L'effet du CFO sur la constellation</b> .....	40
<b>3.6 Conclusion</b> .....	43

# Liste des figures

<b>Figure 1.1:</b> Classification de l'évanouissement du Canal .....	5
<b>Figure 1.2:</b> Comparaison entre l'OFDM et la FDM .....	6
<b>Figure 1.3:</b> Insertion du Préfixe Cyclique (CP) dans l'OFDM .....	7
<b>Figure 1.4:</b> Insertion du Suffixe Cyclique (SC).....	7
<b>Figure 1.5:</b> Positionnement du ZP dans l'OFDM.....	8
<b>Figure 1.6:</b> Spectres des différentes porteuses de l'OFDM.....	8
<b>Figure 1.7:</b> Chaîne de transmission OFDM .....	9
<b>Figure 1.8:</b> Schéma synoptique d'un modulateur OFDM .....	11
<b>Figure 1.9:</b> Schéma synoptique d'un démodulateur OFDM.....	11
<b>Figure 1.10:</b> Puissance instantanée d'un signal OFDM en présence du PAPR .....	14
<b>Figure 2.1:</b> Quatre cas différents des débuts des symboles OFDM au présence du STO.....	17
<b>Figure 2.2:</b> L'effet du CFO .....	20
<b>Figure 2.3:</b> L'effet Doppler .....	20
<b>Figure 2.4:</b> L'impact du décalage fréquentiel (CFO) sur le signal OFDM .....	21
<b>Figure 2.5:</b> L'effet du CFO sur la constellation.....	23
<b>Figure 2.6:</b> Schéma synoptique d'une chaîne de transmission OFDM avec le bloc d'estimation du CFO et STO .....	24
<b>Figure 2.7:</b> Technique d'estimation du STO en utilisant le préfixe cyclique .....	24
<b>Figure 2.8:</b> Insertion du préambule dans l'OFDM (méthode de MOOSE).....	27
<b>Figure 2.9:</b> Structure d'arrangement des pilotes de type bloc.....	28
<b>Figure 3.1 :</b> Estimation du STO en absence du CFO.....	30
<b>Figure 3.2 :</b> Estimation du STO en présence CFO .....	30
<b>Figure 3.3:</b> l'estimation du décalage fréquentiel dans la méthode basse sur CP .....	32
<b>Figure 3.4:</b> l'estimation CFO en variant le nombre itérations dans la méthode des préambules	33
<b>Figure 3.5 :</b> l'estimation CFO en variant le nombre itération dans la méthode des pilotes .....	34
<b>Figure 3.6 :</b> L'influence de MSE en variant le CFO dans la méthode de CP .....	35

<b>Figure 3.7:</b> L'influence de MSE en variant l'effet du CFO dans la méthode de MOOSE (les préambules) .....	36
<b>Figure 3.8 :</b> L'influence de MSE en variant l'effet du CFO dans la méthode de Classen (les pilotes) .....	36
<b>Figure 3.9 :</b> l'effet du CFO avec les trois méthodes.....	38
<b>Figure 3.10:</b> l'effet du CFO sur le BER.....	40
<b>Figure 3.11:</b> Constellation pour CFO égale à 0 .....	41
<b>Figure 3.12:</b> Constellation pour CFO=0.1.....	41
<b>Figure 3.13:</b> Constellation pour CFO=0.4.....	42

# Liste des tableaux

<b>Tableau 1.1</b> : Paramètres de la standard OFDM dans le Wifi (802.11.a) .....	9
<b>Tableau 3.1</b> : Paramètres de simulation du décalage temporal (STO).....	29
<b>Tableau 3.2</b> : Paramètres de simulation du CP sur le CFO .....	33
<b>Tableau 3.3</b> : Paramètres de simulation de l'effet des itérations sur le MSE .....	34
<b>Tableau 3.4</b> : Paramètres de simulation du décalage fréquentiel (CFO) en variant le nombre itérations.....	35
<b>Tableau 3.5</b> :Parametres de simulation de l'effet du CFO sur le MSE .....	36
<b>Tableau 3.6</b> :Paramètres de simulation de comparasion des méthode d'estimation du CFO ....	39
<b>Tableau 3.7</b> :Parametres de simulation du BER avec un décalage fréquentiel.....	41
<b>Tableau 3.8</b> :Parametres de simulation de la constellation avec un décalage fréquentiel .....	42

## I. Introduction Général

Dans les systèmes de communication sans fil, les données sont acheminées de l'émetteur au récepteur à travers un canal sans fil, ces données subissent généralement des phénomènes indésirables tel que les multi trajet, le retard et les interférences (ISI, ICI). Ces phénomènes réduisant la performance du système, comme les systèmes mono-porteuses ne peuvent pas être évités. Afin de résoudre ces problèmes plusieurs recherches ont été effectuées et ont conduit à l'apparition de la technique 'orthogonal Frequency Division Multiplexing' connue sous le terme OFDM.

L'OFDM est l'une des techniques de modulation multiporteuse. Elle consiste à envoyer des paquets de données parallèles sur plusieurs sous porteuses orthogonales, cette notion d'orthogonalité permet aux signaux de se compresser dans le domaine fréquentiel sans être affectés et facile à récupérer au niveau de la réception. L'orthogonalité permet une diminution d'interférences entre porteuses (ICI) et un gain en bande passante. Ainsi elle garantit un débit plus élevé ce qui répond aux exigences des technologies modernes. Un autre point important dans les systèmes OFDM est l'utilisation d'un intervalle de garde tel que le préfixe cyclique (CP), le suffixe cyclique (SC) et le remplissage à zéro (ZP). Le Préfixe Cyclique, qui est généralement le plus utilisé, est une réplique de la dernière partie du symbole OFDM. Il est utilisé afin d'éviter les interférences entre symboles (ISI). Un second élément très important implémenté dans les systèmes OFDM est la transformé de Fourier rapide et son inverse (FFT/IFFT) pour éliminer la complexité des calculs qui était l'un des plus grands problèmes des systèmes mono-porteuses. A cause de ses nombreux avantages, l'OFDM est utilisé dans la plupart des technologies à haut débit tel que l'ADSL, 4G LTE, Wi-Fi, DVB et DVB-T... Malgré tous les avantages qu'offre l'OFDM, elle contient aussi des inconvénients qui peuvent affaiblir le rendement du système, tel que le PAPR qui affecte la puissance du signal ainsi que la sensibilité de l'OFDM à la synchronisation temporelle et fréquentielle. Ces problèmes font partie des sujets d'actualité dans le domaine de la recherche en télécommunication.

L'objet de notre travail est d'étudier l'effet de la synchronisation temporelle et fréquentielle le STO et le CFO entre l'émetteur et le récepteur sur le signal transmis pouvant causer la destruction de l'orthogonalité entre les sous-porteuses ainsi que le problème d'interférences (ISI et ICI). Pour ce faire,

nous avons utilisé un ensemble d'algorithmes à l'aide de MATLAB, ce qui nous a permis d'estimer le STO et le CFO, ainsi que leurs effets sur le BER et la constellation.

Nous avons organisé notre mémoire comme suit :

**Le premier chapitre :** Il est dédié à la technique OFDM et au canal radio mobile.

**Le second chapitre :** Il est consacré au sujet principal de synchronisation temporel (STO) et fréquentiel CFO). Dans ce chapitre nous allons étudier quelques méthodes d'estimations afin de réduire les problèmes du STO et du CFO à la réception :

- ✓ La méthode du CP pour estimer le STO.
- ✓ La méthode du CP pour estimer le CFO.
- ✓ La méthode de MOOSE (Préambules) pour estimer le CFO.
- ✓ La méthode de Classen (Pilotes) pour estimer le CFO.

**Le troisième chapitre :** Dans ce chapitre nous présentons les résultats des différentes simulations réalisées à l'aide du logiciel MATLAB. Nous avons étudié l'effet des différents paramètres liés aux systèmes tels que la taille du FFT, la longueur du CP et le nombre d'itérations utilisées. Les différentes estimations étudiées sont :

- ✓ Estimation du STO basé sur la méthode de CP.
  - Méthode du CP avec la technique d'autocorrélation.
  - Méthode du CP avec la technique de différence minimale quadratique.
- ✓ Estimation du CFO par la méthode de CP.
  - L'effet du CP sur le CFO.
- ✓ Estimation du CFO par la méthode de MOOSE(Préambule).
  - L'effet des itérations sur le MSE.
- ✓ Estimation du CFO par la méthode de CLASSN (Pilotes).
  - L'effet des itérations sur le MSE
- ✓ L'effet du CFO sur le MSE dans la méthode du CP.
- ✓ L'effet du CFO sur le MSE dans la méthode de MOOSE (Préambule).
- ✓ L'effet du CFO sur le MSE dans la méthode de CLASSN (Pilotes).
- ✓ Comparaison des trois méthodes.
- ✓ L'effet du CFO sur la constellation.

✓ L'effet du CFO sur le BER.

En dernier lieu le mémoire se termine par une conclusion générale qui résume le travail effectué dans ce projet de fin d'études.



**Chapitre 1 :**  
**Généralités sur la technique OFDM**  
**(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)**



**1.1 Introduction**

Le premier chapitre est destiné à décrire brièvement le fonctionnement et le principe d'une des techniques de modulation qui s'impose face aux problèmes majeurs de télécommunications, tels que la sélectivité fréquentielle causée par les trajets multiples, le problème d'interférence entre symboles et entre porteuse, ainsi que beaucoup d'autres problèmes.

Pour contourner ces obstacles, une autre technique a été adaptée qui, contrairement au système monoporteuse, utilise plusieurs porteuses pour transmettre les données. Cette dernière est connue sous le nom d'Orthogonal Frequency Division Multiplexing : OFDM

Elle consiste à transmettre les données de manière simultanée sur  $N$  porteuses modulées avec les modulations standards connues comme QAM, PSK. Elle est basée également sur l'orthogonalité de ces porteuses, qui est une condition nécessaire pour lutter contre les problèmes d'interférences.

L'augmentation du débit de transmission et l'économie en bande de fréquence sont parmi les raisons pour lesquelles l'OFDM a connu un grand succès. D'autre part, sa simplicité de mise en œuvre par IFFT/FFT a conduit à son utilisation massive dans plusieurs standards comme les systèmes DVB, le Wifi, les réseaux mobiles LTE... mais aussi plusieurs utilisations que nous allons citer ultérieurement dans ce chapitre. Dans ce qui suit nous allons décrire brièvement les problèmes rencontrés en transmission sans fil ainsi que la technique OFDM.

**1.2 Canal Radio Mobile**

Dans un canal radio mobile le signal transmis souffre de nombreux problèmes lors de son parcours car il doit faire face aux pertes de propagation dues à la distance, aux atténuations induites par les obstacles qu'il rencontre sur son parcours et aux évanouissements (Fading) produits par l'existence de trajets multiples ainsi que beaucoup d'autres problèmes résumés par la figure 1.1

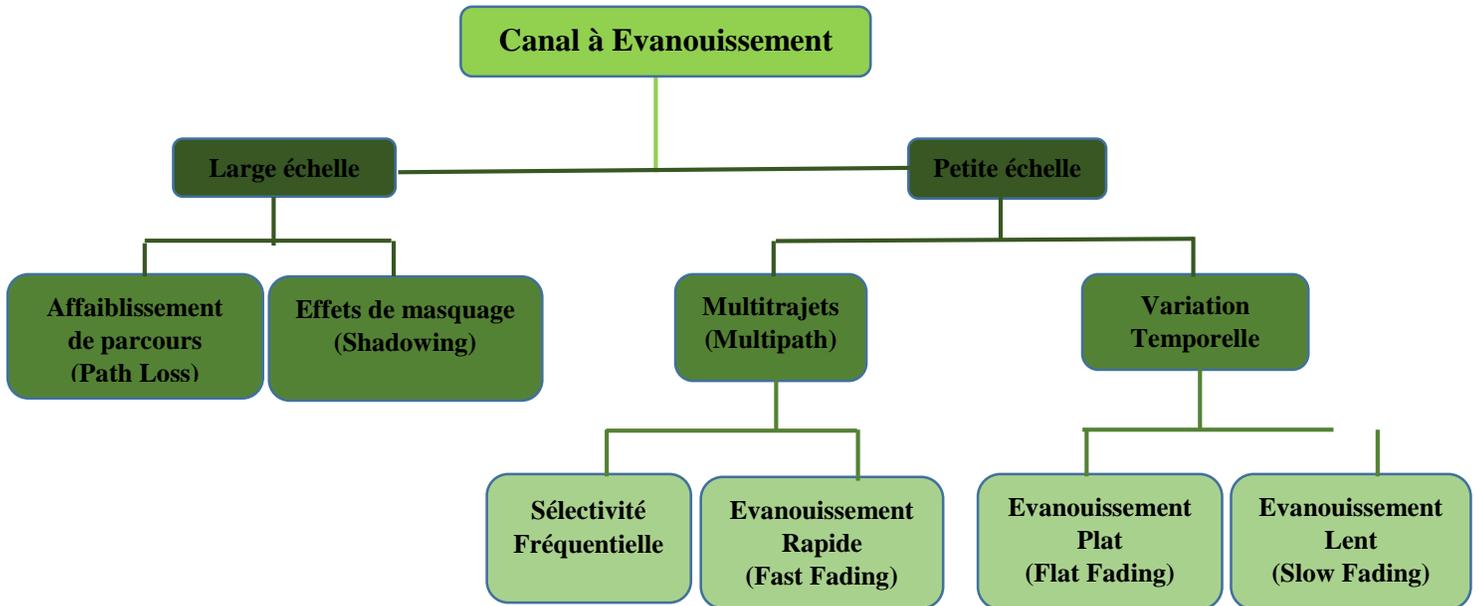


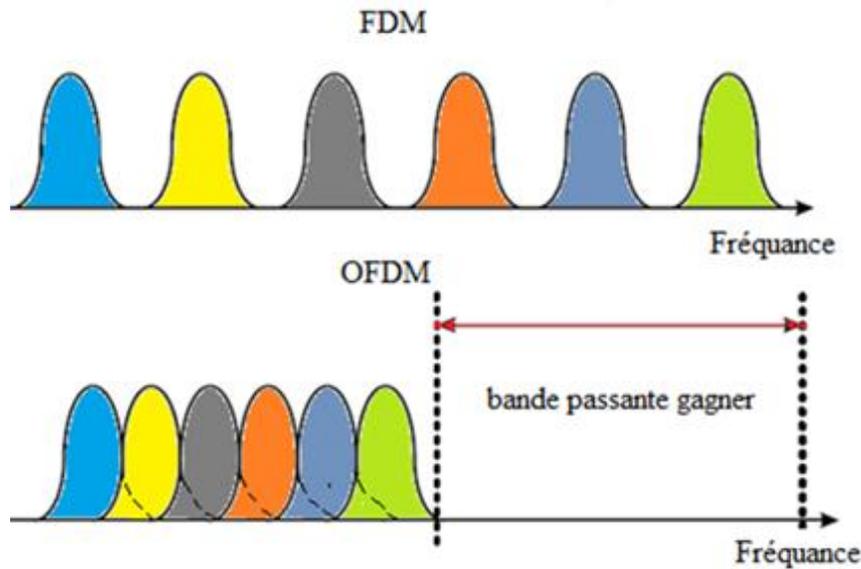
Figure 1.1: Classification de l'évanouissement du canal

### 1.3 Problèmes d'Interférences

Il y a deux types d'interférences qui peuvent affecter le signal à travers un canal sans fil. L'interférence entre symboles (ISI) qui est une forme de distorsion due au chevauchement des symboles consécutifs. L'interférence entre porteuses (ICI) est due au décalage des fréquences porteuses adjacentes.

### 1.4 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

L'idée générale de la technique de transmission OFDM est de scinder la largeur de bande totale disponible en sous-canaux à bande étroite. Les spectres des sous-canaux se chevauchent mais les signaux des sous-porteuses restent orthogonaux. Le signal de chaque sous-canal est modulé individuellement avec l'une des modulations numériques telles que la QAM, PSK, FSK. La figure 1.2 montre le principe de la modulation OFDM ainsi que son avantage quant au gain dans la bande passante contrairement à la technique FDM.



**Figure 1.2** : comparaison entre l'OFDM et la FDM

Comme il a été signalé auparavant, un signal OFDM peut être affecté par des interférences de canal adjacent non négligeable (ICI) et par des interférences entre symboles. Pour remédier à ces problèmes, on insère dans le système OFDM d'une par une bande de garde au niveau des sous-porteuses externes, appelées porteuses virtuelles VC (Virtual Carriers) afin d'éliminer le ICI d'autre part on insère un intervalle de garde entre deux symboles OFDM afin d'éliminer le ISI [1]

#### 1.4.1 Intervalle de Garde entre Symboles

L'intervalle de garde est une période utiliser entre chaque sous porteuse OFDM afin d'éviter les effets de l'ISI. Plusieurs techniques différentes existent pour l'introduction des intervalles de gardes. Il s'agit soit de remplir l'espace de garde entre deux symboles consécutif par des zéros, soit d'introduire une extension cyclique du symbole OFDM. [1]

##### a- Insertion du Préfixe Cyclique

Un symbole OFDM est précédé d'un préfixe cyclique de longueur proportionnelle au retard du canal (spread delay  $\tau_{\max}$ ) [2]. Cette technique consiste à insérer au début d'un symbole une copie de la fin de ce même symbole OFDM. La figure 1.3 nous montre la structure des symboles OFDM avec le CP. La durée du CP plus long que le retard maximal du canal à trajets multiples  $\tau_{\max}$  permet de maintenir l'orthogonalité parmi les sous-porteuses.

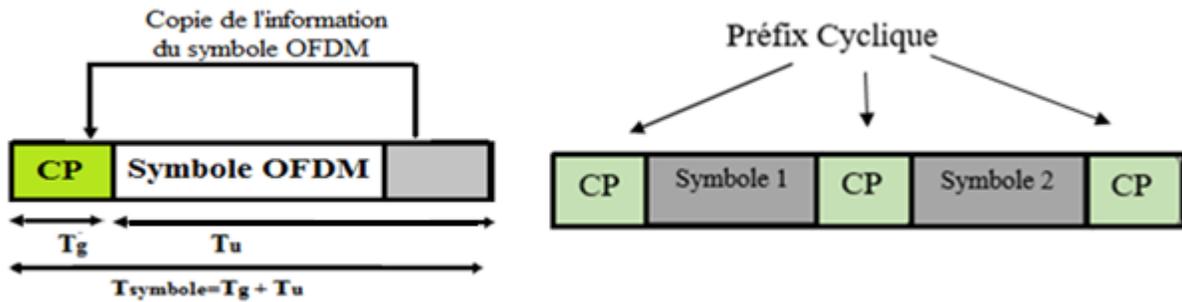


Figure 1.3 : Insertion du préfixe cyclique (CP) dans l'OFDM

**b- Insertion du Suffixe cyclique (CS)**

Le suffixe cyclique (CS) est également une extension cyclique du système OFDM. Il diffère de CP uniquement par le fait que CS est la copie de la partie principale d'un symbole effective OFDM et qu'il est inséré à la fin du symbole. Il est utilisé pour éviter l'interférence entre le flot montant et celui descendant dans une communication sans fil [1]. Pour choisir sa longueur, on calcule la différence de temps de réception entre le flot montant et descendant. La figure 1.4 illustre un symbole OFDM avec un suffixe Cyclique.

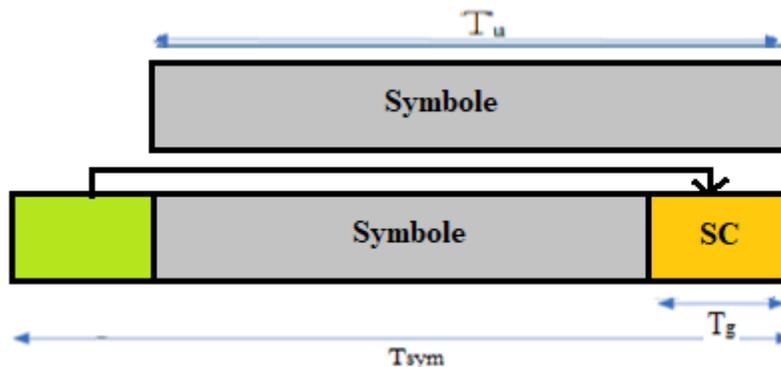


Figure 1.4 : Insertion du suffixe cyclique (SC)

**c- Insertion des zéros (ZP)**

C'est une méthode qui consiste à insérer dans l'intervalle de garde des zéros à la place du préfixe ou suffixe cyclique. Cette approche est utilisée dans le système UWB (Ultra Wide Band). Lorsque l'intervalle de garde est rempli par des zéros, la longueur du symbole OFDM est plus

courte que dans les cas d'attribution de préfixe cyclique et suffixe cycliques. Malheureusement même avec une longueur de ZP plus longue que le délai maximal du canal à trajets multiples, un petit décalage temporel provoque la discontinuité du symbole OFDM [2]. La figure 1.5 représente des symboles OFDM avec le ZP.

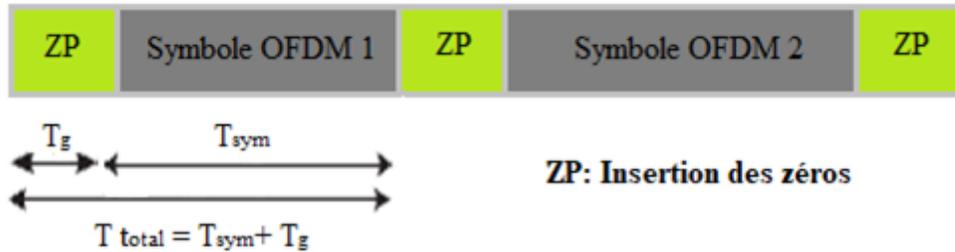


Figure 1.5 : Positionnement du ZP dans l'OFDM

### 1.4.2 Notion Orthogonalité

Comme il est indiqué sur la figure 1.6, la notion d'orthogonalité est vérifiée quand l'amplitude du spectre de n'importe qu'elle sous-porteuse particulière (les lignes colorées) atteint sa valeur maximale, les amplitudes des sous-porteuses restantes sont à zéros (la zone rouge dans la figure).

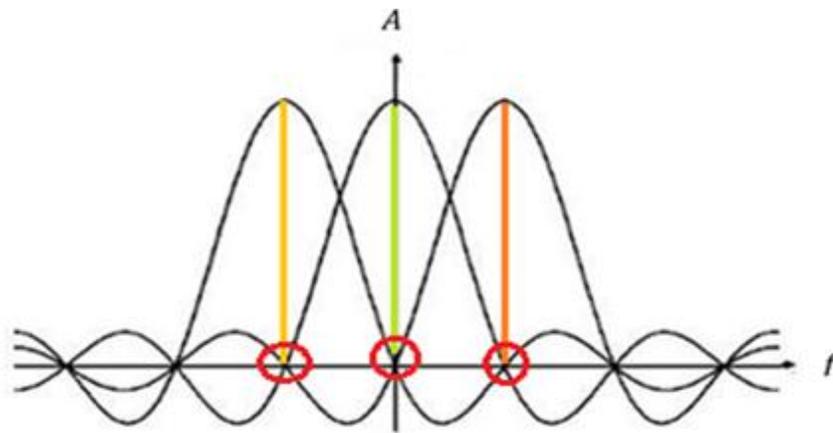


Figure 1.6 : Spectre des différentes porteuses de l'OFDM

Deux fonctions  $f(t)$  et  $g(t)$  sont dites orthogonales sur un intervalle de  $a \leq t \leq b$  lorsque l'intégrale de leurs produits est nulle.

$$\int_a^b f(t) \cdot g(t) dt = 0 \tag{1.1}$$

Par exemple si

$$f(t) = e^{j2\pi f_k t} \quad \text{et} \quad g(t) = e^{-j2\pi f_i t}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{T_{sym}} \int_0^{T_{sym}} e^{j2\pi f_k t} e^{-j2\pi f_i t} dt &= \frac{1}{T_{sym}} \int_0^{T_{sym}} e^{j2\pi \frac{k}{T_{sym}} t} e^{-j2\pi \frac{i}{T_{sym}} t} dt \\ &= \frac{1}{T_{sym}} \int_0^{T_{sym}} e^{j2\pi \frac{(k-i)}{T_{sym}} t} dt \end{aligned} \quad (1.2)$$

$$= \begin{cases} 1, & \forall \text{ l'entier } k = i \\ 0, & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (1.3)$$

### 1.4.3 Chaîne de Transmission OFDM

La figure 1.7 montre une chaîne de transmission de l'OFDM, avec ces différents éléments. Elle est constituée de deux parties : émission et réception.

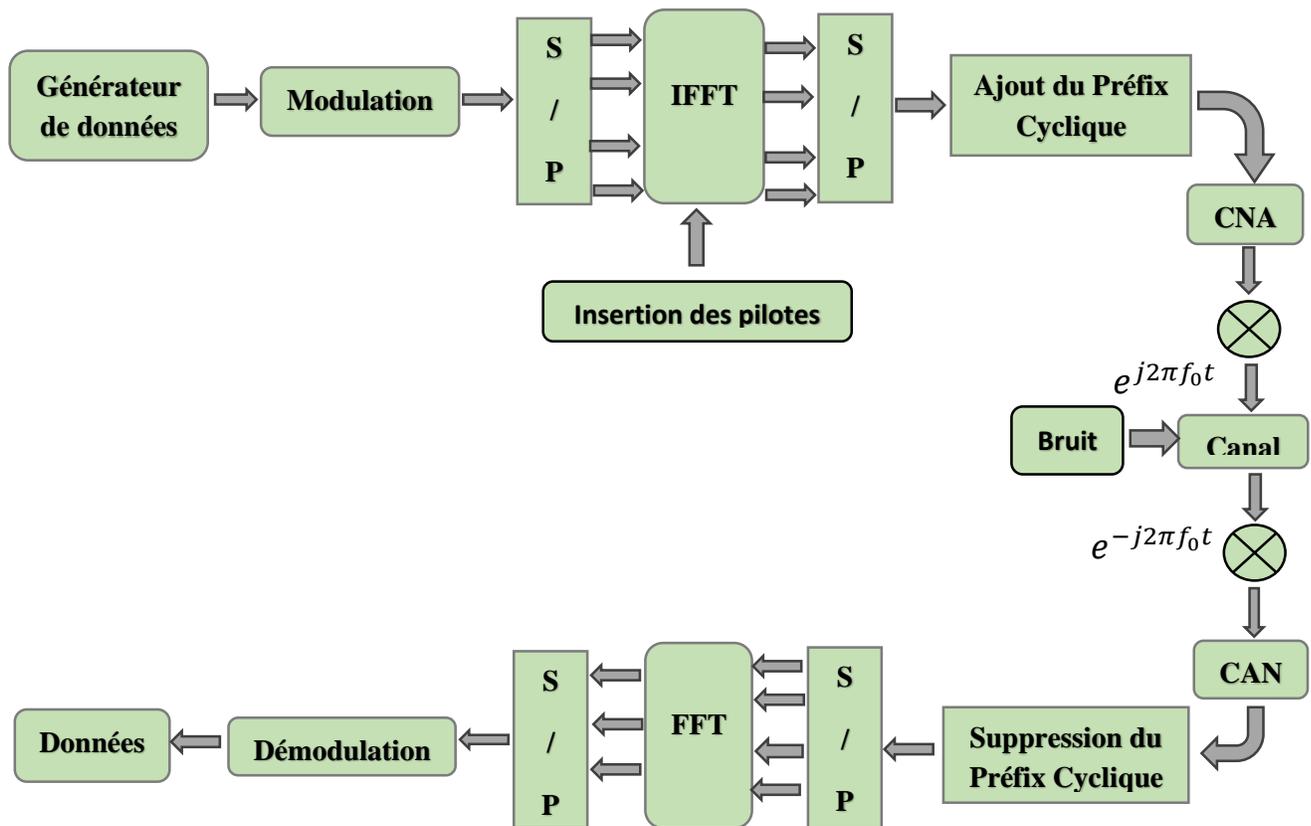


Figure 1.7 : Chaîne de transmission OFDM

Dans la partie émission d'un système OFDM les données sont sous forme d'une séquence d'information en série. Elles subissent les étapes suivantes :

- Ces données sont modulées et subissent ensuite une conversion série /parallèle (S/P).
- Calcul de la transformée inverse de Fourier (IFFT) qui transforme le signal à transmettre du domaine fréquentiel au domaine temporel. Elle est utilisée pour sa simplicité et sa réduction des opérations de calculs mathématiques.
- Conversion parallèle /séries (P/S) du signal.
- Rajout du préfixe cyclique à chaque symbole.
- Ensuite transmission du signal à travers un canal de transmission.

Dans la partie réception les données subissent les étapes suivantes :

- Suppression du préfixe cyclique.
- Conversion Série/Parallèle (S/P) du signal.
- Application de la transformée de Fourier Rapide FFT pour convertir les signaux du domaine temporel au domaine fréquentiel.
- Ces données subissent une conversion parallèle/ série (P/S) ensuite démodulées.

Dans la section suivante

#### 1.4.4 Le principe de modulation de la technique OFDM [5]

La figure 1.8 représente le schéma qui explique le principe d'un modulateur OFDM.

Pour répartir les données à transmettre sur les  $N$  sous-porteuses, considérons une séquence de  $N$  symboles  $c_0, c_1, \dots, c_{N-1}$ .

Soit  $T_s$  la durée d'un symbole OFDM. Chaque donnée  $C_k$  module un signal à la fréquence  $f_k$ . Le signal  $m(t)$  à la sortie du modulateur s'écrit sous forme complexe suivante [5]

$$m(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{j2\pi f_k t} \quad \text{avec } f_k = f_0 + \frac{k}{T_s} \quad (1.4)$$

Pour maintenir l'orthogonalité l'espace entre les deux fréquences  $f_k$  et  $f_{k+1}$  doit être égal à  $\frac{1}{T_s}$

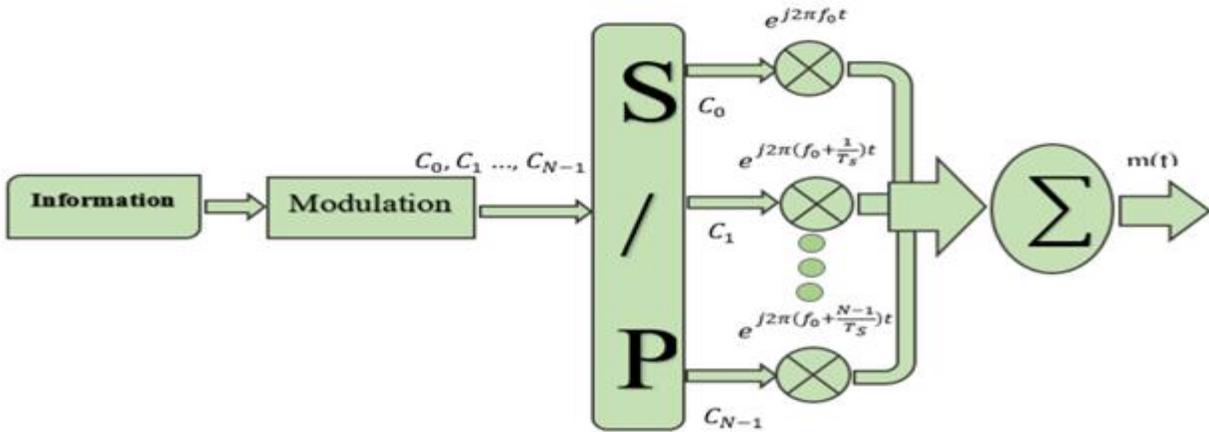


Figure 1.8 : Schéma synoptique d'un modulateur OFDM

### 1.4.5 Le principe de la démodulation OFDM [5]

La figure 1.9 présente le principe de la démodulation OFDM.

A la réception le signal  $y(t)$  s'écrit sous la forme [5] :

$$y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k H_k(f) e^{j2\pi(f_0 + \frac{k}{T_s})t} \tag{1.5}$$

où  $H_K(f)$  est la fonction de transfert du canal autour de la fréquence  $f_k$  à l'instant  $t$ .

La démodulation consiste à démoduler le signal suivant les  $N$  sous porteuses,

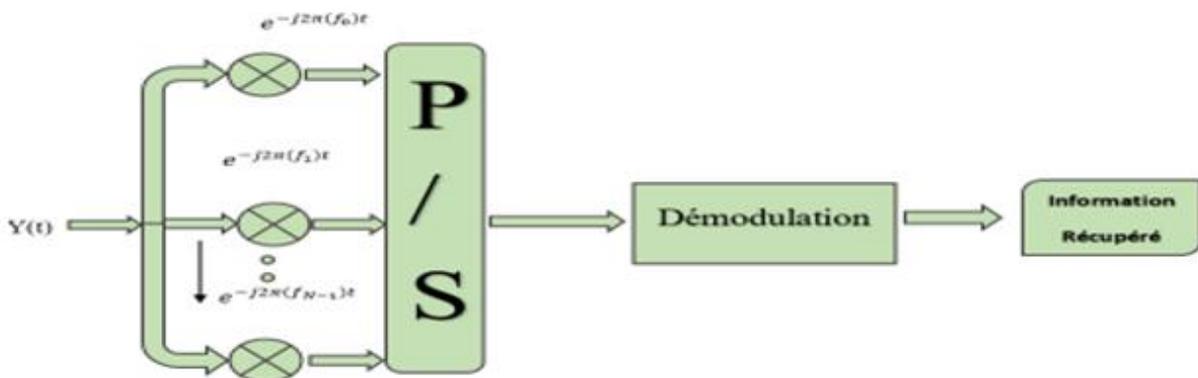


Figure 1.9 : Schéma synoptique d'un démodulateur OFDM

### 1.5 Applications de l'OFDM [6]

L'OFDM est une technologie efficace qui répond aux exigences des nouvelles technologies telles que la G4, internet of Things (IOT)... Actuellement, il existe plusieurs applications de la technique OFDM. Nous citons à titre d'exemples :

- Télévision numérique et télévision haute définition : DVB – T
- DVB – H utilisées pour recevoir les programmes de la Télévision Numérique Terrestre sur téléphone mobile.
- OFDM utilisé dans la radiodiffusion audionumérique DAB.
- La téléphonie mobile 3G et 4G.
- Wireless LAN / WAN.
- Les réseaux Wi-Fi et WiMax.
- La modulation OFDM est utilisée pour les fournisseurs de données à haute débit tel que l'ADSL.

#### 1.5.1 Paramètres OFDM utilisés dans le standard IEEE802.11.a (Wi-Fi)

Comme exemple d'utilisation de la technique OFDM, le tableau 1.1 donne les différents paramètres utilisés dans le standard IEEE 802.11.a (Wifi) établi par l'organisme international IEEE.

Type de modulation	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Débit de données	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbit/s
Nombre de sous-porteuses	52
Nombre total de sous-porteuses non utilisées	12
La durée de symbole OFDM	4 $\mu$ s
Nombre de pilote	4
Espacement des sous-porteuses	312.5 KHz
Intervalle de protection	800 ns
Espacement des canaux	20MHz
Largeur de bande -3 dB	16.56 MHz

**Tableau 1.1** : Paramètres de la standard OFDM dans le Wifi (802.11.a) [4]

Un système OFDM n'utilise pas toutes les sous-porteuses pour la transmission de données. Certaines sous-porteuses sont réservées pour d'autres utilisations telles que les porteuses pilotes (utilisées pour l'estimation) et d'autres sont utilisées comme bande de garde. [3]

### 1.6 Avantages de l'OFDM [6]

Les avantages de l'OFDM sont nombreux certains de ces avantages sont illustrés ci-dessous :

- Haute efficacité spectrale avec une capacité de transmettre une grande quantité d'informations, l'OFDM garantie une bande passante élevée grâce à la propriété d'orthogonalité car l'espacement des porteuses est réduit.
- Réalisation numérique et mise en œuvre simples en utilisant l'opération de la transformé de Fourier rapide.
- En choisissant une durée du CP appropriée, l'OFDM permet d'avoir une robustesse contre les interférences inter symboles (ISI), les interférences entre porteuses (ICI).

### 1.7 Problèmes et Inconvénients de l'OFDM [6]

Comme toutes techniques ou inventions l'OFDM présente certains inconvénients dont les plus importants sont mentionnés ci-dessous :

- La sensibilité aux problèmes des erreurs de synchronisation en fréquence et en temps est très élevée, ce qui introduit un déphasage sur les symboles reçus. Cependant, l'OFDM est plus sensible au décalage de fréquence de la porteuse, car elle engendre des interférences entre porteuses qui peuvent détruire l'orthogonalité entre les porteuses.
- Le PAPR élevé est l'un des inconvénients les plus importants de l'OFDM. Ce qui requiert une amplification linéaire, or on sait que la plupart des amplificateurs ne sont pas linéaires sur toute leur plage de fonctionnement.

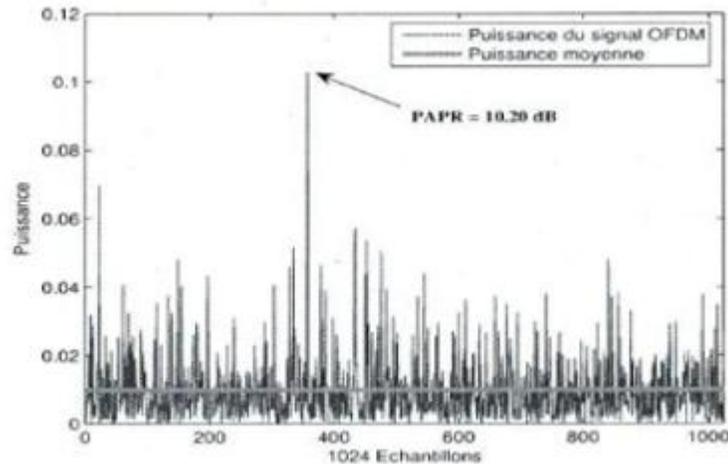
#### 1.7.1 Problèmes dus au PAPR

On définit le PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) comme un rapport entre la puissance maximale et la puissance moyenne du signal  $s(t)$  sur l'intervalle  $T$  (équation 1.6). À chaque fois

qu'on aura un pic du signal, l'amplificateur de puissance (AP) doit consommer plus d'énergie pour le transmettre. [2]

$$PAPR = \frac{P_{pic}}{P_{moy}} = \frac{\max|s(t)|^2}{E(|s(t)|^2)} \quad (1.6)$$

La figure 1.10 représente la puissance instantanée d'un signal OFDM en présence au PAPR.



**Figure 1.10 :** Puissance instantanée d'un signal OFDM en présence du PAPR [4]

### 1.7.2 Problèmes d'estimation de Canal

L'estimation de canal dans un système OFDM est généralement défini comme une détection cohérente afin d'inverser l'effet de l'évanouissement non sélectif sur chaque sous-porteuse. [1]. La réponse impulsionnelle du canal de communication peut varier d'une façon significative d'un symbole OFDM à un autre. Dans le cas des canaux rapidement fluctuants, cette réponse impulsionnelle peut subir des changements tout aussi importants à l'intérieur d'un même symbole OFDM. Par conséquent, l'estimation du canal devient une étape incontournable. [7]

### 1.7.3 Problèmes de Synchronisation

Malgré ses avantages l'OFDM présente toujours des problèmes majeurs tels que les erreurs de synchronisation qui détruisent l'orthogonalité. Ceci a pour effet de dégrader les performances du système de communications. On peut noter que les différents problèmes de synchronisation

sont causés principalement par le décalage temporel et le décalage fréquentiel. Ce qui impose une nécessité de synchronisation temporelle et fréquentielle.

- La synchronisation temporelle consiste à estimer le début de chaque trame reçue afin d'avoir une bonne détection de chaque début de symbole OFDM.
- La synchronisation fréquentielle est de trouver et estimer le déphasage entre la fréquence d'émission et celle de la fréquence locale de la réception.

L'objectif de notre sujet de projet de fin d'études est justement d'étudier ces problèmes de synchronisation temporelle et fréquentielle.

### **1.8 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons passé en revue quelques éléments de la communication sans fil. Nous avons donné quelques caractéristiques d'un canal radio mobile. Ensuite nous avons décrit brièvement une chaîne de Transmission OFDM et quelques éléments utilisés dans la technique OFDM. Finalement nous avons passé en revue quelques problèmes inhérents à cette technique tels que sa sensibilité aux erreurs de synchronisation temporel et fréquentiel qui feront l'objet du deuxième chapitre.

---

**Chapitre 2 :**  
**La Synchronisation dans la modulation**  
**OFDM**

---

## 2.1 Introduction

L'OFDM apporte de nombreuses solutions pour plusieurs problèmes reconnus dans les canaux de transmission, mais également elle a connu d'autres inconvénients tel que le PAPR, les problèmes d'estimation du canal et la sensibilité aux erreurs de synchronisation. Toutefois, les avantages de l'OFDM ne peuvent être utiles que lorsque l'orthogonalité est garantie. Malheureusement ces erreurs de synchronisation ont un impact direct sur l'orthogonalité des systèmes OFDM, car elles peuvent détruire l'orthogonalité de toutes les sous-porteuses, par conséquent introduire des interférences entre porteuses (ICI) et des interférences entre symboles (ISI), ce qui peut conduire à une forte dégradation des performances du système.

Dans ce chapitre nous allons étudier l'effet des erreurs de synchronisation sur le signal OFDM. Généralement il existe deux types de synchronisation associés au signal OFDM, à savoir le décalage temporel (STO) et le décalage de fréquence porteuse (CFO) qui peuvent être estimés au niveau du récepteur. Plusieurs méthodes sont utilisées à cet effet ; on peut citer la méthode basée sur le préfixe Cyclique (CP) pour l'estimation du STO et du CFO, la méthode de MOOSE basée sur les préambules des symboles ainsi que la méthode de CLASSEN basée sur les pilotes pour l'estimation du CFO.

## 2.2 La synchronisation

La synchronisation est l'un des thèmes de recherche fondamentaux dans le système OFDM [1,2,8,9,10].

Afin de décrire brièvement ce phénomène, prenons  $\varepsilon$  et  $\delta$  comme valeurs du décalage fréquentiel (CFO) et le décalage temporel (STO) respectivement. En se référant à l'équation (2.1), le signal en bande de base reçu au niveau du récepteur en présence du CFO et STO peut s'exprimer comme suit [1] :

$$\begin{aligned}
 Y_l[n] &= \text{IDFT} \{y_l[k]\} = \text{IDFT} \{H_l[k]X_l[k] + Z_l[k]\} \\
 &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} H_l[k]X_l[k] e^{j2\pi(k+\varepsilon)(n+\delta)/N} + Z_l[n] \quad (2.1)
 \end{aligned}$$

et  $Z_l[n] = \text{IDFT}\{Z_l[K]\}$

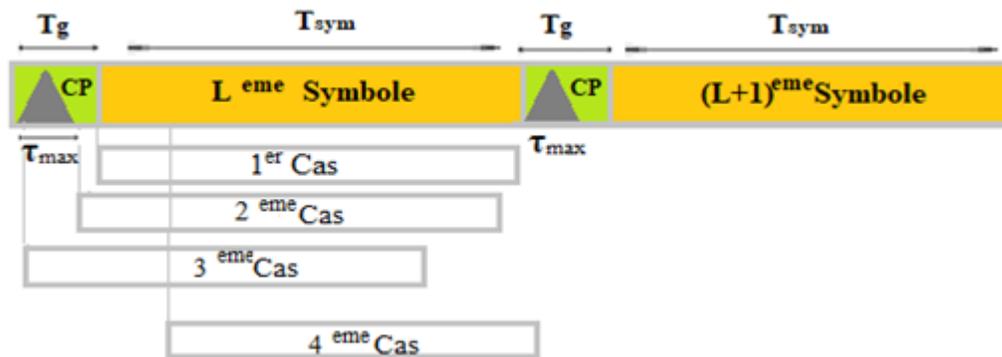
Où  $H_t$  représente la réponse impulsionnelle du canal,  $X_t$  le signal transmis et  $Z_t$  le bruit additif. Dans ce qui suit nous allons étudier la synchronisation temporelle (STO), et synchronisation fréquentielle (CFO).

### 2.3 La synchronisation temporelle dans les systèmes OFDM

Dans les systèmes OFDM, il est généralement difficile de définir exactement la valeur du décalage temporel (STO) à cause du canal à trajets multiples. Le STO représente la différence temporelle entre le début du symbole OFDM (sans CP) et son début estimé. L'effet du décalage temporel sur les performances est différent en fonction de sa valeur estimée. Notez que le décalage temporel  $\delta$  dans le domaine temporel subit un déphasage de  $2\pi k\delta = N$  dans le domaine fréquentiel. [1]

#### 2.3.1 L'effet du Décalage temporel STO [1,8]

Soit  $\delta$  le décalage temporel normalisé. Pour étudier les effets du STO, les effets du canal, du décalage de fréquence et le bruit sont ignorés. La figure 2.1, illustre les quatre cas possibles du décalage temporel STO.



**Figure 2.1 :** Quatre cas différents des début des symboles OFDM en présence du STO [8]

- 1<sup>er</sup> Cas : C'est le cas où le point de début estimé pour le symbole OFDM coïncide avec le moment exact du symbole, ce qui préserve l'orthogonalité entre les composantes de fréquence des sous-porteuses. Dans ce cas, le symbole OFDM peut être parfaitement récupéré sans aucun type d'interférence.
- 2<sup>ème</sup> Cas : C'est le cas lorsque le point de début du symbole OFDM est estimé avant le symbole réel, mais après la fin de la réponse (retardée) du canal au symbole OFDM

précédent. Dans ce cas, le  $L^{\text{ième}}$  symbole n'est pas superposé au  $(L-1)^{\text{ème}}$  symbole OFDM précédent, ce qui ne provoque pas l'ISI.

Afin de voir les effets du STO, considérons le signal reçu dans le domaine fréquentiel en prenant la FFT du domaine temporel. Les échantillons reçus au niveau du récepteur sans décalage fréquentiel ni atténuation d'amplitude  $\sum_{n=0}^{N-1} x_l[n + \delta]$ .

Le calcul de la FFT donne [1] :

$$\begin{aligned}
 Y_l[k] &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_l[n + \delta] e^{-\frac{j2\pi nk}{N}} \\
 &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ \sum_{p=0}^{N-1} X_l[p] e^{j2\pi(n+\delta)p/N} \right\} e^{-j2\pi nk/N} \quad (2.2) \\
 &= \frac{1}{N} \sum_{p=0}^{N-1} X_l[p] e^{j2\pi\delta p/N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi \frac{(p-k)n}{N}} \\
 &= X_l[k] e^{j2\pi\delta/N}
 \end{aligned}$$

Où la toute dernière ligne résulte de l'identité suivante [1] :

$$\begin{aligned}
 \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi \frac{(p-k)n}{N}} &= e^{j\pi(p-k)\frac{N-1}{N}} \cdot \frac{\sin[\pi(k-p)]}{\sin\left[\frac{\pi(k-p)}{N}\right]} \\
 &= \begin{cases} N, & k = p \\ 0, & k \neq p \end{cases} \quad (2.3)
 \end{aligned}$$

L'équation (2.3) montre que l'orthogonalité entre les sous-porteuses peut être préservée.

- 3<sup>eme</sup> Cas : C'est lorsque le début du symbole OFDM est estimé avant la fin de la réponse du canal du symbole OFDM précédent. Dans ce cas, l'orthogonalité entre les composants des sous-porteuses est détruite par l'ISI et de plus l'ICI survient.
- 4<sup>eme</sup> Cas : dans ce cas le début d'un symbole OFDM est estimé après le début exact du symbole. Ce qui signifie que la synchronisation des symboles est un peu plus lente que la synchronisation exacte. Dans ce cas, la FFT est constitué d'une partie du symbole OFDM actuel  $x_l[n]$  et d'une partie du prochain  $x_{l+1}[n]$  [1]. Plus précisément :

$$Y_l[n] = \begin{cases} x_l[n + \delta] & \text{for } 0 \leq n \leq N - 1 - \delta \\ x_{l+1}[n + 2\delta - N_g] & \text{for } N - \delta \leq n \leq N - 1 \end{cases} \quad (2.4)$$

Où  $N_g$  est la longueur du Cp.

La FFT de ce signal  $Y_l(n)$  pour la démodulation est donnée par [1] :

$$= \frac{N - \delta}{N} X_l(p) e^{\frac{j2\pi p\delta}{N}} + \frac{1}{N} \sum_{p=0, p \neq k}^{N-1} X_l(p) e^{j2\pi p\delta/N} \sum_{n=0}^{N-1-\delta} e^{j2\pi \left(\frac{p-k}{N}\right)n} + \frac{1}{N} \sum_{p=0}^{N-1} X_{l+1}(p) e^{j2\pi p(2\delta - N_g)/N} \sum_{n=N-\delta}^{N-1} e^{j2\pi \left(\frac{p-k}{N}\right)n} \quad (2.5)$$

Considérant l'identité suivante [1] :

$$\sum_{n=0}^{N-1-\delta} e^{j2\pi \left(\frac{p-k}{N}\right)n} = e^{j\pi(p-k)\frac{N-1-\delta}{N}} \cdot \frac{\sin\left[\frac{(N-\delta)\pi(k-p)}{N}\right]}{\sin\left[\frac{\pi(k-p)}{N}\right]} \quad (2.6)$$

$$= \begin{cases} N - \delta & \text{for } p = k \\ 0 & \text{for } p \neq k \end{cases}$$

Le deuxième terme de l'équation (2.5) correspond à l'ICI, ce qui implique que l'orthogonalité est détruite. Le troisième terme implique l'ISI dans le signal reçu.

## 2.4 La synchronisation fréquentielle dans les systèmes OFDM

L'origine des problèmes de synchronisation fréquentielle qui peuvent introduire le décalage de fréquence peut provenir de deux situations ; l'absence de la fréquence porteuse correspondante entre l'oscillateur récepteur et l'oscillateur émetteur et le décalage Doppler [2].

2.4.1 L'effet du décalage fréquentiel (CFO)

Soit  $\varepsilon$  le décalage fréquentiel normalisé. Pour étudier les effets du CFO, nous ignorons les effets du canal, du décalage temporel et le bruit. Lorsque le CFO survient, le signal du récepteur est décalé en fréquence ( $\delta f$ ) [2], ceci est illustré par la figure 2.2.



Figure 2.2 : L'effet du CFO [9]

a- L'effet du Décalage Doppler

Le décalage Doppler peut être créé lorsqu'il existe un mouvement relatif entre l'émetteur et le récepteur [9], ou les deux. L'effet Doppler est donné l'équation (2.7) donnée ci-dessous.

$$f_d = \frac{V \cdot f_c}{c} \cdot \cos \theta \tag{2.7}$$

$f_d$ , C et V sont respectivement la fréquence Doppler, la vitesse de la lumière et la vitesse de récepteur en mouvement. La figure 2.3, illustre l'effet Doppler.

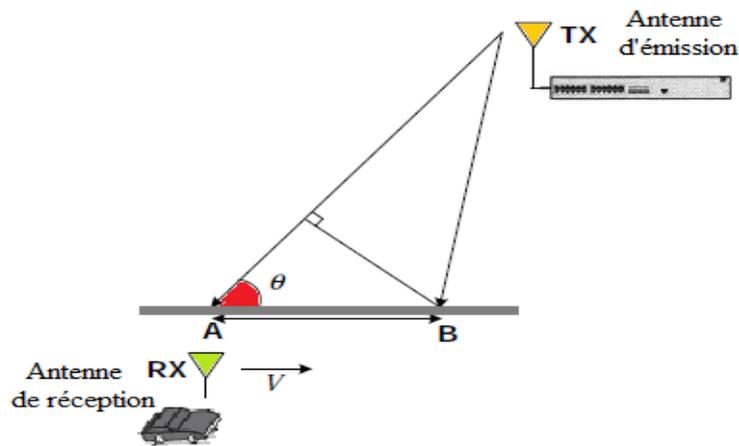


Figure 2.3 : L'effet Doppler [2]

### b- L'effet de la fréquence porteuse

À propos du premier facteur de la synchronisation fréquentielle, dans la performance de l'oscillateur la stabilité indique dans quelle mesure un oscillateur peut produire la même fréquence dans un intervalle de temps spécifié et la précision indique le décalage par rapport à la valeur idéale. [9] Ce décalage de fréquence est défini comme suit :

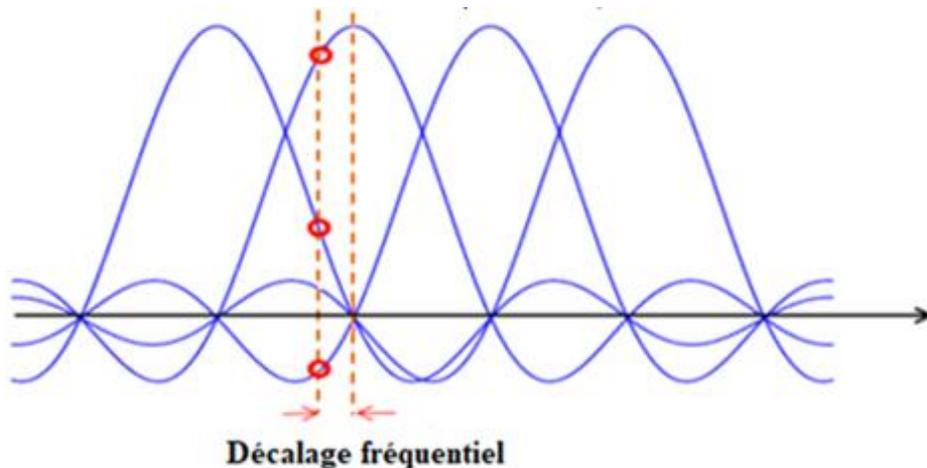
$$f_{off} = f_c - f'_c$$

$f_c$ ,  $f'_c$  Sont respectivement la fréquence porteuse dans l'émetteur et la fréquence porteuse dans le récepteur. La figure 2.4 montre que le décalage de fréquence du signal dans le domaine fréquentiel est soumis au  $\epsilon$  du CFO ce qui va provoquer une interférence entre porteuses (ICI).

Le CFO normalisé  $\epsilon$  est :

$$\epsilon = \frac{f_{off}}{\Delta f} \quad (2.8)$$

$\Delta f$ , est l'espacement des sous-porteuses



**Figure 2.4** : L'impact du décalage fréquentiel (CFO) sur le système OFDM [9]

L'équation (2.9) du signal reçu dans le domaine temporel peut être écrite comme suit [1]:

$$y_l[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} H[K] X_l[K] e^{\frac{j2\pi(k+\epsilon)n}{N}} + Z_l[n] \quad (2.9)$$

Comme prévu, le CFO normalisé peut être divisé en deux parties : CFO entier (IFO)  $\varepsilon_i$  et CFO fractionnaire (FFO)  $\varepsilon_f$  qui correspond à  $\varepsilon = \varepsilon_i + \varepsilon_f$ .

### 2.4.2 Effet du décalage de fréquence de la porteuse entière IFO

En raison du l'IFO, le signal transmis  $X[k]$  est décalé de manière cyclique dans le récepteur, produisant ainsi  $X[k - \varepsilon_i]$  dans la  $k^{\text{ème}}$  sous-porteuse. À moins que le décalage ne soit compensé, le résultat sera donc une dégradation des performances, mais l'orthogonalité entre les composantes de fréquence de sous-porteuse n'est pas détruite, donc ICI ne se produit pas.

### 2.4.3 Effet du décalage de la fréquence de la porteuse fractionnaire FFO

Le signal reçu dans le domaine fréquentiel avec un FFO de  $\varepsilon_f$  est donné par l'équation (2.10) [1]

$$Y_l = \frac{\sin(\pi\varepsilon_f)}{N \sin(\frac{\pi\varepsilon_f}{N})} e^{\frac{j\pi\varepsilon_f(N-1)}{N}} H[k]X_l[k] + I_l[k] + Z_l[k] \quad (2.10)$$

Le FFO produit une distorsion d'amplitude et de phase de la composante de fréquence de la  $k^{\text{ème}}$  sous-porteuse donnée par [1] :

$$\frac{\sin(\pi\varepsilon_f)}{N \sin(\frac{\pi\varepsilon_f}{N})} e^{\frac{j\pi\varepsilon_f(N-1)}{N}}$$

Par contre le terme  $I_l[k]$  donné par l'équation donnée ci-dessous représente l'ICI provoqué par d'autres sous-porteuses sur la  $k^{\text{ème}}$  sous-porteuse. [1]

$$I_l[k] = e^{\frac{j\pi\varepsilon_f(N-1)}{N}} \sum_{m=0, m \neq k}^{N-1} \frac{\sin(\pi(m-k+\varepsilon_f))}{N \sin(\pi(m-k+\varepsilon_f)/N)} H[m]X_l[m] e^{\frac{j\pi(m-k)(N-1)}{N}} \quad (2.11)$$

Comme le montre la figure 2.5, l'effet du CFO force la constellation de la modulation 4-QAM à faire une rotation.

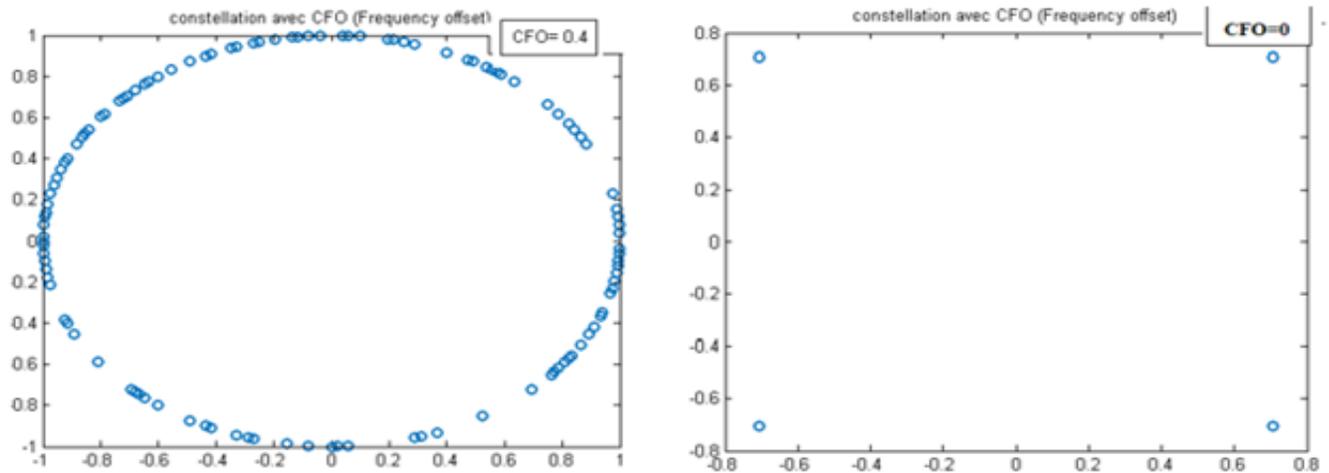


Figure 2.5 : L'effet du CFO sur la constellation

### 2.5 Estimation du Décalage Temporel (STO) et du Décalage Fréquentiel (CFO)

Comme expliqué précédemment, un décalage temporel (STO) et un décalage fréquentiel (CFO) provoquent des perturbations telles que l'ISI et l'ICI dans les systèmes OFDM. Pour ne pas affecter les systèmes OFDM et afin d'assurer leur bon fonctionnement, une estimation du STO et CFO est essentielle. Pour ce faire le début des symboles OFDM doit être déterminé avec précision en estimant le STO et le CFO avec des techniques de synchronisation au niveau du récepteur. La figure 2.6 représente un schéma explicatif du bloc d'estimation d'un système OFDM. Dans ce qui suit nous allons décrire ces techniques.

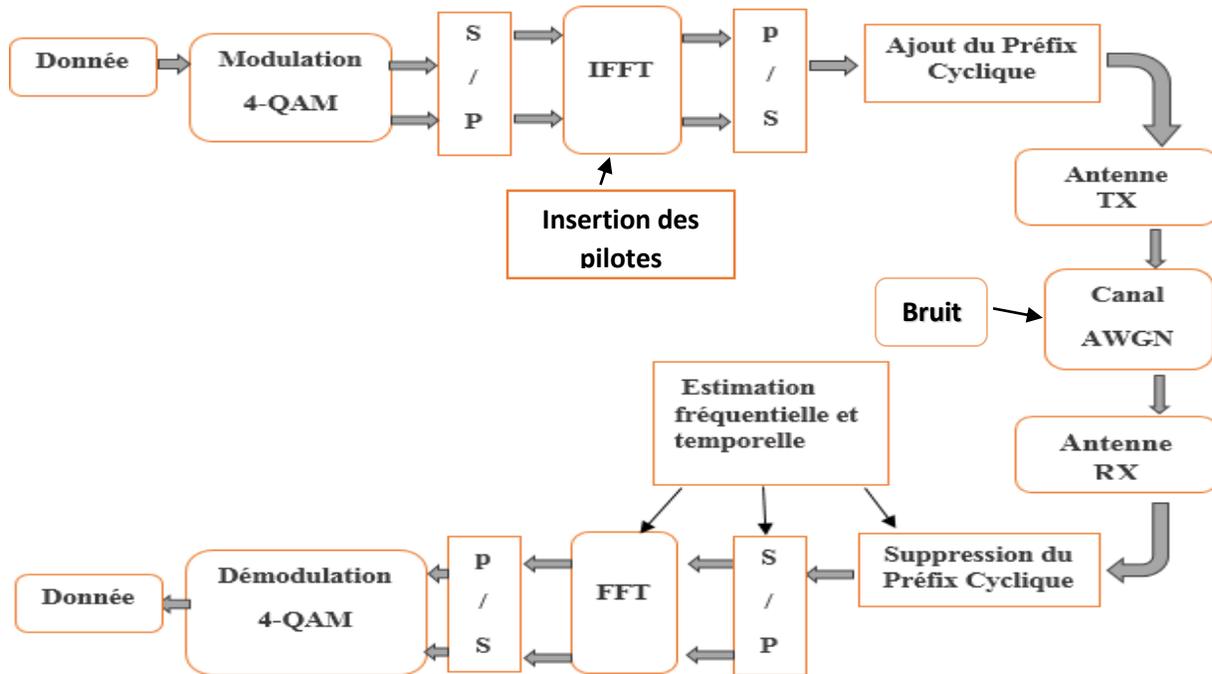


Figure 2.6 : Schéma synoptique d'une chaîne de transmission OFDM avec un bloc d'estimation du CFO et STO [8]

2.5.1 Techniques d'estimation du STO en utilisant le préfixe cyclique CP

Considérons un symbole OFDM avec un préfixe cyclique (CP) de  $N_g$  échantillons sur une période  $T_g$  et de données effectives de  $N_{sub}$  échantillons sur une période  $T_{sub}$ . [1]. L'estimation du STO se fait de deux manières différentes soit en calculant la différence ou l'autocorrélation de deux fenêtres glissantes  $W1$  et  $W2$  (voir figure 2.7). La ressemblance des deux fenêtres est d'autant plus grande que la différence entre leurs échantillons respectifs est minimum.

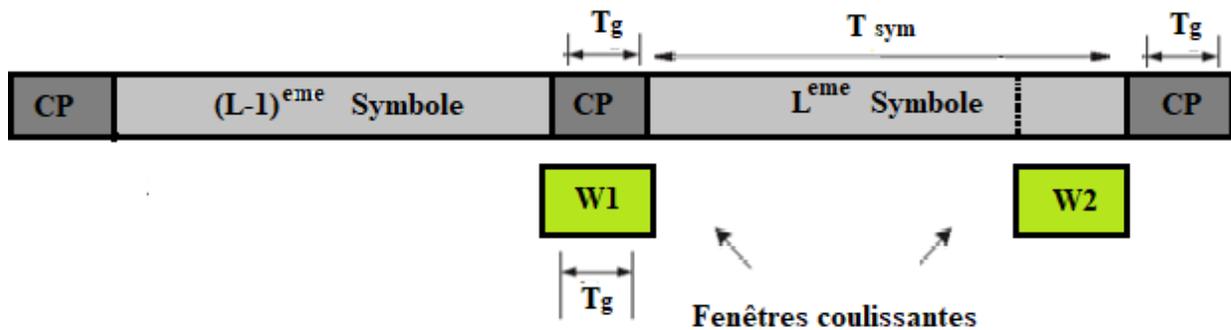


Figure 2.7 : Technique d'estimation du STO en utilisant le Préfixe Cyclique [1]

L'équation (2.12) donne l'algorithme de la méthode de différence [1]

$$\mathcal{S} = \underset{\delta}{\operatorname{argmin}} \left\{ \sum_{i=\delta}^{NG-1+\delta} |y_l[n+i] - y_l[n+N+i]| \right\} \quad (2.12)$$

En pratique l'équation (2.12), n'est utilisée à cause de son inclusion du CFO. Pour cette raison la différence quadratique donnée par l'équation (2.13) ci-dessous [1] pour laquelle le CFO n'intervient pas est utilisée.

$$\mathcal{S} = \underset{\delta}{\operatorname{argmin}} \left\{ \sum_{i=\delta}^{NG-1+\delta} (|y_l[n+i] - y_l^*[n+N+i]|)^2 \right\} \quad (2.13)$$

La deuxième méthode de l'estimation du STO qui est la corrélation entre les échantillons des fenêtres W1 et W2 est donnée par l'équation (2.14) suivante [1]. La ressemblance des deux fenêtres est d'autant plus grande que leur corrélation est maximum.

$$\mathcal{S} = \underset{\delta}{\operatorname{argmax}} \left\{ \sum_{i=\delta}^{NG-1+\delta} |y_l[n+i]y_l^*[n+N+i]| \right\} \quad (2.14)$$

### 2.5.2 Estimation du décalage de fréquence porteuse (CFO)

En estimant le décalage de fréquence CFO au niveau du récepteur, la perte de performance due à un décalage de fréquence d'un signal reçu et de l'oscillateur de réception peut être considérablement réduite. Cependant, pour que le récepteur puisse être synchronisé correctement avec l'émetteur, les deux facteurs importants suivants doivent être connus :

- Avant l'application de la FFT, nous devons connaître le début de chaque symbole.
- La méthode d'estimation du CFO utilisée parmi celles citées précédemment

#### a- Technique d'estimation du CFO en utilisant le préfixe cyclique (CP)

Cette technique est basée sur la différence de phase entre les deux fenêtres W1 et W2 ( séparées par N échantillons) vu précédemment. Un décalage fréquentiel CFO =  $\epsilon$  entraîne une rotation de phase de  $2\pi N\epsilon / N$  dans le signal reçu. Cette différence de phase est donnée par  $\frac{2\pi N\epsilon}{N} = 2\pi\epsilon$ .

L'estimation du CFO est donnée par l'équation (2.15) [1]:

$$\hat{\epsilon} = \frac{1}{2\pi} \arg. \{ Y_l^* [n] Y_l [n + N] \}, n = -1, -2 \dots - N_g \quad (2.15)$$

Qui peut s'écrire sous la forme suivante [1] :

$$\hat{\epsilon} = \frac{1}{2\pi} \arg \left\{ \sum_{n=N_g}^{-1} y_l^* [n] y_l [n + N] \right\} \quad (2.16)$$

Les algorithmes qui utilisent CP pour estimer le CFO ne peuvent estimer le CFO que dans une plage limitée de  $[(-\pi, +\pi) / 2\pi] = [-0.5, +0.5]$ , de sorte que  $|\hat{\epsilon}| < 0.5$ .

**b- Technique d'estimation du CFO en utilisant la méthode de Moose (Préambules)**

La méthode de Moose proposée par P.H. Moose [10] est utilisée pour obtenir le CFO dans le domaine fréquentiel. Cette méthode est basée sur la transmission de deux trames identiques pour comparer la valeur de la phase de sous-porteuse de deux symboles consécutifs. Le décalage fréquentiel est déterminé par l'algorithme d'estimation du maximum de vraisemblance (MLE) de la manière suivante :

Si deux symboles d'apprentissage identiques sont transmis consécutivement, au niveau du récepteur, la relation entre les deux est donnée par

$$y_2 [n] = y_1 [n] e^{\frac{j2\pi\epsilon N}{N}}$$

Où  $\epsilon$  représente le CFO (2.17)

dans le domaine fréquentiel :

$$Y_2 [k] = Y_1 [k] e^{j2\pi\epsilon} \quad (2.17)$$

En utilisant les équations précédentes, le CFO peut être calculé comme suit [1]:

$$\hat{\epsilon} = \frac{1}{2\pi} \tan^{-1} \left\{ \frac{\sum_{k=0}^{N-1} \text{Im}[Y_1^* [k] Y_2 [k]]}{\sum_{k=0}^{N-1} \text{Re}[Y_1^* [k] Y_2 [k]]} \right\} \quad (2.18)$$

La méthode de Moose est utilisée pour les valeurs CFO  $|f_{CFO}| \leq \pi / 2\pi = \frac{1}{2}$ , mais il pourrait être étendu à des valeurs plus élevées [1]. La figure 2.8 nous montre la structure d'insertion des préambules dans un système OFDM.



Figure 2.8 : Insertion du Préambule dans l’OFDM (Méthode de MOOSE)

**c- Technique d'estimation du CFO avec la méthode de Classen (utilisation des Pilotes)**

Une autre méthode d’estimation du CFO en utilisant les pilotes est proposée par Classen [10]. Dans cette technique, deux symboles OFDM sont transmis  $y_l[k]$  et  $y_{l+D}[k]$ . Au niveau du récepteur la FFT est effectuée et les pilotes sont extraits. La figure 2.9 montre une structure des pilotes utilisée pour l’estimation du CFO.

Le CFO global estimé et donné par les équations (2.19) et (2.20) [1] :

$$cfo_{coar} = \frac{1}{2\pi \cdot T_{sub}} \max \left\{ \left| \sum_{j=0}^{L-1} Y_{l+D}[p[j], cfo] Y_l^*[p[j], cfo] X_{l+D}^*[p[j] X_l[p[j]]] \right| \right\} \quad (2.19)$$

Où  $D$ ,  $N_p$ ,  $p[j]$  et  $X_l[p[j]]$  désignent le nombre de répétitions des symboles transmis, le fine CFO est estimée par :

$$cfo_{fine} = \frac{1}{2\pi \cdot T_{sub} \cdot D} \max \{ \left| \sum_{j=0}^{L-1} Y_{l+D}[p[j], cfo_{coar}] Y_l^*[p[j], cfo_{coar}] X_{l+D}^*[p[j] X_l[p[j]]] \right| \} \quad (2.20)$$

Le CFO final représente la somme du  $CFO_{coar}$  et du  $CFO_{fine}$ .

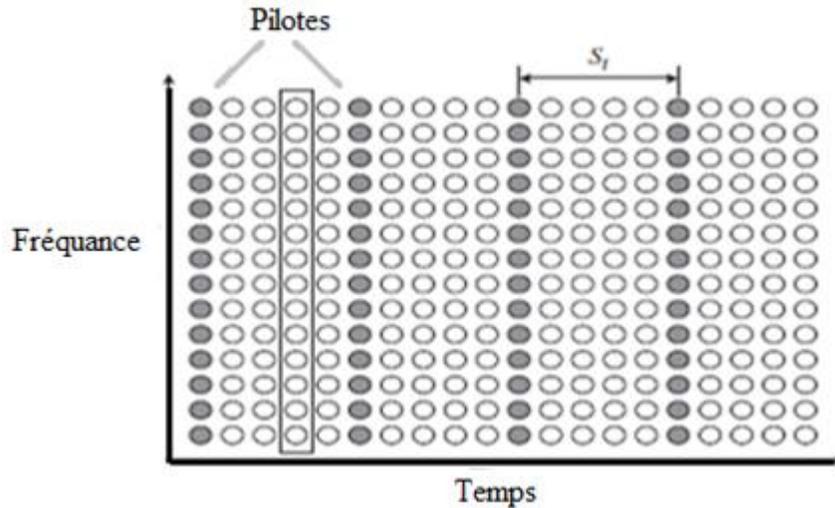


Figure 2.9 : Structure d'arrangement des pilotes de type bloc [1]

## 2.7 Conclusion

La synchronisation est l'un des sujets de recherche fondamentale dans le système OFDM en raison de sa sensibilité aux erreurs de temps et de la fréquence. En fait, le décalage temporel (STO) et le décalage de la fréquence porteuse (CFO) peuvent affaiblir considérablement le rendement des systèmes OFDM. En particulier, une synchronisation de temps incorrecte peut provoquer des interférences entre les symboles successifs. Si elle n'est pas parfaitement compensée avant le processus d'égalisation elle peut entraîner une grave dégradation des performances du système. Le décalage fréquentiel provoque aussi des interférences entre symboles (ISI) et entre porteuses (ICI) en détruisant l'orthogonalité des sous-porteuses. Pour cela une étude liée à ces deux problèmes a été présentée dans ce chapitre. Des algorithmes d'estimation du STO et CFO ont été présentés afin de remédier aux effets des problèmes de synchronisation sur les signaux OFDM.

Dans le chapitre suivant, nous allons simuler les algorithmes d'estimation présentés dans ce chapitre.

---

## **Chapitre 3 :**

# **Simulations & Présentations des résultats**

---

### 3.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la simulation des problèmes du décalage temporel (STO) et du décalage fréquentiel (CFO) étudiés au chapitre II. Les effets de ces deux problèmes majeurs introduits par le canal de transmission sur les signaux OFDM sont étudiés et commentés.

### 3.2 Simulation du décalage temporel (STO) en utilisant le préfixe cyclique (CP)

Dans cette partie nous estimons le décalage temporel STO avec un Préfixe cyclique CP. En utilisant deux techniques d'estimation du CP, la première basée sur la corrélation maximale entre le CP et sa partie correspondante du symbole OFDM et la deuxième technique basée sur la différence minimum entre le CP et sa partie correspondante du symbole OFDM. Les paramètres du système OFDM utilisés dans la simulation sont :

Paramètres	Spécification
Taille de la FFT	128
Modulation	4-QAM
Type du Canal	AWGN
Taille Totale (FFT+CP)	160
Taille du CP	32
Décalage temporel (STO)	02
Décalage de la fréquence porteuse (CFO)	0 et 0.5

**Tableau 3.1** : Paramètres de simulation du décalage temporel (STO)

La figure 3.1 montre les résultats d'un décalage temporel (STO) avec les deux méthodes d'estimation du CP, sans présence du décalage fréquentiel (CFO). En l'absence de ce dernier, On remarque que les deux méthodes donnent la même estimation. En effet la méthode de différence donne zéro qui correspond au maximum pour la méthode de corrélation.

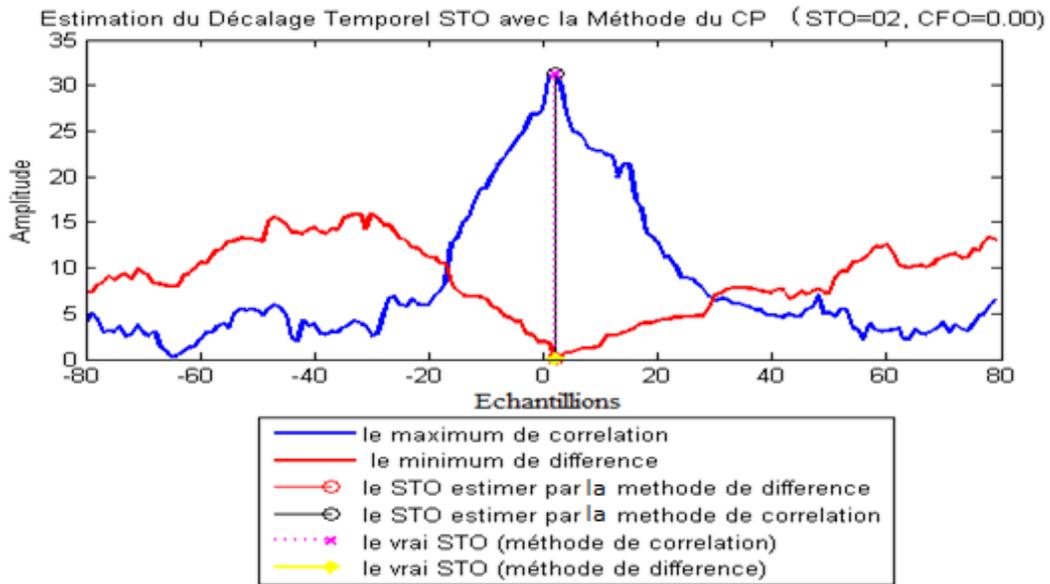


Figure 3.1 : Estimation du STO en absence du CFO

La figure 3.2 montre que le décalage temporel (STO) en présence du CFO=0.5 est décalé parce que l'estimation du STO est affecté par le CFO mais uniquement dans le cas de la méthode de corrélation (voir equations 2.13 et 2.14).

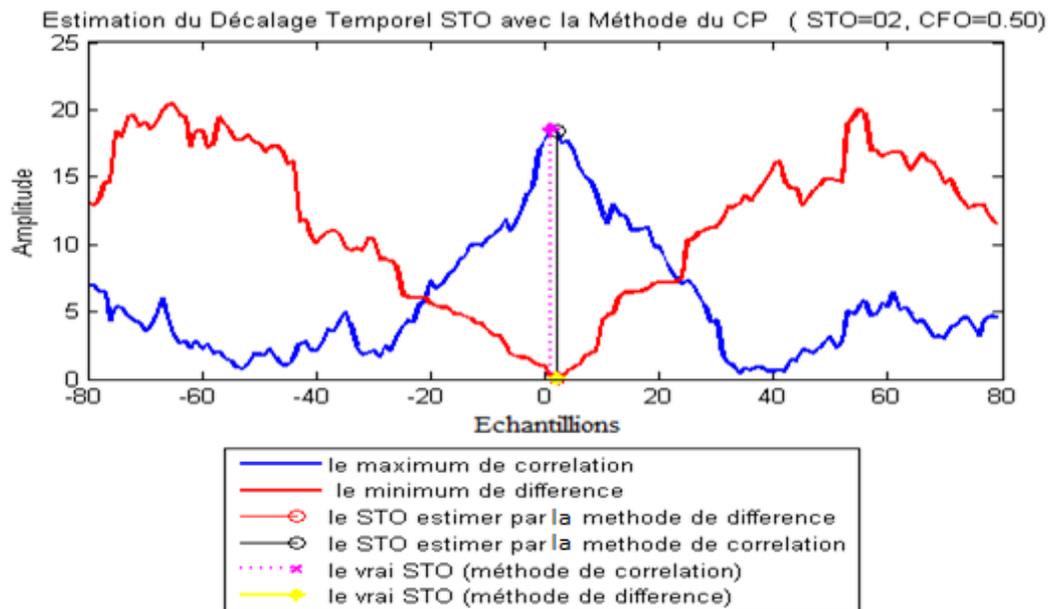


Figure 3.2 : Estimation du STO en présence du CFO

### 3.2.1 Conclusion

Nous avons analysé dans cette partie l'effet du décalage temporel (STO) en utilisant la méthode du CP (préfixe cyclique). Les résultats de cette simulation montrent que la méthode du préfixe cyclique CP est basée sur deux techniques, soit sur la corrélation maximale entre le CP et sa copie correspondante dans le symbole OFDM, ou sur la différence minimale quadratique entre le CP et sa copie. Les résultats montrent que le décalage fréquentielle CFO provoque des perturbation sur l'estimation du décalage temporel (STO) dans la méthode basée sur le maximum de corrélation. Finalement on peut conclure que la méthode de CP basé sur la différence quadratique minimale est la meilleur technique d'estimation du décalage temporel (STO) en présence du CFO.

### 3.3 Simulation du décalage fréquentiel (CFO)

Dans cette partie nous allons estimer le décalage fréquentielle (CFO) en utilisant trois méthodes différentes : la méthode du Préfix Cyclique (CP), la méthode de Moose (préambules) et celle de Classen (pilotes).

#### 3.3.1 L'effet du préfixe cyclique (CP) sur le décalage fréquentiel (CFO)

Dans cette section nous allons voir l'effet de la longueur du préfixe cyclique sur la valeur de l'erreur quadratique moyenne (MSE) entre le CP et sa partie correspondante du symbole OFDM en présence du CFO. Les paramètres utilisés dans la simulation sont indiqués dans le tableau 3.2

Paramètres	Spécification
Taille de la FFT	128
Modulation	4-QAM
Canal	AWGN
Taille totale (FFT+CP)	160
Taille du CP	Nfft/2, Nfft/4, Nfft/8, Nfft/16, Nfft/32
Nombre d'itérations	50
CFO	0.15
Nombre blocs	50

**Tableau 3.2:** Paramètres de simulation du CP sur le CFO

Les résultats de la simulation sont représentés sur la figure 3.3 pour les différentes longueurs du CP. On constate que le MSE diminue avec l'augmentation de la longueur du CP. La longueur  $N_{fft}/2$  du CP donne de meilleurs résultats.

Pour des raisons de rendement du système OFDM on prendra  $N_{fft}/4$  comme longueur du CP pour la prochaine simulation vue que le MSE obtenu pour cette valeur est proche de celle  $N_{fft}/2$ .

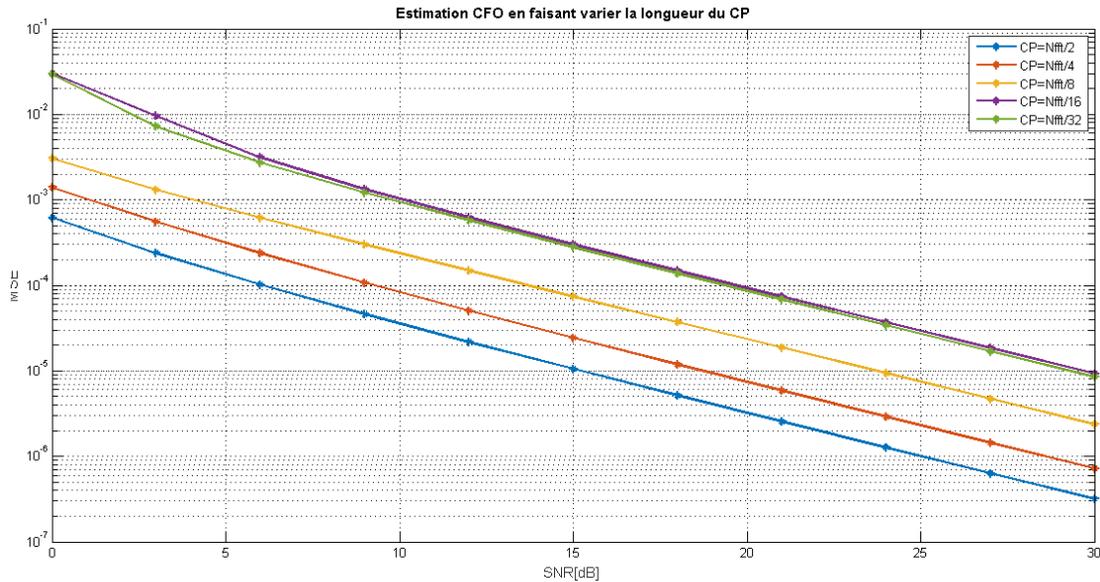


Figure 3.3: l'estimation du décalage fréquentiel dans la méthode basse sur CP

### 3.3.2 L'effet des itérations dans la technique de Moose sur le MSE

Les paramètres utilisés dans la simulation sont indiqués dans le tableau 3.3 suivant :

Paramètres	Spécification
Taille de la FFT	128
Modulation	4-QAM
Canal	AWGN
Taille totale (FFT+CP)	160
Taille du CP	32
Nombre d'itérations	10 jusqu'à 50
CFO	0.15
Nombre de Blocs	50

Tableau 3.3 : Paramètres de simulation de l'effet des itérations sur le MSE

Les résultats de cette simulation sont illustrés dans la figure (3.4). On constate que l'erreur quadratique moyenne (MSE) diminue avec l'augmentation de nombre d'itérations.

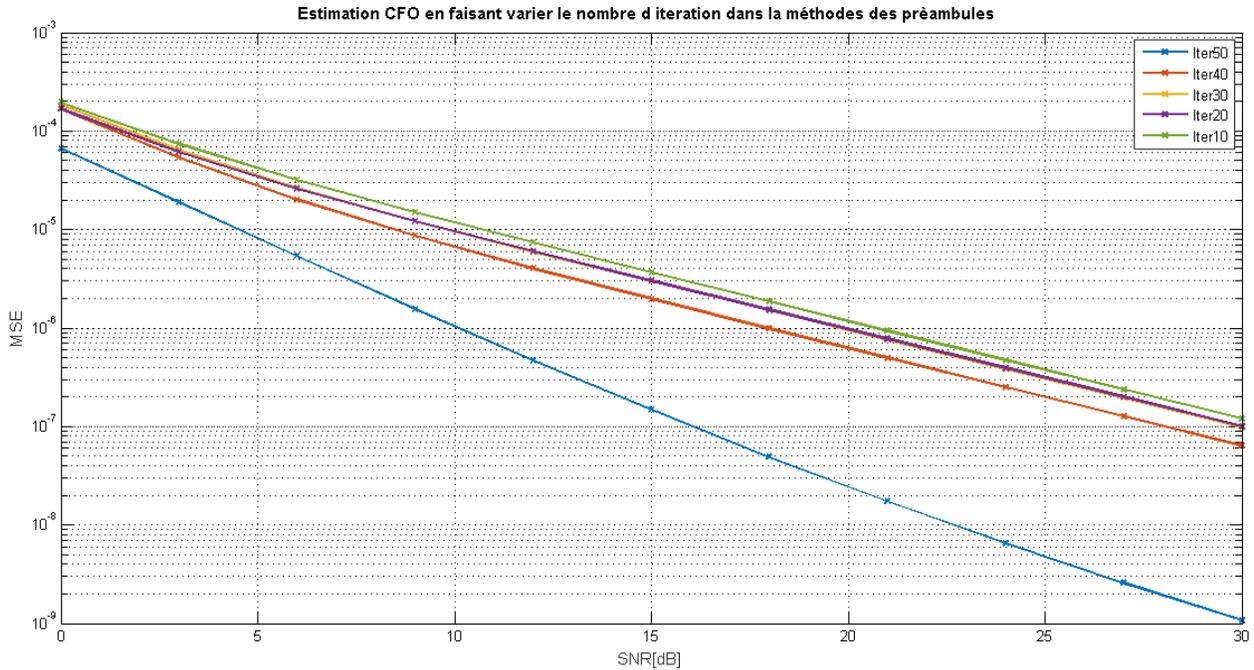


Figure 3.4: l'estimation CFO en variant le nombre itérations dans la méthode des préambules

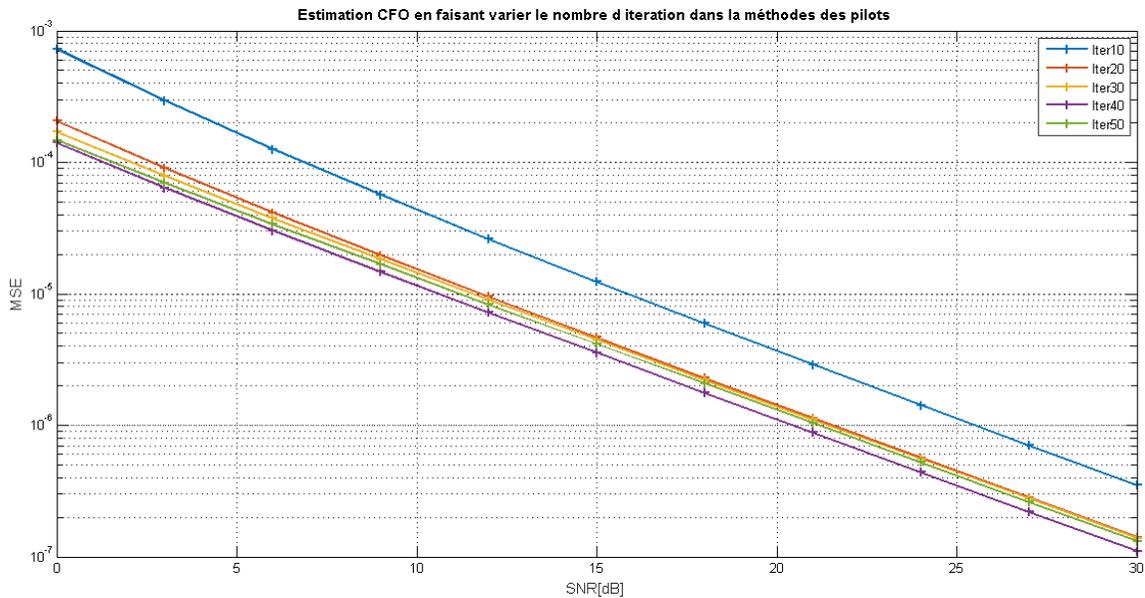
### 3.3.3 L'effet des itérations dans la technique de Classen sur le MSE

Les paramètres utilisés dans la simulation sont indiqués dans le tableau 3.4 suivant :

Paramètres	Spécification
Taille de la FFT	128
Modulation	4-QAM
Canal	AWGN
Taille totale (FFT+CP)	160
Taille du CP	32
Nombre d'itérations	10 jusqu'à 50
CFO	0.15
Nombre de Blocs	50

Tableau 3.4 : Paramètres de simulation du décalage fréquentiel (CFO) en variant le nombre itérations

Les résultats de cette simulation sont illustrés dans la figure 3.5. On constate ici aussi que l’erreur quadratique moyenne (MSE) diminue avec l’augmentation de nombre d’itérations.



**Figure 3.5** : l’estimation en variant le nombre itération dans la méthode des pilotes

Pour des raisons qu’on ne peut expliquer, un meilleur résultat est obtenu pour un nombre d’itération égale à 40 au lieu de 50.

### 3.3.4 L’effet du CFO sur le MSE

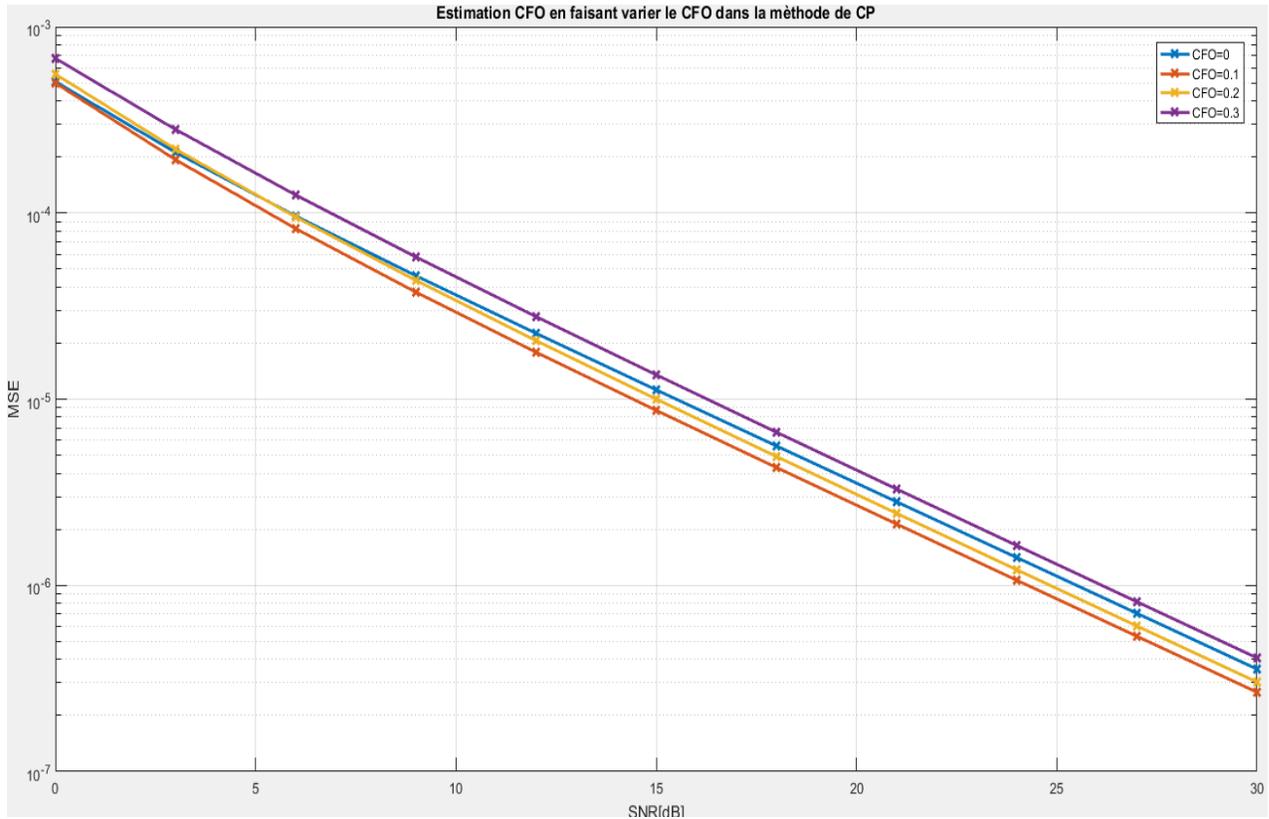
Les paramètres utilisés dans la simulation sont indiqués dans le tableau 3.5 suivant :

Paramètres	Spécification
Taille de la FFT	128
Modulation	4-QAM
Canal	AWGN
Taille totale (FFT+CP)	160
Taille du CP	Nfft/4
Nombre d’itérations	50
CFO	0 :0.1 :0.3
Nombre de Blocs	50

**Tableau 3.5** : Paramètres de simulation de l’effet du CFO sur le MSE

**a- Méthode CP**

Les résultats de cette simulation sont illustrés dans la figure 3.6. On constate que l'erreur quadratique moyenne (MSE) diminue avec la diminution du CFO.



**Figure 3.6** : L'influence de MSE en variant le CFO dans la méthode de CP

**b- Méthode de Moose (préambules)**

Les résultats de cette simulation sont illustrés dans la figure 3.7. On constate ici aussi que l'erreur quadratique moyenne (MSE) diminue avec la diminution du CFO.

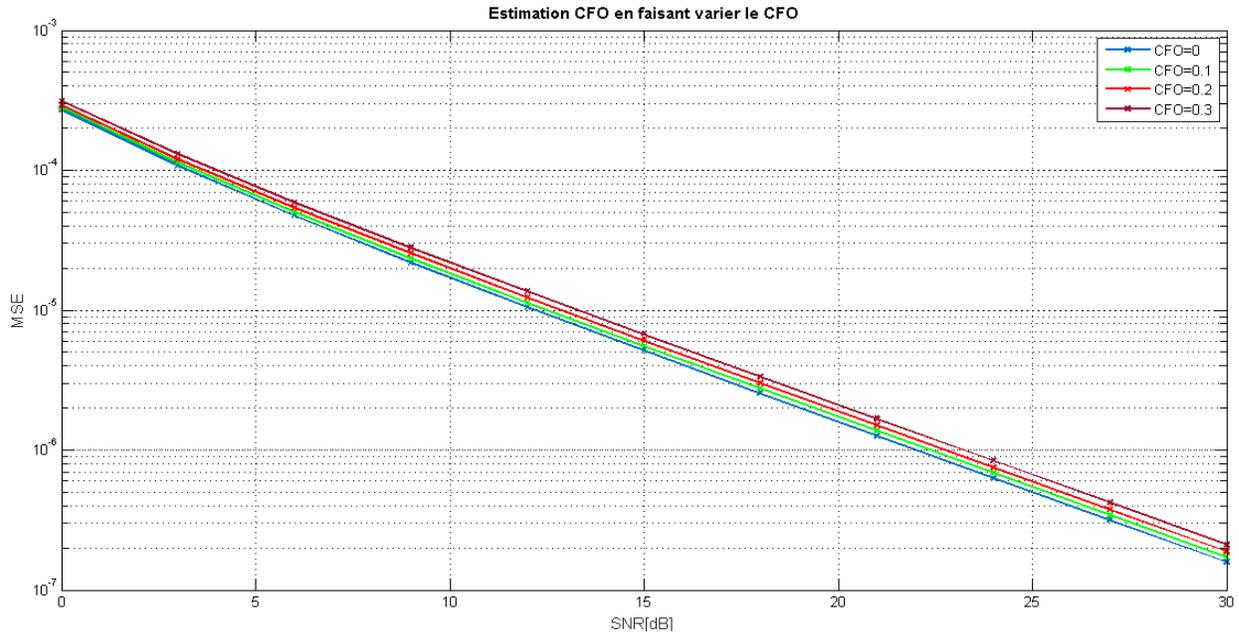


Figure 3.7: L'influence de MSE en variant l'effet du CFO dans la méthode de MOOSE (les préambules)

c- Méthode de Classen (pilotes)

Les résultats de cette simulation sont illustrés dans la figure 3.8. On constate ici aussi que l'erreur quadratique moyenne (MSE) diminue avec la diminution du CFO.

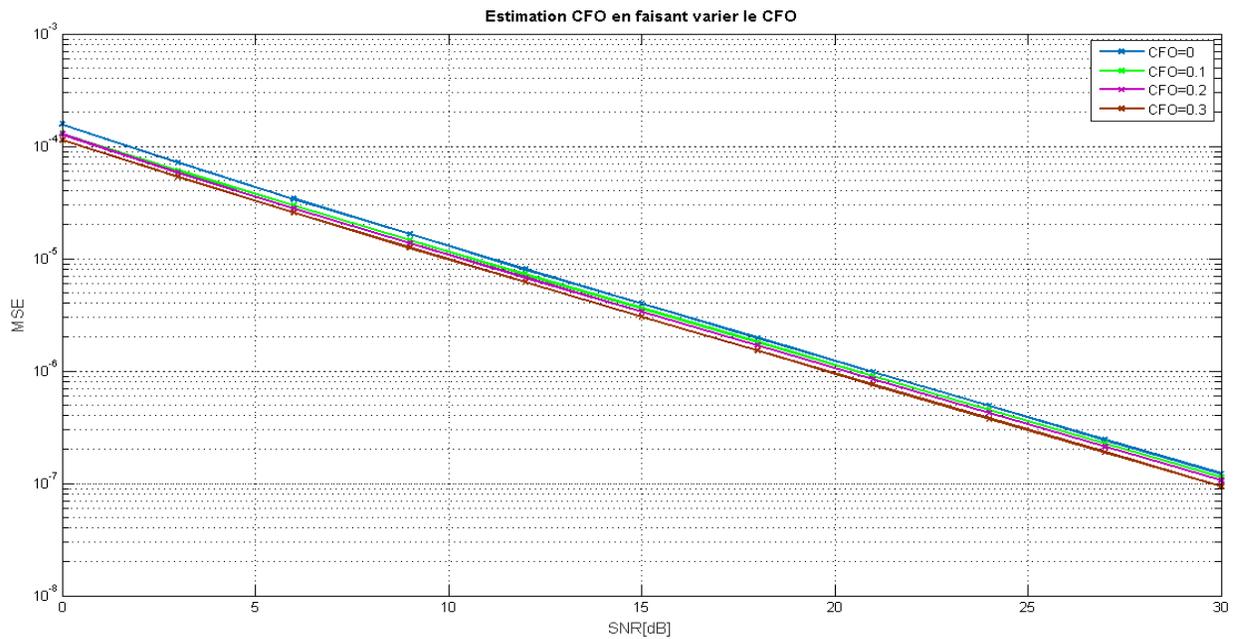


Figure 3.8 : L'influence de MSE en variant l'effet du CFO dans la méthode de Classen (les pilotes).

**Remarque :** Pour les trois méthodes d'estimations on remarque qu'en augmentant le CFO de 0 à 0.3 la performance du MSE se dégrade.

#### d- Comparaison des trois méthodes

Pour comparer les trois méthodes, on choisit la valeur du CFO égale à 0.3 qui donne une valeur de MSE élevée afin de voir le meilleur résultat parmi les trois. Les paramètres utilisés dans la simulation sont indiqués dans le tableau 3.6 suivant :

Paramètres	Spécification
Taille de la FFT	128
Modulation	4-QAM
Canal	AWGN
Taille totale (FFT+CP)	160
Taille du CP	$N_{fft}/4$
Nombre d'itérations	50
CFO	0.3
Nombre de Blocs	50

**Tableau 3.6:** Paramètres de simulation de comparaison des méthodes d'estimation du CFO

Les résultats de la simulation sont illustrés sur la figure (3.9). Nous constatons que la méthode de classen (pilotes) donne le meilleur résultat vis à vis du MSE pour estimer le CFO. La méthode basée sur le CP est la moins performante.

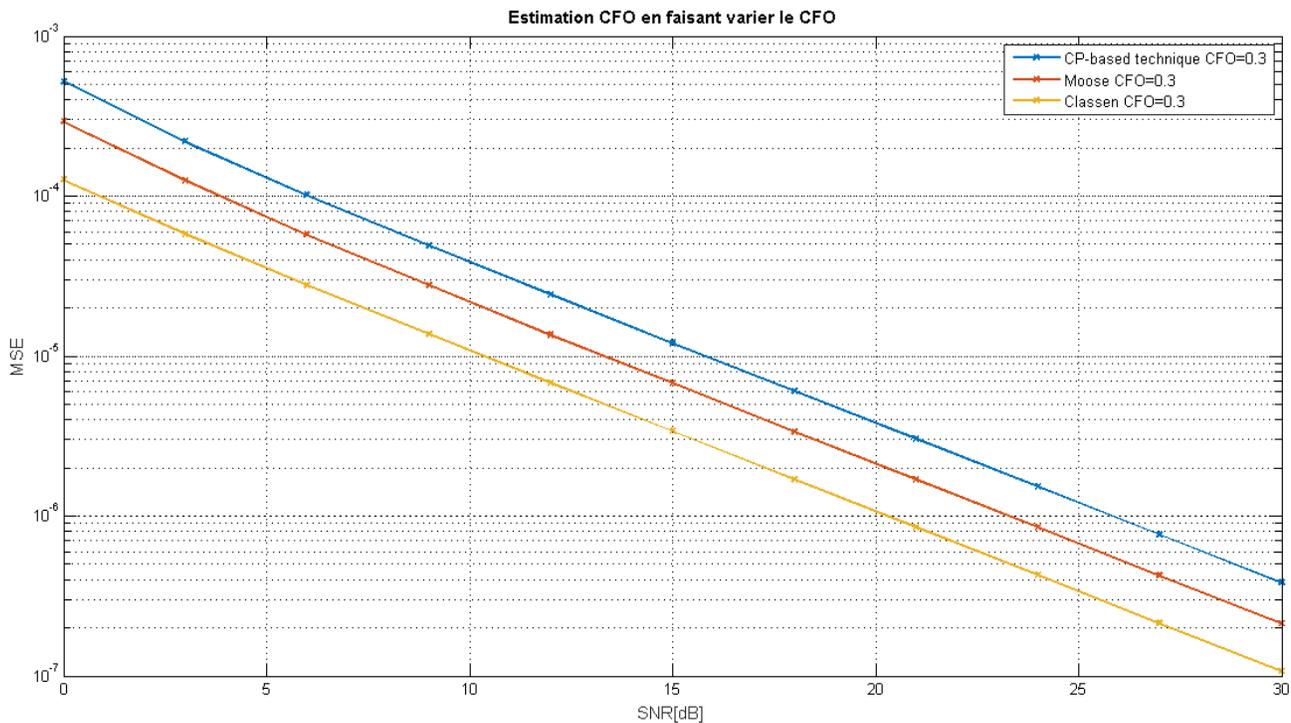


Figure 3.9 : l'effet du CFO avec les trois méthodes

### 3.3.5 Conclusion

Nous avons analysé dans cette section l'effet du décalage fréquentielle (CFO) dans un système OFDM. Nous avons utilisé trois techniques à savoir la méthode CP Classen et Moose pour estimer ce problème de décalage.

Les résultats de simulation montrent que d'après la première simulation la longueur du CP joue un rôle important car quand on augmente le CP l'erreur augmente. Dans la deuxième simulation, on a constaté que lorsque le nombre d'itérations augmente la valeur de MSE diminue dans la méthode de MOOSE (préambules) et CLASSEN. Enfin nous avons vu que la valeur du CFO est très importante car il influence directement sur la performance du MSE.

Les résultats des différentes simulations montrent que la méthode de Classen basée sur les pilotes donne de meilleurs résultats pour estimer le décalage fréquentiel (CFO) dans la technique OFDM.

### 3.4 L'effet du décalage fréquentiel CFO sur le BER

Dans cette section nous étudions l'effet du décalage fréquentiel CFO sur le BER dans les systèmes OFDM.

Les paramètres utilisés dans la simulation sont indiqués dans le tableau 3.7 ci-dessous :

Paramètres	Spécification
Taille de la FFT	256
Modulation	4-QAM
Canal	AWGN
Taille du CP	16
Taille totale (FFT+CP)	272
Nombre sous porteuse	256
CFO	0 :0.05 :0.2 (de 0 jusqu'à 0.2 avec un pas de 0.05)

**Tableau 3.7** : Paramètres de simulation du BER avec un décalage fréquentiel

La figure 3.10 nous montre l'effet du décalage de la fréquence porteuse (CFO) sur le BER.

Nous remarquons que le BER se dégrade en augmentant le CFO.

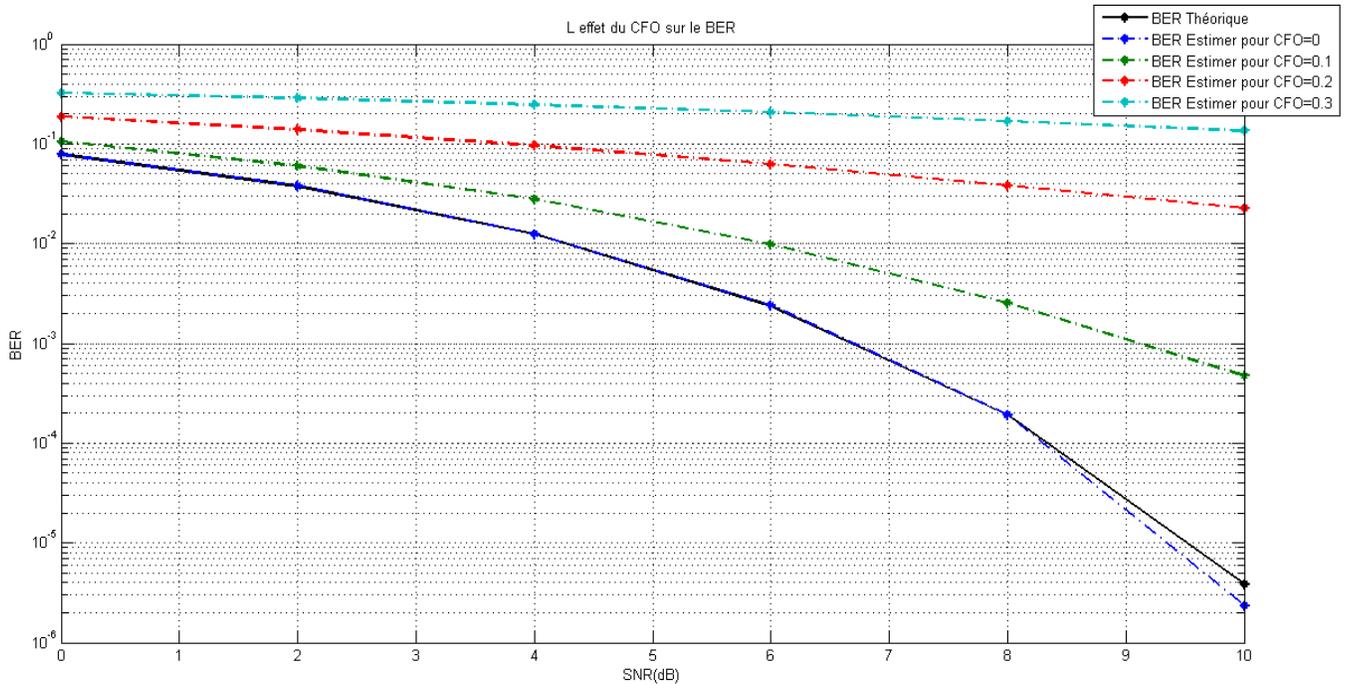


Figure 3.10: l'effet du CFO sur le BER

### 3.5 L'effet du CFO sur la constellation

Dans cette partie on va voir l'effet du CFO sur la constellation dans les systèmes OFDM.

Les paramètres utilisés dans la simulation pour étudier l'effet du CFO sur la constellation dans les systèmes OFDM sont indiqués dans le tableau 3.8 :

Paramètres	Spécification
Taille de la FFT	128
Modulation	4-QAM
Canal	AWGN
Taille du CP	32
Taille Total (CP + FFT)	160
Nombre de blocs	100
CFO	0,0.1,0.4

**Tableau 3.8** : Paramètres de simulation de la constellation avec un décalage fréquentiel

La figure (3.11) montre que pour la valeur nulle du CFO nous obtenons la constellation originale 4-QAM. Les figures (3.12) et (3.13) montrent que l'augmentation de la valeur du CFO engendre une rotation dans la constellation. Ce phénomène pose un problème de détection des vrais symboles de la modulation.

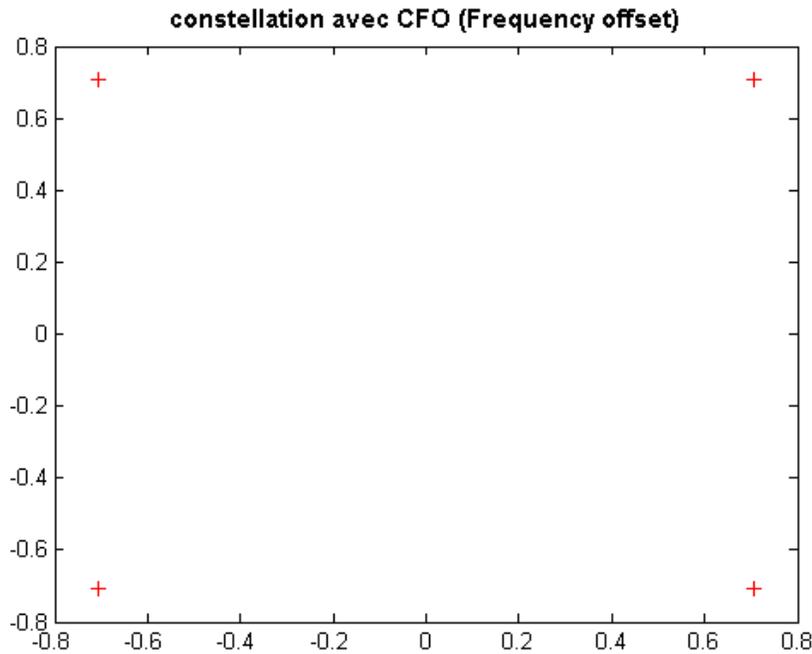


Figure 3.11: Constellation pour CFO égale à 0

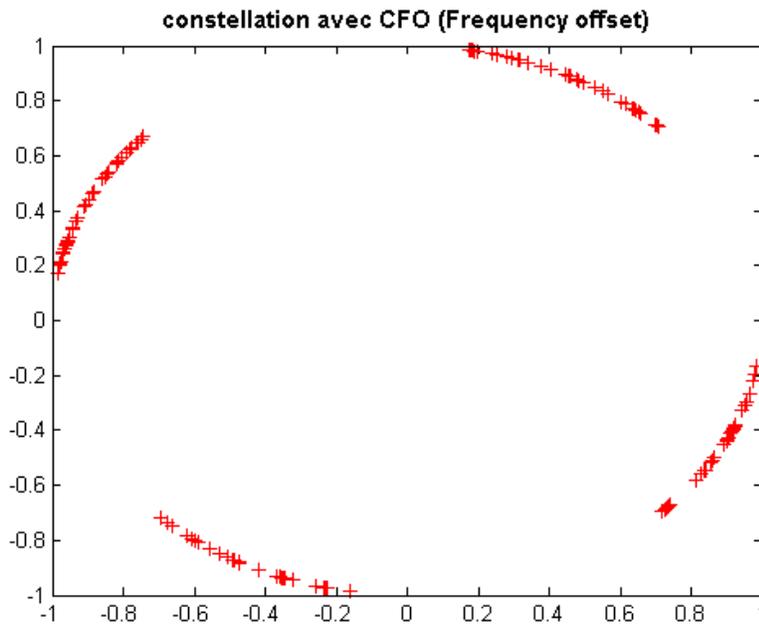
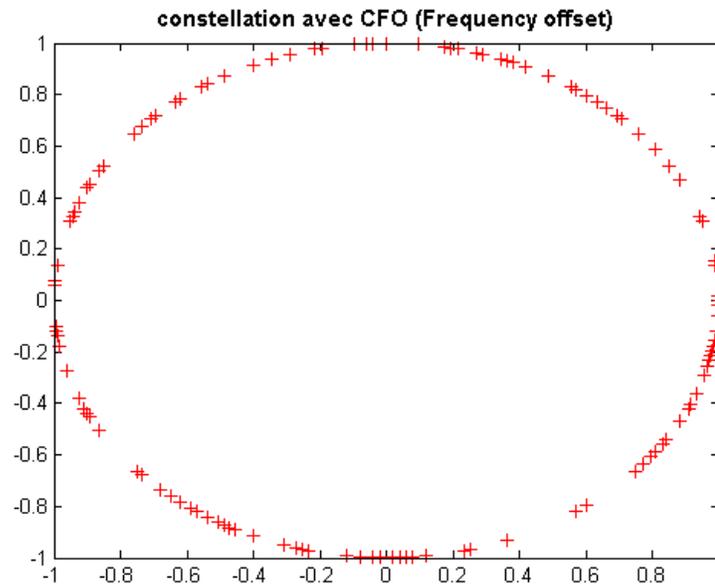


Figure 2.12: Constellation pour CFO=0.1



**Figure 3.13:** Constellation pour CFO=0.4

Nous avons analysé dans la première section l'effet du décalage fréquentiel (CFO) sur le BER. Les résultats de simulation montrent que le CFO influe sur le BER, en augmente le CFO l'erreur augmente, dans la seconde section nous avons constatés que le CFO détruit la constellation, lorsque le CFO augmente la constellation devient circulaire ce qui pose un grand problème de détection des vrais symboles de la modulation.

### 3.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié dans la première partie deux méthodes d'estimation du décalage temporel (STO) et nous avons constaté que la méthode du minimum de différence quadratique est la meilleure par rapport à la méthode de corrélation pour estimer le décalage temporel sans être affecté par le décalage fréquentiel qui pose aussi un grand problème.

Dans la deuxième partie nous avons étudié l'effet du décalage de la fréquence porteuse CFO sur la performance de MSE, en comparant les trois méthodes CP, MOOSE et CLASSEN. Les résultats montrent que la méthode de Classen basée sur les pilotes est la meilleure pour estimer le décalage fréquentiel. Ensuite nous avons étudié l'effet destructif du CFO sur le BER. En dernier lieu nous avons vu l'effet du CFO sur la constellation du signal qui provoque une rotation dans le domaine fréquentiel.

Finalement nous constatons que le décalage temporel et fréquentiel influent énormément sur les performances de la technique OFDM.

### Conclusion général

Les Télécommunications font partie des technologies qui ont révolutionné notre mode de vie. L'augmentation des besoins en débit se heurte à la nature des canaux qui sont de type multitrajets dans plusieurs applications. L'influence de ces canaux sur le signal augmente avec le débit de transmission. La technique de modulation multiporteuses (OFDM) apporte une solution à ce problème qui permet d'un côté de lutter contre les perturbations qu'entraînent les canaux multitrajets, d'un autre côté d'améliorer l'efficacité spectrale ou capacité des systèmes. Le plus grand Inconvénient de l'OFDM est la sensibilité aux problèmes des erreurs de synchronisation en fréquence et en temps. Donc il faut trouver une solution pour combattre l'effet du décalage temporel (STO) et le décalage fréquentiel (CFO) tout en gardant la modulation multiporteuse OFDM. Dans ce projet de fin d'études, nous nous sommes intéressés aux erreurs de synchronisation dans le système OFDM et les techniques d'estimations pour résoudre ce problème.

Dans le premier chapitre nous avons présenté les problèmes que rencontre la transmission à débit élevé. Ensuite nous avons présenté la modulation OFDM et son principe de fonctionnement, et on s'est intéressé aux caractéristiques propres à cette modulation.

Dans le second chapitre nous nous sommes intéressés aux erreurs de synchronisation dans le système OFDM. Nous avons présenté l'effet du décalage temporel (STO) et le décalage fréquentiel (CFO) qui provoquent des interférences entre symboles (ISI) et entre porteuses (ICI). Ensuite nous avons étudié la méthode basée sur le préfixe Cyclique (CP) pour estimer le STO. Pour l'estimation du CFO, nous avons utilisé les méthodes du (CP), MOOSE (les préambules) et CLASSEN (les pilotes).

Dans le troisième et dernier chapitre nous avons réalisé différentes simulations sous le logiciel MATLAB. En ce qui concerne l'estimation du STO nous avons constaté que la méthode du minimum de différence quadratique donne de meilleurs résultats par rapport à la méthode de corrélation. Les différentes simulations réalisées pour l'estimation du CFO en utilisant les méthodes de CP, MOOSE et CLASSEN montrent que la méthode de CLASSEN donne de meilleurs résultats.

Nous avons aussi étudié l'effet du CFO sur le BER ainsi que sur constellation. Nous avons constaté que le BER augmente avec l'augmentation du CFO. Nous avons aussi constaté que le CFO provoque une rotation de la constellation du signal modulé dans le domaine fréquentiel. Ce travail nous a permis de mieux cerner les problèmes inhérents à la modulation multiporteuses OFDM et surtout l'effet du décalage temporel et fréquentiel.

### Références Bibliographique

- [1] Yong Soo Cho, Jaekwon Kim et al, "MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB", Wiley editorial Offices,2010.
- [2] Tzi-Dar Chiueh et al, "Baseband receiver design for wireless MIMO-OFDM communications", Springer edition, Singapore, 2012.
- [3] Mathuranathan, 27June, 2011,"Introduction-to-ofdm-orthogonal-frequency-division-multiplexing-part-3",<https://www.gaussianwaves.com/2011/06/introduction-to-ofdm-orthogonal-frequency-division-multiplexing-part-3/>, site consulter le 30 Mars 2019.
- [4] Brijesh Kumar et al, "A review paper on Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)", International Journal of Scientific & Engineering Research, Vol 6, Issue 2, February-2015.
- [5] Meliani Hamza, "Les Applications de l'OFDM, Techniques d'accès multiple, Cours Communications Numériques Avancées (CNA)", Université Blida, 2017-2018.
- [6] Sukhpal Singh, Harmanjot Singh, "Review paper on OFDM-Concepts and applications", International Journal of Engineering Development and Research, Vol 3, Issue 3, Patiala India, 2015.
- [7] Ahmad RS et al, "Multi-Carrier digital communications theory and applications of OFDM", Springer edition, Boston, 2004.
- [8] Praween Kumar Nishad, "Carrier Frequency Offset Estimation in MIMO-OFDM Systems", these Master en Communication et Traitement de signal, Institut de Technologies Rourkela India, 2013.
- [9] Saeed Mohseni et Mohammad Matin, "Study of the sensitivity of the OFDM wireless systems to the carrier frequency offset (CFO)", International Journal of Distributed and Parallel Systems Vol.4, No.1, January 2013.
- [10] Abdul Gani Abshir et al, 'A Comparative Study of Carrier Frequency Offset (CFO) Estimation techniques for OFDM systems', IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering, Vol 9, Jul – Aug 2014.