



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



## **Université Amar Thelidji- Laghouat**

**FACULTE: DE TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT : D'ELECTRONIQUE**

### **MEMOIRE DE MASTER**

**Réalisé par : BEN AOUISSA MOHAMED**

**BELAGHIT ABDELLFETTAH**

**SECTION : Technologie**

**DOMAINE : Technologie**

**FILIERE : Technologie**

**OPTION : System De Telecommunication.**

### **Thème**

## **Les Différentes Formes d'Ondes Candidates pour les Systèmes de Télécommunications 5G**

### **Jury de soutenance :**

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
Mokhtaria Mesri	Professeur	Encadreur
M. Reguigue	MCA	Président
M. Seghier	MCA	Examineur

**Promotion : 2020/2021**

# *Remerciement*

**Nous tenons particulièrement à remercier Dieu Tout-Puissant pour ce travail, qui n'aurait pas été possible sans son soutien, sa force, son aide et sa bénédiction.**

**Nous envoyons nos remerciements :À nos chers parents qui n'ont jamais cessé de nous apporter tout leur soutien, nous les remercions également de nous avoir guidés sur le bon chemin, et de nous avoir apporté tout le soutien et l'amour dont nous avons besoin pour être qui nous sommes aujourd'hui.**

**Nous remercions les encadreurs religieux qui nous ont soutenus et soutenus dans la réalisation de cette note:Les humbles et joyeux Dr Mokhtaria MESRI , Dr Marah Houssein et Dr:Bouaziz Samir et Leurs précieux conseils et leur assistance tout au long de la période de travail et nous demandons à Dieu de leur accorder le succès et de prolonger leur vie.er Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres du jury pour avoir accepté la discussion de cette note**

**Nous remercions chaleureusement nos professeurs et professeurs qui nous ont enseignés et soutenus tout au long de nos études, du niveau élémentaire au niveau intermédiaire et enfin au niveau universitaire. Grâce à eux, nous n'aurions pas abouti à des directives, des recommandations et à des connaissances morales, littéraires et scientifiques acquises qui ont contribué et ont été la clé pour continuer sur cette voie. Pour leur plein intérêt à communiquer la science selon la bonne méthode:chefDépartement: DR: MarahLahcen;Et n'oublie pas les autres:Dr: Saadi ramdani;et Dr:regueb Ilyes et Dr:Biran mouhoub et Dr Bouzidi Med et Dr: seghier ABDLK et Dr: tedjani Nassima et Et d'autres dont nous ne nous souvenions pas, nous leur souhaitons le meilleur et le bien-être.**

**Nous souhaitons également le meilleur à nos collègues dans le domaine des communications filaires et sans fil, et nous demandons à Dieu de leur accorder le succès dans le présent, le présent et ce qui est à venir.**

**Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont été directement ou indirectement impliquées dans la réalisation de ce travail.**

## ملخص:

تحظى أنظمة الراديو المحمولة من الجيل الخامس باهتمام متزايد من الباحثين والمشغلين في السنوات الأخيرة. تعد تقنية 5G بثورة. وسيتيح عرض النطاق الترددي الأكبر وأوقات الكمون المنخفضة للغاية تطوير خدمات جديدة وتحسين الأنظمة الحالية. يمثل تطوير ونشر هذه الشبكات تحديات كبيرة. يتضمن تنفيذ مثل هذا المعيار بالضرورة تطوير تقنيات رئيسية جديدة لتلبية متطلبات شبكات الجيل الخامس. يعد تطوير أشكال موجات ما بعد OFDM أحد مجالات التحقيق التي بدأها الباحثون لتلبية متطلبات 5G.

شكل الموجة هو عنصر أساسي في جميع تقنيات الاتصالات، وهو أحد مفاتيح أنظمة الاتصالات المستقبلية. الهدف الرئيسي والأساسي من هذه المذكرة، هو دراسة وعمل مقارنة لثلاثة من أشكال الموجة المرشحة للطبقة الفيزيائية للجيل الخامس من الاتصالات 5G أولاً، قمنا بدراسة نظرية للموجات المرشحة والتي هي كالتالي UPMC, FBMC, OFDM وبعدها، قمنا بعمل محاكاة بمساعدة المحاكى MATLAB. النقاط الرئيسية والتي تم التركيز والعمل عليها في هذه المذكرة هي كالتالي: أولاً، دراسة نظرية لكل شكل موجي لوحده والتعريف بسلسلة الإرسال وشرحها وتبيان العمل الأساسي لها، استخراج سلبيات وإيجابيات كل منها على حده. وبعدها، تحليل البيانات المتحصل عليها من المحاكاة والمتمثلة في: كثافة الطاقة الطيفية (DSP)، نسبة الطاقة من الذروة إلى المتوسط (PAPR)، معدل الخطأ والمعروف ب BER والذي يقاس بدلالة نسبة الإشارة إلى نسبة الضوضاء SNR ولا ننسى الإرسال خارج النطاق الترددي أو ما يصطلح عليه O.O.B وفي الأخير قمنا بمقارنة النتائج المحصل عليها واختيار من الأنسب للاستعمال في الجيل الخامس.

**الكلمات المفتاحية:** 5G, BER , DSP , FBMC ,OFDM, OOB , PAPR , SNR , UPMC

## Résumé :

Les systèmes radio mobiles de 5<sup>ème</sup> génération attirent de plus en plus l'attention des chercheurs et des opérateurs ces dernières années. La technologie 5G promet une révolution, une plus grande bande passante et des temps de latence extrêmement faibles permettront de développer de nouveaux services et l'amélioration des systèmes existants. Le développement des formes d'onde poste-OFDM, est l'un des champs d'investigations entamées par les chercheurs pour répondre aux exigences de la 5G.

La forme d'onde est une composante essentielle de toute technologie de communication, elle est l'une des clés des future systèmes de télécommunication. L'objectif de ce travail est d'étudier et de comparer trois formes d'onde (F.O) candidates pour la couche physique 5G. Pour cela, nous commençons par étudier théoriquement ces F.O, puis nous effectuons des simulations avec le logiciel MATLAB. Les principaux points de notre travail sont : Premièrement l'étude du principe de fonctionnement de chaque forme d'onde et la mise en place de la chaîne de simulation. Ensuite, analysé la densité spectrale de puissance (DSP), le facteur de crête (PAPR), le rayonnement hors bande et l'analyse du taux d'erreur binaire. Enfin, une comparaison des résultats pour une jugé la meilleure forme d'onde.

**Mots clés :** 5G, BER , DSP , FBMC ,OFDM, OOB , PAPR , SNR , UPMC.

## **Abstract:**

5th generation mobile radio systems have been attracting more and more attention from researchers and operators in recent years. 5G technology promises revolution, greater bandwidth and extremely low latency times will make it possible to develop new services and improve existing systems. The development of post-OFDM waveforms is one of the fields of investigation initiated by researchers to meet the requirements of 5G.

The waveform is an essential element in all communications technologies, and it is one of the keys to future communications systems. The main and primary objective of this note, is to study and compare three candidate waveforms for the physical layer of the fifth generation of 5G communications. First, we study the theory of the candidate waves, which are as follows UFMC. Then, we did simulations with the help of emulator. MATLAB. The main points that have been focused and worked on in this memo are as follows: First, a theoretical study of each waveform alone, the definition of the transmission chain, its explanation and its basic work, extracting the pros and cons of each one separately. Then, analyze the data obtained from the simulations, which are represented in: Spectral Power Density (DSP), Peak to Mean Power Ratio (PAPR), Error Rate Known as BER, which is measured in terms of SNR, not forgetting the transmission outside the bandwidth or what is termed It is OOB and in the end we compared the results obtained and chose the most suitable for use in the fifth generation.

**Keywords:** 5G, BER , DSP , FBMC ,OFDM, OOB , PAPR , SNR ,UFMC.

## Sommaire :

### *INTRODUCTION GENERALE* .....17.

#### *Chapitre 1 : GENERALITES SUR LE 5G*

1.1 Introduction .....	19
1.2 L'histoire des communications sans fil.....	20
1.3. Évolution... ..	21
1.3.1 Première génération (1G) .....	22
1.3.2. Deuxième génération (2G) .....	22
1.3.3. Troisième génération (3G) .....	23
1.3.4. Quatrième génération (4G) .....	24
1.4. Cinquième génération (5G) .....	26
1.4.1. Objectifs techniques de la 5G .....	27
1.4.2.Familles d'usages et type de services:.....	29
1.4.3.Principales technologies de la 5G:.....	31
1.5. Architecture générale du réseau 5G:.....	33
1.5.1. Architecture Non-Standalone et Standalone.....	33
1.5.2. Architecture et Caractéristiques des User Equipment.....	34
1.5.3. AccèsRadio.....	35
1.5.4. Architecture du cœur 5G.....	42
1.6.Les Différentes Formes d'ondes spécifiques pour la5G.....	44
1.7.Conclusion.....	45

#### *Chapitre 2 : Les Modulation multi-porteuse*

2.1.Introduction.....	46
2.2. Notion de forme d'ondes .....	46
2.3. Classification des formes d'ondes multi-porteuses .....	48
2.4. Modulations multi-porteuses de type OFDM.....	49
2.4.1. Historique.....	49
2.4.2. Problèmes d'interférences.....	50
2.4.3. Du préfixe cyclique .....	50
2.4.4. Notion d'orthogonalité.....	52
2.4.5 La chaine de transmission OFDM.....	55
2.4.6. Principe et fonctionnement de l'OFDM .....	56
2.4.7. Principe de la modulation OFDM.....	57
2.4.8. Principe de la démodulation OFDM.....	58
2.4.9. Implémentation numérique.....	59
2.4.10. Les avantages et les inconvénients de l'OFDM.....	61
2.5. La modulation multi porteuse à base de banc de filtre (FBMC) .....	61
2.5.1. Introduction.....	61
2.5.2. Bancs de filtres:.....	62
2.5.3. Bancs de filtre multi-cadences.....	63
2.5.4. Bancs de filtre modulé.....	66

2.5.5.Principe de fonctionnement de la technique FBMC.....	68
2.5.6. Structure FBMC avec modulation OQAM.....	69
2.5.7. Avantages et inconvénients de la FBMC.....	71
2.6. Les modulations multi-porteuses de type UFMC.....	71
2.6.1.L'émetteur UFMC.....	71
2.6.2. Le récepteur UFMC.....	72
2.6.3 .Les filtres prototypes.....	73
2.6.4 .Les bancs des filtres.....	73
2.6.5. Le filtre FIR Dolph-Tchebyshev.....	75
2.6.6. Le principe de l'UFMC.....	76
2.6.7. Avantages et inconvénients de UFMC.....	77
2.7. Caractéristiques des formes d'ondes multi-porteuses.....	78
2.7.1. Facteur de crête (PAPR).....	78
2.7.2. Rayonnements hors bande (Out Of Band (O.O.B)) .....	78
2.7.3. Taux d'erreur binaire (BER) .....	78
2.7.4. Densité spectrale de puissance (DSP).....	79
2.7.5. Rapport signal bruit (SNR).....	79
2.7.6. Rapport de puissance du canal adjacent (ACPR).....	79
2.7.7. La magnitude du vecteur d'erreur (EVM).....	80
2.7.8.Complementary Cumulative Distribution Function (CCDF).....	81
2.8. Conclusion.....	82

### *Chapitre 3 : Dimensionnement du système multi-porteuses*

3.1. Introduction : .....	83
3.2. Numérologie OFDM évolutive:.....	83
3.2.1.Scalabilité de CP-OFDM pour 5G NR:.....	84
3.3. Exigences des planifications et Dimensions du réseau d'accès 5G NR.....	85
3.3.1. Modélisation de l'environnement d'exploitation en 5G NR.....	85
3.3.2. Modélisation de la propagation radio.....	89
3.3.3.Modélisation du système 5G NR.....	91
3.4.Conclusion.....	94

### *Chapitre 4 : Evaluation et Comparaison de Performances.*

4.1.Introduction.....	96
4.2. Performances de l'OFDM.....	97
4.2.2. Paramètres de simulation.....	98
4.2.2. Résultats des simulations.....	98
4.2.2.1.amplificateur de puissance dans les systèmes de communication .....	98
4.2.2.2.EVM:.....	99
4.2.2.3. Effet sur le spectre:.....	101
4.2.2.4. Effet sur le taux d'erreur binaire.....	102
4.2.2.5 .Performance des méthodes pour la réduction du PAPR :.....	105
4.2.2.6.État de l'art des techniques de réduction du PAPR:.....	106

4.3.Comparaison des formes d'ondes multi porteuses:.....	108
4.3.1.Performances de la FBMC.....	108
4.3.2.Performances de la UFMC.....	109
4.3.3.Paramètres de simulation .....	110
4.3.4. Résultats des simulations.....	110
4.3.4.1Densité spectrale de puissance et OOB.....	110
4.3.4.2.Taux d'erreur binaire.....	112
4.4.Conclusion:.....	113
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE</b> .....	114
<b>Webographie &amp; Bibliographie</b> .....	116

# Liste des figures

## Chapitre 1

<b>Figure 1.1.</b> Évolution de la Technologie sans fil mobile.....	22
<b>Figure 1.2.</b> Évolution vers le 5G.....	26
<b>Figure 1.3.</b> Ce qui est fait aujourd’hui en une minute surinternet5G.....	28
<b>Figure 1.4.</b> Prévisions de l'industrie pour la 5G en 2021.....	29
<b>Figure 1.5 :</b> Indicateurs clés de performances des trois grandes familles d’usages.....	30
<b>Figure 1.6 :</b> Famille d’usages et services associés.....	31
<b>Figure 1.7 :</b> Architecture 5G NSA et 5G SA.....	33
<b>Figure 1. 8 :</b> Quelques bandes millimétriques pour les applications <b>5G</b> .....	37
<b>Figure 1.9 :</b> MIMO massive.....	39
<b>Figure 1.10 :</b> Communication en Full duplex.....	39
<b>Figure 1.11:</b> Illustration de multiplexage power Domain NOMA.....	40
<b>Figure 1.12 :</b> Architecture NG-RAN avec ses interfaces.....	41
<b>Figure 1.13 :</b> Architecture logique de la gNb.....	41
<b>Figure 1.14 :</b> Architecture réseau 5G dans 3GPP Release 15.....	42
<b>Figure 1.15 :</b> Network Slicing par-dessus l’infrastructure physique.....	43

## Chapitre 2

<b>Figure 2.1:</b> Définition d’une forme d’onde.....	47
<b>Figure 2.2:</b> Effet du multi-trajet sur le symbole OFDM .....	50
<b>Figure 2.3:</b> Effet de l'intervalle de garde sur le signal OFDM.....	51
<b>Figure 2.4:</b> Insertion du préfixe cyclique.....	51
<b>Figure 2.5 :</b> Restauration des porteuses.....	52
<b>Figure 2.6:</b> Insertion du zéros padding.....	52
<b>Figure 2.7:</b> Base orthogonale en temps.....	53
<b>Figure 2.8:</b> Spectres des différentes porteuses.....	54
<b>Figure 2.9:</b> Spectre du signal OFDM pour 8 porteuses.....	55
<b>Figure 2.10:</b> Chaîne de transmission OFDM.....	56
<b>Figure 2.11:</b> Représentation fréquentielle et temporelle d’un signal OFDM.....	57
<b>Figure 2.12:</b> Schéma de modulation OFDM.....	58

<b>Figure 2.13:</b> Schéma de la démodulation OFDM.....	59
<b>Figure 2.14:</b> Modulateurs OFDM numérique.....	60
<b>Figure 2.15:</b> Démodulateurs OFDM numérique.....	60
<b>Figure 2.16 :</b> Architecture d'un banc de filtre.....	62
<b>Figure 2.17 :</b> Configuration du system sous-bande et de trans-multiplexeur.....	62
<b>Figure 2.18 :</b> Dispositif de decimation.....	63
<b>Figure 2.19 :</b> Décimation du signal avec des filtres complexes. a : spectre du signal d'entrée. b : Spectre après filtrage anti alias. c : résultant du spectre après sous- échantillonnage par $N = 8$ .....	64
<b>Figure 2.20 :</b> Sous-échantillonnage par $N=2$ .....	64
<b>Figure 2.21 :</b> Dispositif d'interpolation.....	65
<b>Figure 2.22 :</b> Représentation des étapes d'Interpolation.....	65
<b>Figure 2.23 :</b> Sur-échantillonnage par la $N = 2$ (L'insertion des échantillons d'une valeur zéro dans le domaine temporel).....	66
<b>Figure 2.24 :</b> Identité de taux variable.....	66
<b>Figure 2.25 :</b> Chaîne de transmission FBMC.....	68
<b>Figure 2.26 :</b> Architecture d'un émetteur FBMC.....	69
<b>Figure 2.27 :</b> Architecture d'un récepteur FBMC.....	69
<b>Figure 2.28 :</b> Structure d'un émetteur FBMC/OQAM.....	70
<b>Figure 2.29 :</b> Structure d'un récepteur FBMC/OQAM.....	70
<b>Figure 2.30:</b> Emetteur UFMC.....	72
<b>Figure 2.31:</b> Récepteur UFMC.....	73
<b>Figure 2.32:</b> Un exemple d'un banc de filtre.....	74
<b>Figure 2.33:</b> Système de sous-bande et les configurations de Trans-multiplexeur.....	74
<b>Figure 2.34:</b> Les caractéristiques d'impulsion et de fréquence du filtre numérique.....	75
<b>Figure 2.35.</b> Formation du signal UFMC dans le domaine fréquentiel.....	76
<b>Figure 2.36:</b> Système modèle d'UFMC.....	77
<b>Figure 2.37 :</b> Calcul de l'ACPR. ....	80
<b>Figure 2.38 :</b> Error Vecteur Magnitude(digital démodulation).....	81

### Chapitre 3

<b>Figure 3.1:</b> OFDM numérologie.....	84
<b>Figure 3.2:</b> SIG extérieur avec végétation (Capture d'écran de Ranplan Profess).....	86
<b>Figure 3.2:</b> Modèle de construction de modèles 3D.....	86
<b>Figure 3.3:</b> Base de données de matériaux dans Ranplan Professional couvrant toutes les bandes de fréquences 5G.....	87
<b>Figure 3.4:</b> Intégration transparente du sig et du modèle de bâtiment 3D avec le signal radio extérieur et intérieur dans Ranplan Professional.....	88
<b>Figure 3.5 :</b> vrai modèle de propagation radio de lancer/suivi de rayons à chemins multiples 3D.....	90
<b>Figure 3.6:</b> Numérolgies 5G.....	92

### Chapitre 4

<b>Figure 4.01 :</b> Schéma fonctionnel de l'émetteur-récepteur OFDM.....	96
<b>Figure 4.2 :</b> l'amplificateur de puissance sur les points de la constellation.....	98
<b>Figure 4.3:</b> EVM vs IBo .....	99
<b>Figure 4.4 :</b> Effet de l'amplificateur de puissance sur le spectre pour différentes valeurs du IBO.....	100
<b>Figure 4.5 :</b> Effet de l'amplificateur de puissance sur le BER pour différentes valeurs du IBO.....	101
<b>Figure 4.6 :</b> Modèle de représentation SIMO.....	102
<b>Figure 4.7 :</b> Performances du BER en fonction du SNR pour le modèle cp-ofdm SIMO [(1x4)(1x3)(1x2);cp-OFDM SISO].....	102
<b>Figure 4.8.</b> BER vs SNR pour cp-OFDM, MIMO[(2x4)-(2x3)-(2x2)-(2x1)].....	103
<b>Figure 4.9.</b> CCDF VS PAPR0(dB) pour CP-OFDM,N=[4096;2048;1024;512;256;128;64].....	104
<b>Figure 4.10 :</b> Schéma de principe de la Tone Réserveation.....	105
<b>Figure 4.11 :</b> Schéma de principe de la Sélective Mapping.....	106
<b>Figure 4.12 :</b> Schéma de principe de la PTS.....	106

**Figure 4.13:** Comparaison des performances de réduction du PAPR de la technique pour CP- OFDM POUR different valeurs des paramètres ,N=4096,with[TR; clipping ; FFT,SLM;PTS].....107

**Figure 4.14:** Schéma fonctionnel de l'émetteur-récepteur FBMC/QAM.....108

**Figure 4.15 :** Schéma fonctionnel de l'émetteur-récepteur UFMC.....109

**Figure 4. 16 :** DSP [OFDM (cp-OFDM.ZP -OFDM) vs UFMC vs FBMC) .....109

**Figure 4.17:** BER vs SNR pour l'OFDM, et cp-OFDM et zp- OFDM, l'UFMC et FBMC...111

# Liste des tableaux

## Chapitre 1

<b>Tableau 1.1 :</b> Histoire de la communication sans fil.....	20
---	----

## Chapitre 2

<b>Tableau 2.1 :</b> Classification basée sur la condition d'orthogonalité des FO candidates à la 5G.....	49
---	----

## Chapitre 3

<b>Tableau 3.1.</b> Numéologies 5G NR.....	91
--	----

<b>Tableau 3.2:</b> Schémas de modulation 5G NR.....	92
--	----

<b>Tableau 3.3:</b> Canal de liaison montante et de liaison descendante.....	93
--	----

## Chapitre 4

<b>Tableau 4.1:</b> l'ACPR selon les valeurs d'IBO.....	99
---	----

## Abbreviations:

1G	1ère Génération
2G	2ème Génération
3G	3ème Generation
3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	4ème Génération
5G	5ème Génération
QAM	Quadrature Amplitude
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AMPS	Advanced Mobile Phone System
AMTS	Advanced Mobile Telephone System
BBU	Base Band Unit
BER	Bit Error Rate
CDMA	Code Division Multiple Access
CDN	Content Delivery Network CD-NOMA
C-RAN	Cloud- Radio Access Network
CU	Central Unit
CP	Cyclic Prefix
CMFB	Cosinus Modulation Filter Bank
CCDF	Complementary Cumulative Distribution Function
DVB-T	Digital Video Broadcasting Terrestria
DSP	Density spectrale.

DVB	Digital Video Broadcasting
EPC	Evolved Packet System
EDGE	Enhanced Data for GSM Evolution
Enb	evolved NodeB
LTE	Long-Term Evolution
EVM	Error Vector Magnitude
F. O	Forme d'Onde
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FEM	Front End Multiplexer
FDD	Frequency Division Duplex
FBMC	Filter Bank Multi-Carrier
FFT	Fast Fourier Transform
FIR	Finite Impulse Response
HSDPA"	High Speed Downlink Packet Access
HPA	High Power Amplifier.
IOT	Internet of Things
IMT	International Mobile Telecommunications
ISI	Inter Symbol Interference
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IES	Interférence Entre Symbole
IBO	<b>Input Back-Off.</b>

ISI	Inter Symbol Interference
ICI	Inter Carrier Interference
GSM	Global System for Mobile communications
GPRS	General Packet Radio Service
GNSS	Ground Network Scheduling System GPS
GFDM	Generalized Frequency Division Multiplexing
LMDS	Local Multipoint Distribution Service
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution-Advanced
LNA	Low Noise Amplifier
MTS	Machine Type Communication
MC-CDMA	<b>Multi Carrier Code Division Multiple Access.</b>
MMS	Multimedia Messaging Service
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MU-MIMO	Multi User- Multiple Input Multiple Output
MPA	Modulating Power Amplifier
MEC	Multi-access edge computing
MC-HSPA	Multi-Carrier High Speed Downlink Packet Access
<i>M</i> -QAM	modulation d'amplitude en quadrature
MMSE	Minimum Mean Square Error
NFV	Network Function Virtualization
NSA	Non-Standalone
NR	New Radio

NFC	Neuro Fuzzy Controller
NG-RAN	Next Generation- Radio Access Network
NOMA	Non Orthogonal Multiple Access.
ng-eNb	next generation-evolved NodeB
NB-IoT	Narrowband Internet of Things
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OQAM.	Offset QAM
OOB	Out Of Band
PAPR	Peak to Average Power Ratio
PSK	Phase Shift Keying
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
PTS	<b>P</b> artial <b>T</b> ransmit <b>S</b> equence.
QAM	<b>Q</b> uadrature <b>A</b> mplitude <b>M</b> odulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
QoS	quality of service
RF	Radio Frequency
REC	Regional Engineering Center
RCC	Remote Control Center
RRU	Remote Radio Unit
RU	Remote Unit
RRH	Remote Radio Head

SDN	Software Defined Networking
SCMA	Sparse Code Multiple Access
SA	Standalone
SLM:	<b>S</b> elective <b>M</b> apping.
SNR	Signal to Noise Ratio
SIMO	Single Input Multiple output
SISO	Single Input Single Output
TDMA	Time-division multiple access
TD-SCDMA	Time Division Synchronous Code Division Multiple Access
TDD	Time division Duplex
TR	Tone Reservation.
V-RAN.	Virtualized-Radio Access Network
WCDMA	Wideband-Code Division Multiple Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access

# Introduction Générale

Le développement de nouvelles technologies de réseau mobile est toujours en progression. Dans le monde fortement interconnecté, la demande de protocoles de communication de plus en plus efficaces et performants est inévitable. Ainsi, de nombreux acteurs de télécommunications se préparent pour être les premiers à offrir à leurs clients la connexion ultra-rapide de la 5ème génération.

Le monde de la Télécommunication mobile est en perpétuelle évolution. L'arrivée des nouveaux services et leurs exigences en termes de performances, en sont les causes. Alors que la 4G n'est pas en pleine maturation, l'arrivée de la 5G est déjà imminente, avec plus de 20 milliards d'appareils connectés au réseau mobile et l'introduction des nouvelles bandes de fréquences dites ondes millimétriques. Des nouvelles technologies pour supporter tout cela devront être introduites surtout du côté radio du réseau que l'on nomme 5G New Radio (5G NR). La forme d'ondes est un élément clé permettant de répondre à ces exigences de différents services et au nombre élevé de terminaux utilisateurs.

Le problème se situe au niveau du choix d'une ou plusieurs formes d'ondes adéquates au réseau 5G, pour atteindre ses objectifs tels que le débit ultra élevé, ou le temps de latence très faible et de supporter les ondes millimétriques. Ainsi les technologies Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) employées en 4G semblent être dépassées, si bien que plusieurs autres candidats pour remplacer ces technologies OFDM utilisées en 4G ont été considérés.

L'objectif de ce travail est l'étude du comportement des formes d'onde candidates à une utilisation dans la 5G. Principalement trois formes d'ondes sont étudiées : la CP-OFDM, la Filter Bank Multi-Carrier et l'Universal Filtered Multi-Carrier.

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à une étude générale de la nouvelle technologie radio-mobile de 5ème génération. Dans ce contexte nous présentons un historique de l'évolution des réseaux mobile jusqu'à l'arrivée de la 5G. Par la suite, nous

développons les points essentiels de la 5G. Nous terminerons ce chapitre par une présentations des technologies clés des réseaux 5G.

Le deuxième chapitre présente une étude des formes d'onde CP-OFDM, FBMC et L'UFMC. Dans ce cadre nous présentons les principales caractéristiques de ces formes d'onde, notamment le facteur de crête et le rayonnement de hors bande . Les différents émetteurs-récepteurs utilisés pour chaque forme d'onde sont aussi exposés.

Dans le troisième chapitre, étude des planifications et Dimensions du réseau d'accès 5G NR et présent le dimensionnement du system multi porteuse pour utilise en 4<sup>ième</sup> chapitre la simulation.

Dans le quatrième chapitre une étude paramétrique des trois formes d'onde est donnée, avec la présentation de Density spectrale et du taux d'erreur binaire pour chaque forme d'onde. Le chapitre se termine par une comparaison entre les trois formes d'ondes

Enfin, nous concluons notre mémoire par une conclusion générale avec quelques perspectives.

### 1.1. Introduction :

Aujourd'hui, l'utilisation des technologies de communication mobile est devenue très large, les réseaux de télécommunications sont confrontés à une grande hétérogénéité. Jusqu'à maintenant, chacune des générations (1G, 2G, 3G, 4G) de réseaux mobiles a été implémentés pour offrir l'utilisation des applications spécifiques. Le contraire en ce qui concerne la 5G (5ème Génération) qu'elle devra offrir des divers besoins. En effet, pour ce nouveau réseaux 5G ils apparaissent de nouveau type d'objets communicants à côté des utilisateurs cellulaires classiques, où ce qu'on appelle maintenant l'Internet des objets IOT (Internet Of Things).

La 5G est la cinquième Génération. Elle a une multitude de fonctionnalités très avancées pour pouvoir résoudre plusieurs problèmes de notre vie quotidienne moderne. La 5G ne s'intéresse pas seulement aux besoins des opérateurs de téléphonie mobile et des communications grand public, mais elle ouvre aussi de nouvelles perspectives de la future. Elle permet la coexistence d'applications et d'utilisations très diverses, unifiés dans une même technologie pour faciliter l'arriver à une société complètement connectée. Cela permettra à tout le monde d'avoir un accès illimité aux informations et aux conversations virtuelles à tout moment, et en tout lieu pour tout le monde. Et il ne s'agit pas seulement d'appeler les gens, mais cela inclut également la possibilité de se connecter à tous les appareils et la disponibilité n'importe où, n'importe quand.

L'idée qui commence à se dessiner derrière la notion de la 5G est qu'elle ne correspondrait pas à une simple augmentation des vitesses, comme c'était le cas pour les générations précédentes (3G et 4G). La 5G cible une grande variété de secteurs, qui n'auraient pas forcément d'autre élément commun que cette technologie, mais qui sont des bases importantes de la société dans les domaines des : médias, l'énergie, la santé, l'éducation, l'industrie ou les transports.

### 1.2. L'histoire des communications sans fil :

L'histoire des communications sans fil a commencé avec la compréhension des propriétés magnétiques et électriques observées au début par les cultures chinoise, romaine et grecque et les expériences menées aux 17<sup>e</sup> et 18<sup>e</sup> siècles. Un bref historique de la communication sans fil est présenté sous forme de **tableau 1.1** :

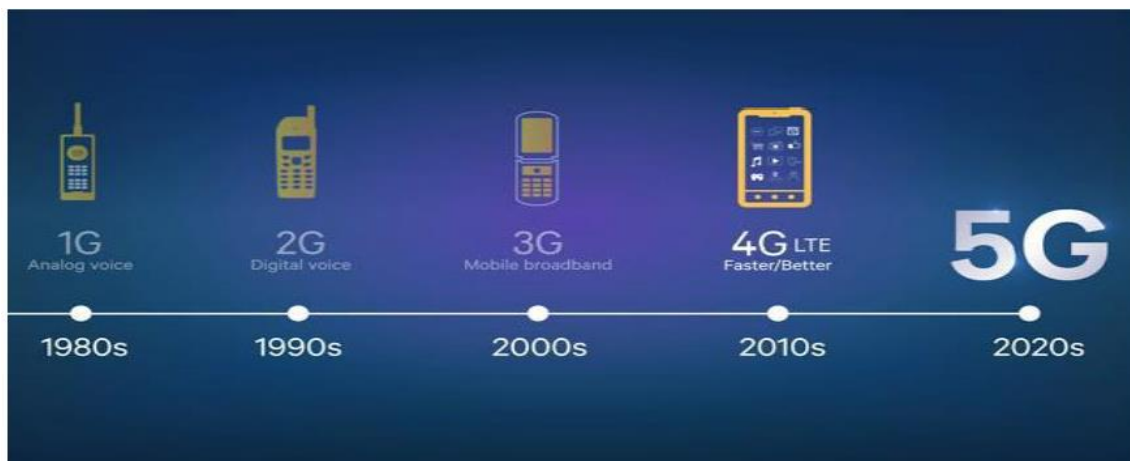
<b>Année</b>	<b>La description</b>
<b>1880</b>	Hertz-Radio Communication
<b>1897</b>	Marconi - Transmission radio
<b>1933</b>	FCC (Commission fédérale de la communication)
<b>1938</b>	Règles de la FCC pour les services réguliers
<b>1946</b>	Laboratoires téléphoniques de Bell 52 MHz
<b>1956</b>	FCC - 450MHz (Recto)
<b>1964</b>	Bell téléphone recherche active 800 MHz
<b>1964</b>	FCC - 450 MHz (Duplex intégral)
<b>1969</b>	FCC - Bande passante 40 MHz
<b>1981</b>	FAC ? sortie du téléphone cellulaire terrestre dans les 40 MHz
<b>1982</b>	Marché le plus RBOC en exploitation
<b>1984</b>	Marché le plus RBOC en exploitation
<b>1986</b>	La FCC alloue une bande étendue de 5 MHz.
<b>1988</b>	TDMA a voté comme norme cellulaire numérique en Amérique du Nord.
<b>1992</b>	Système GSM (Group Special Mobile) Allemagne D2 utilisable.
<b>1993</b>	CDMA (accès multiple par division de code)
<b>1994</b>	PDCC (Personal Digital Cellular Operable) à Tokyo, Japon
<b>1995</b>	CDMA utilisable à Hong Kong

<b>1996</b>	Six bandes sous licence Broad Band PCS (Personal Communication Services) (120 MHz) presque lecteur 20 milliards de dollars américains
<b>1997</b>	CDMA large bande construit et de 3ème génération mobile.
<b>1999</b>	Des systèmes WLAN puissants ont été développés, tels que Bluetooth. Cela utilise un spectre de 2,4 MHz.

Bien qu'elle soit clairement éloignée des technologies d'aujourd'hui, la véritable définition des télécommunications peut remonter à l'époque où les humains utilisaient des signaux de fumée et des pigeons voyageurs pour communiquer sans fil. Ce sont les formes les plus simples et les plus anciennes de communication sans fil.[36]

### 1.3. Évolution :

La communication mobile s'est avérée bien connue ces dernières années en raison de son passage rapide de la 1G (1ère Génération) à la 5G dans le domaine de la technologie mobile. Ce changement est dû à la nécessité d'une technologie de transmission compatible avec le service et à l'augmentation importante du nombre de clients télécoms. Fondamentalement, la génération désigne la technologie de transmission et les nouvelles bandes de fréquences compatibles avec la nature des services. En 1980, le système cellulaire mobile a été introduit pour la première fois et, depuis lors, les communications mobiles ont connu d'énormes changements qui ont poursuivi leur vaste maintien en puissance [1].



**Figure 1.1.** Évolution de la Technologie sans fil mobile.

### 1.3.1. Première génération (1G) :

Ces téléphones ont été le premier et le premier téléphone portable à être utilisé. Il a été présenté en 1982 et achevé au milieu de 1990. Il était utilisé pour les avantages vocaux et dépendait de la technologie appelée AMPS (Advanced Mobile Phone System). La structure AMPS était modulée en fréquence et utilisait l'accès multiple par répartition en fréquence FDMA (Frequency Division Multiple Access) avec un canal limité à 30 kHz et avec une bande de fréquences de 824 à 894 MHz et une vitesse de 2.4 Kbps [1].

Il présente les technologies mobiles, par exemple, le système de téléphonie mobile MTS : (Mobile Téléphone System), le système de téléphonie mobile avancé AMTS: (Advanced Mobile Téléphone System), le service de téléphonie mobile amélioré IMTS: (Improved Mobile Téléphone Service) et le Push to Talk PTT: (Push to Talk) [1]. Le principal inconvénient de la technologie 1G est qu'elle utilise des signaux analogiques plutôt que numériques, c'est un moyen moins efficace de transmettre l'information, elle a une faible capacité, un transfert problématique, une qualité vocale à besoin d'amélioration et aucune sécurité du tout puisque la voix est restituée dans les stations de radio, rendant ces appels impuissants à indésirables dans une écoute furtive par des étrangers. La 2G est donc en mesure de surmonter ces problèmes [1].

### 1.3.2. Deuxième Génération (2G) :

La 2G (2ème Génération) fait allusion à la deuxième génération basée sur le GSM (Global System for Mobile communications) et a été développée à la fin des années 1980. Il utilise des signaux numériques pour la transmission vocale. Le concentré fondamental de cette technologie portait sur les signaux numériques et fournissait des

services permettant de transmettre du contenu et de fournir un message image à faible vitesse (en kbps). Il utilisait la bande passante de 30 à 200 KHz. Trois types de développements ont eu lieu dans le système de communication sans fil de deuxième génération, IS-54 TDMA (Time-division multiple access) en 1991, IS-95 CDMA (Code Division Multiple Access) en 1993 et IS-136 en 1996. Outre la 2G, la structure 2.5G utilise le domaine de la commutation de paquets et de la commutation de circuits et donne un débit de données pouvant atteindre 144 kbps, par exemple les protocoles GPRS (General Packet Radio Service) (2.5G), CDMA et EDGE (Enhanced Data for GSM Evolution) (2.75G) [1].

Les principaux points forts de la 2G (GSM) et de la 2.5G (GPRS) sont [1] La vitesse des données était de 64-144 Kbits / s, Utiliser des signaux numériques, Activer les services, par exemple, messages instantanés, MMS (MultiMedia Messaging Service), Offre une qualité et une capacité supérieures que la 1G [1].

La technologie GSM a été constamment améliorée pour offrir de meilleurs services, ce qui a entraîné une amélioration de la technologie de pointe entre 2G et 3G. Fournit des appels téléphoniques, Envoyer / Recevoir des e-mails, Navigation sur le Web, Téléphones cellulaires avec appareil photo, et Prendre une période de 6 à 9 minutes. Pour télécharger un 3 min. Mélodie MP3 [1].

Un signal numérique plus faible est l'un des principaux inconvénients de la technologie 2G, Requis en continu signaux numériques pour permettre aux téléphones cellulaires de fonctionner. Au cas où il n'y aurait pas de couverture réseau dans une zone donnée, les signaux numériques seraient fragiles, Nécessité d'améliorer la qualité de la transmission, Couverture inégale, Inapte à traiter des données complexes, par exemple la vidéo, Capacité du système, Les tours cellulaires ont une zone de couverture limitée, et Appels interrompus inattendus. Pour surmonter ces problèmes. La technologie 3G est en train de se développer [1].

### **1.3.3. Troisième génération (3G):**

La 3G (3ème Génération) : UMTS (Universal Mobile Télécommunication System) dépend du GSM et a été propulsée en 2000. Le but de cette technologie était d'offrir des données à haut débit. La première technologie a été améliorée pour permettre des données allant jusqu'à 14 Mbps et utilisant en outre la commutation par paquets. Il utilise un réseau sans fil large bande. Elle propose également des services de données, un accès à la TV/vidéo, ainsi que de nouveaux services tels qu'International Roaming. Il fonctionne dans une plage de 2100 MHz et a une largeur de bande de 15-20 MHz utilisée pour l'accès Internet à haute vitesse et le chat vidéo [1].

Le système mobile 3G s'appelait UMTS en Europe, tandis que CDMA 2000 était le nom de la variante 3G américaine. En outre, les IMT (International Mobile Télécommunications) 2000 ont reconnu une autre norme 3G de la Chine, à savoir TD-SCDMA, (Time Division Synchronous Code Division Multiple Access) WCDMA (Wideband-Code Division Multiple Access) est la technologie d'interface radio pour UMTS [1].

Avec la 3.5G ou 3G+ ou "HSDPA" ou " (High Speed Down Link Packet Access)", le débit augmente encore pour atteindre les 14.4 Mbit/s. Avec une vitesse de transfert encore 5 fois supérieure à la 3G [2].

Le H+, aussi appelé Dual Carrier ou HSPA+ "Dual Cell High Speed Packet Access+", est encore très répandu et utilisé aujourd'hui. Il permet d'atteindre une vitesse de 42 Mbit/s soit environ 3 fois plus rapide que la 3G+ que je vous présentais juste au-dessus. Cette norme a été annoncée comme la "Pré-4G", même si son débit max est bien inférieur à cette norme [2].

Les principaux points forts de la 3G sont [1] : Vitesse : 2-42 Mbit/s, Téléphones mobiles avancés, Augmentation de la bande passante et des taux de transfert de données pour obliger les applications Web et les documents vidéo, Fournit des communications plus rapides, Envoi / recevoir des e-mails expansifs, Haut débit Web / une plus grande sécurité/ vidéoconférence/ jeux 3D. Grandes capacités et capacités large bande, TV en streaming / Mobile TV / appels téléphoniques.

Le fournisseur de services doit payer le montant élevé des licences et accords 3G, le problème de la disponibilité des combinés dans quelques régions et leurs coûts, les téléphones mobiles de grande taille, les réseaux 3G ont besoin d'appareils différents et la consommation d'énergie est élevée sont les principaux inconvénients de la 3G pour surmonter cette 4G (4ème Génération) arrive [1].

#### **1.3.4. Quatrième génération (4G) :**

La technologie sans fil 4G doit associer différentes technologies de réseau sans fil existantes et potentielles (par exemple, OFDM, (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) MC-CDMA, (Multi Carrier Code Division Multiple Access.) LAS-CDMA et réseau-LMDS (Local Multipoint Distribution Service)) afin de garantir la liberté de mouvement et l'itinérance parfaite d'une technologie à l'autre [1].

La 4G offre une vitesse de téléchargement de 100 Mbps. La 4G offre les mêmes fonctionnalités que la 3G et des services supplémentaires tels que des journaux multimédias, permettant de regarder des programmes de télévision avec plus de clarté et

d'envoyer des données considérablement plus rapidement que les générations précédentes [1].

LTE (évolution à long terme) est considérée comme une technologie 4G. La 4G est en cours de création pour répondre aux exigences de qualité de service et de débit définies par les applications attendues telles que l'accès large bande sans fil, le service de messagerie multimédia MMS, le chat vidéo, la télévision mobile, le contenu HDTV, la diffusion vidéo numérique DVB:(Digital Vidéo Broadcasting), des services minimaux tels que la voix et les données et différents services utilisant la bande passante.

Les principales caractéristiques de la 4G sont les suivantes [1] : Capable de fournir une vitesse de transmission de 10 Mbits / s à 1 Gbit / s, une vidéo en streaming de haute qualité, une combinaison de Wi-Fi et Wi-Max, une sécurité élevée, un système de toute sorte, en tout lieu, services multimédias, faible coût par bit, maintenir de la consommation de la batterie.

Obtenir des informations des personnes illégalement devient plus facile, la technologie 4G implique la possibilité d'interférences bien que minimales, elle peut être attaquée (fréquences de brouillage) et l'invasion de la vie privée a augmenté. Le consommateur est obligé d'acheter un nouvel appareil compatible avec la 4G, Nouvelles fréquences signifiant de nouveaux composants dans les tours de téléphonie cellulaire, Prix de données plus élevés pour le consommateur, Votre équipement actuel ne peut pas être compatible avec le réseau 4G, Il a différentes bandes de réseau pour différents téléphones Il est coûteux et difficile à mettre en œuvre. La technologie 4G nécessite une infrastructure d'exploitation coûteuse. C'est ce que reflètent les eNodeB (points d'accès) et principalement les EPC's (Evolved Packet System) passerelles ou routeurs. La 4G est optimale pour les débits de données, mais pas nécessairement la meilleure solution pour les services vocaux. , Certains de ces services sont déchargés vers les technologies cellulaires Wi-Fi ou 3G / GSM sur votre téléphone. Pour surmonter les inconvénients ci-dessus de la 4G, la 5G arrive [1].

### 1.4 La cinquième génération 5G:



**Figure 1.2.** Évolution vers le 5G

La Technologie de communication sans fil a considérablement évolué au fil des ans grâce à la recherche et à l'innovation. Le temps est venu de pouvoir connecter simultanément diverses technologies sans fil, réseaux et applications. Cette dernière technologie s'appelle 5G (5ème Génération). Le système sans fil de cinquième génération (ou 5G en abrégé) est désormais la prochaine génération de systèmes de communication sans fil. C'est la prochaine phase majeure des normes de télécommunications mobiles au-delà de la 4G actuelle. La 5G nous déplace au-delà de la conception de réseaux pour les périphériques mobiles uniquement vers des systèmes qui connectent différents types de périphériques fonctionnant à grande vitesse [3].

La technologie 5G offre certaines capacités de spectre uniques, dont la capacité d'utiliser des bandes autorisées et non autorisées et de partager un spectre, permettant ainsi d'améliorer l'utilisation des bandes à haute fréquence (plus de 24 GHz), des bandes intermédiaires (1 à 6 GHz), et des sous-bandes ou bandes à faible fréquence [3]. Les bandes de 3 300 à 4 200 MHz et de 4 400 à 4 990 MHz comprises dans les bandes 5G inférieures sont d'un intérêt particulier. Elles sont déjà utilisées dans des essais sur la technologie 5G en Chine. Les bandes supérieures incluent 26, 28, 38 et 42 GHz, lesquelles sont envisagées pour le déploiement rapide de la technologie 5G aux États-Unis, en Chine et en Europe. Les autres bandes d'intérêt incluent 600 MHz, 700 MHz, 800 MHz, 900 MHz, 1,5 GHz, 2,1 GHz, 2,3 GHz et 2,6 GHz [4].

Les principales caractéristiques de la 5G comprennent un débit élevé, une efficacité du spectre améliorée, une latence réduite, une meilleure prise en charge de la mobilité et une densité de connexion élevée. Il prend en charge le multimédia interactif, la voix, la vidéo, Internet et d'autres services à large bande. Pour prendre en charge l'augmentation des besoins en débit de la 5G, un nouveau spectre a été assigné aux bandes 5G en mmWave. La 5G utilisera plusieurs entrées multiples MIMO (Multiple Input Multiple Output) pour augmenter considérablement la capacité du réseau [3].

Bien que la 5G ne soit pas attendue avant 2020-2025, un nombre croissant d'entreprises investissent maintenant et créent des produits 5G. Le développement de la nouvelle norme sans fil pour mobiles est mené par des sociétés telles qu'Intel, Qualcomm, Nokia, Ericsson, BT, Verizon, AT & T et Samsung [3].

#### 1.4.1. Objectifs techniques de la 5G :

Depuis le vrai premier appel téléphonique mobile, il y a 44 ans<sup>4</sup>, les technologies mobiles ont évolué de manière continue et leurs performances de manière exponentielle : le service voix, puis la messagerie et enfin l'internet mobile et l'utilisation des applications mobiles multi-services ont caractérisé, comme indiqué dans le paragraphe précédent, l'évolution des réseaux mobiles et le passage d'une génération à l'autre. La naissance de la technologie LTE et de la quatrième génération, couplée à la démocratisation des smartphones et tablettes, a mené à une augmentation très forte des volumes de données échangés en mobilité. L'utilisation d'un mobile et de ses applications est désormais fermement ancrée dans le quotidien de nos concitoyens : les appareils portables connectés sont de plus en plus performants : ils remplacent bien souvent le téléphone fixe, l'appareil photo, voire l'ordinateur et même le téléviseur. Aujourd'hui, 5 million de vidéos sont vues sur YouTube et 67 000 images sont chargées sur Instagram chaque minute (voir Figure 3).



**Figure 1.3.** Ce qui est fait aujourd'hui en une minute sur internet 5G

Le dernier « Mobilité Report6 » d'Ericsson indique que, en l'espace d'un an, le volume de données échangées sur les réseaux mobiles a presque doublé et que dans 5 ans il aura été multiplié par 10 par rapport à l'utilisation actuelle. De nouvelles solutions doivent donc être trouvées afin de pouvoir répondre à cette demande et d'optimiser l'utilisation des ressources. L'augmentation du nombre d'applications, leur diversification ainsi que l'amélioration de la qualité des réseaux mobiles ont conduit à l'augmentation de la demande, à l'apparition de nouveaux usages (objets connectés, drones, etc...) et de nouveaux utilisateurs.

La 5G se situe au carrefour de ces nouveaux usages ; elle ambitionne de répondre mieux et simultanément à cette grande variété de besoins et ces nouvelles demandes, via une technologie unifiée qui prend en compte, dès sa conception, cette diversité. L'arrivée de la 5G pourrait avoir un impact important non seulement dans la sphère technique, mais aussi dans le développement économique et social des différents pays ; comme indiqué en introduction, la 5G vise de très nombreux secteurs et devrait participer, par la numérisation de la société, à la croissance économique des Etats. A titre d'illustration, selon une étude réalisée par InterDigital Europe, Real Wireless, Tech4i2 et Connect (Trinity Collège Dublin)<sup>7</sup>, cette nouvelle technologie demandera d'importants investissements et travaux, mais générera 113,1 milliards de profits par an pour l'économie européenne d'ici 2025<sup>[7]</sup>

#### **1.4.1.1. Les fonctions et les améliorations de performances de la 5G vont arriver progressivement :**

Les **spécifications techniques** de la 5G sont réalisées par l'organisme **3GPP** (3rd Génération Partnership Project) et sont publiées dans des papiers appelés « release ».

**Plusieurs releases** sont prévues pour la 5G et elles intégreront au fur et à mesure l'ensemble des spécifications techniques qui devraient permettre d'atteindre les KPI visés.

De façon macroscopique:

- La 1<sup>ère</sup> version (release 15) intègre la première version des normes 5G et se concentre surtout sur le haut débit (eMBB).
- La 2<sup>ème</sup> version (release 16), prévue pour mi-2020, intégrera notamment la très faible latence (uRLLC) et le Network Slicing.
- La 3<sup>ème</sup> version (release 17), prévue pour fin 2021, traitera le massive IoT et apportera des améliorations sur l'uRLLC et sur le Slicing.[6]



**Figure 1.4.** Prévisions de l'industrie pour la 5G en 2021

#### 1.4.2. Familles d'usages et type de services :

Trois grandes catégories d'usages de la 5G sont définies dans l'IMT- 2020-et la fin de 2021- Et les années qui suivent de l'UIT ainsi que les types de services associés. Afin de mettre en œuvre ces trois types d'usages, huit indicateurs de performance KPI (Key Performance Indicator) ont été établis par l'UIT pour préciser, quantifier et mesurer les caractéristiques de systèmes IMT-2020 (5G) :

- Débit crête par utilisateur (Gbit/s) ;
- Débit moyen perçu par l'utilisateur (Mbit/s) ;
- Efficacité spectrale (bit/Hz) ;
- Vitesse maximale des terminaux (km/h) ;
- Latence (ms) ;
- Nombre d'objets connectés sur une zone (quantité d'objets/km<sup>2</sup>) ;
- Efficacité énergétique du réseau ;
- Débit sur une zone (Mbit/s/m<sup>2</sup>) ;

##### 1.4.2.1. eMMB :

eMBB (Enhanced Mobile Broadband) contient les connexions ultra haut débit en extérieur et intérieur dans des usages courants comme pour la création ou la consommation de vidéo mobile. Cela permettra de dépasser des débits théoriques de 1 Gbits/s.

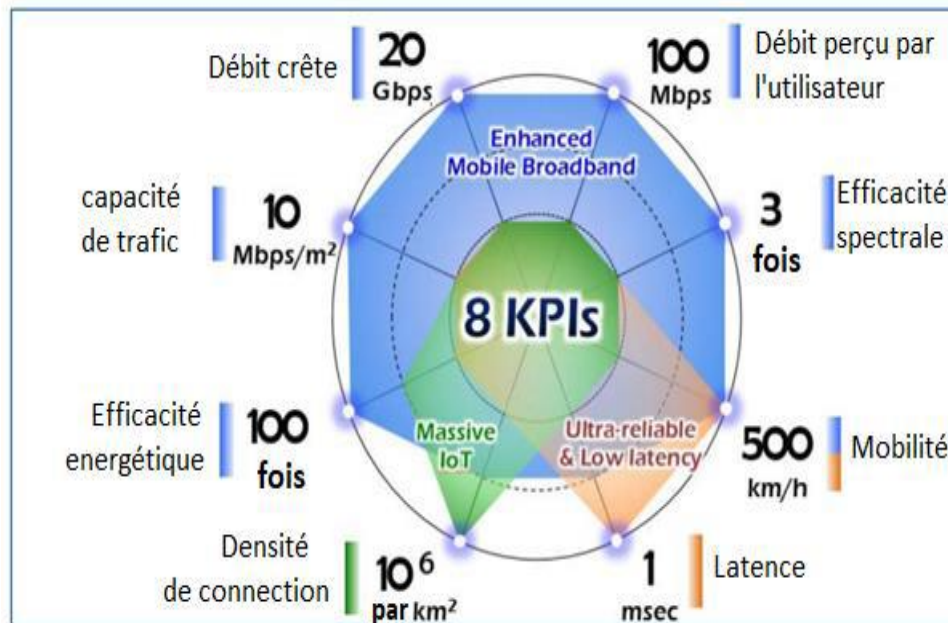
##### 1.4.2.2. mMTC :

mMTC (Massive Machine Type Communications) comprend les communications entre une grande quantité d'objets avec des besoins de qualité de service variés. L'objectif de cette catégorie est de répondre à l'augmentation exponentielle de la densité

d'objets connectés. Ces services nécessitent une couverture étendue, une faible consommation énergétique et des débits relativement restreints.

#### 1.4.2.3 uRLLC :

uRLLC (Ultra-reliable and Low Latency Communications) comprend les communications ultra-fiables adaptées aux applications critiques nécessitant une très faible latence, comme pour des applications de sécurité, les transports tel que la réactivité des voitures autonomes, ou dans la santé. [7]



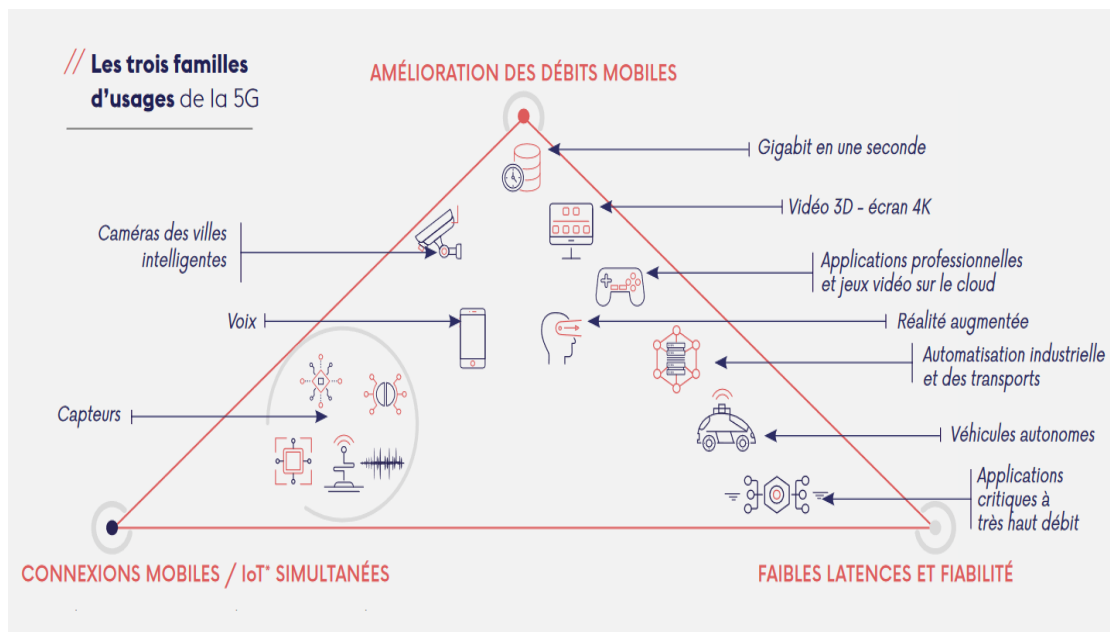
**Figure 1.5 :** Indicateurs clés de performances des trois grandes familles d'usages

Chacun de ces familles d'usages regroupe donc des différents services.

L'eMBB contient les services tels que : la réalité virtuelle, surveillance vidéo, appel et conférence vidéo, streaming en ultra HD, Cloud Computing Mobile et le réseau Wi-Fi.

Le mMTC contient les services comme les smart home, les communications de type vehicle-to-infrastructure, l'automatisation des industries et les réseaux sociaux.

L'URLLC concerne les services pour la sécurité publique, l'opération chirurgicale à distance, les communications de types vehicle-to-vehicle (voitures autonomes). [7]



**Figure 1.6 :** Famille d'usages et services associés

### 1.4.3. Principales technologies de la 5G :

#### 1.4.3.1. Présentation :

En générale il y a 5 grandes catégories de technologies qui sont mises en œuvre en 5G.

On distingue :

- L'efficacité spectrale ;
- La densification ;
- L'architecture SDN/NFV (Software Defined Networking)/(Network Function Virtualization);
- La connectivité massive.
- Le spectre utilisé ;

#### 1.4.3.2. Efficacité spectrale :

L'amélioration de l'efficacité spectrale passe par la combinaison de l'utilisation simultanée de plusieurs fréquences par terminal ciblé et la focalisation spatiale horizontale et verticale des ondes électromagnétiques sur les terminaux (Massive MIMO), de la modulation du signal en phase et amplitude en QAM256 au lieu du QAM64 (Quadrature Amplitude Modulation).

#### 1.4.3.3. Densification :

La densification du réseau s'appuie sur des Small cells (petits émetteurs), une nouvelle architecture, des techniques de réseau mesh comme le LTE (Long Term Evolution) -Direct qui permet à deux équipements de dialoguer entre eux sans passer par le réseau, un peu comme on le fait aujourd'hui avec le Bluetooth, des mobiles CDN (Content Delivery Network) pour optimiser encore plus la distribution des contenus, notamment via des algorithmes prédictifs. LTE Direct est une spécification de Qualcomm mais elle n'est pas encore intégrée dans celles du 3GPP (3<sup>ème</sup> Génération Partnership Project) pour la 5G. [5]

#### 1.4.3.4. SDN/NFV :

La 5G s'appuiera aussi sur les architectures logicielles d'exploitation de réseaux SDN/NFV. Le SDN et le NFV permettent de gérer les infrastructures télécoms de manière très souple en fonction des besoins (Network Slicing). Le SDN dissocie l'architecture physique des infrastructures réseaux de leur gestion logicielle. Elle est basée sur l'usage de serveurs standardisés. Le NFV virtualise les équipements spécifiques des équipementiers dans des machines virtuelles installées sur des serveurs standards. Le SDN et le NFV permettent de gérer les infrastructures télécoms de manière très souple en fonction des besoins. Ces techniques sont déjà mises en œuvre avec la 4G et deviennent indispensables avec la 5G du fait de la diversité des protocoles, réseaux et usages qu'elle met en œuvre.

La 5G va donner lieu à une utilisation intensive du machine-Learning dans la gestion du réseau, afin notamment d'optimiser la qualité de service offerte aux utilisateurs

#### 1.4.3.5. Connectivité massive :

Enfin, la 5G mettra en œuvre une connectivité massive d'un grand nombre d'objets avec le SCMA (Sparse Code Multiple Access), mais en bas débit. C'est adapté à la liaison des objets connectés. C'est un élément important pour les déploiements d'applications de "smart city". [5]

#### 1.4.3.6. Spectre électromagnétique :

Diverses catégories de spectres seront utilisées en 5G. La 5G conduira à une meilleure utilisation du spectre électromagnétique avec l'exploitation de plusieurs bandes de fréquences nouvelles dont celles des ondes millimétriques, entre 24 et 300 GHz mais aussi les bandes comprises entre 3 et 30 GHz qui ne sont pas exploitées dans la 4G. Elles apportent un très haut débit sur une courte portée, associé à la densification du réseau et à des antennes directives MU-MIMO (Multi User- Multiple Input Multiple Output).et Massive-MIMO. Le MIMO est une technologie

apparue avec le Wi-Fi qui utilise plusieurs antennes et fréquences pour gérer la communication avec un terminal. Le MU-MIMO est le Multi User MIMO qui gère cela pour plusieurs terminaux simultanément. Le Massive MIMO s'appuie sur la focalisation des faisceaux hertziens sur les terminaux à partir d'un grand nombre de petites antennes.

## 1.5. Architecture générale du réseau 5G :

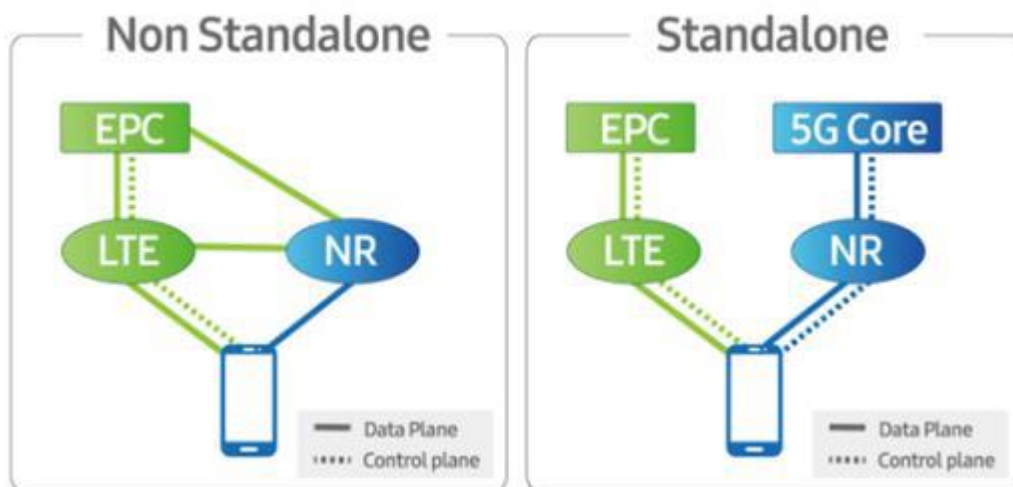
### 1.5.1. Architecture Non-Standalone et Standalone :

La spécification 3GPP pour la 5G indique que le premier déploiement des réseaux et dispositifs 5G passera sous l'opération non autonome NSA(Non-Standalone), ce qui signifie que les réseaux 5G seront pris

en charge par l'infrastructure 4G existante. Ainsi, les appareils compatibles 5G se connecteront à des fréquences 5G pour le débit de données, mais utiliseront encore la 4G pour des fonctionnalités autres que des données, telles que la connexion aux stations de base et aux serveurs.

La norme de réseau et de périphériques 5G Standalone (SA) est toujours en cours d'examen et devrait être approuvée par 3GPP dans le courant de cette année. L'utilisation autonome est plus simple et plus efficace, ce qui réduira le coût des périphériques et améliorera les performances du débit des données jusqu'à la frontière du réseau, tout en facilitant le développement de cas d'utilisation sans fil tels que les communications ultra-fiables à faible temps de latence (URLLC).

Une fois la norme 5G SA(Standalone) approuvée, 5G NSA devrait être abandonné progressivement.



**Figure 1.7 :** Architecture 5G NSA et 5G SA

La version NSA vise à réutiliser le réseau cœur et radio 4G LTE pour la gestion de la mobilité et la couverture tout en y ajoutant une nouvelle porteuse 5G. [8]

### 1.5.2. Architecture et Caractéristiques des User Equipement :

Le téléphone cellulaire 5G doit être capable de supporter le Massive MIMO et Beamforming : gère jusqu'à 800 MHz de bande passante via l'agrégation de 8 antennes 100 MHz et peut atteindre 5 Gbit/seconde en débit descendant.

Les téléphones cellulaires 5G doivent être conçus pour être compatibles avec le release 15 de la nouvelle radio NR (New Radio) 3GPP et doivent également prendre en charge les technologies d'accès radio existantes. Les téléphones portables Initial 5G seront compatibles avec la pile de protocoles NSA (Non-Stand Alone).

#### 1.5.2.1. Exigences pour le téléphone portable 5G :

- Se conformer au release 15 du 3GPP – NSA
- Prise en charge des technologies existantes GSM / EDGE, WCDMA, LTE / LTE-A
- Prise en charge de plusieurs antennes formant un faisceau
- Prise en charge des bandes de basse fréquence (<1 GHz), des bandes de moyenne fréquence (inférieures à 6 GHz) et de la bande de haute fréquence (supérieures à 6 GHz)
- Prise en charge des technologies non-3GPP telles que Wi-Fi, Bluetooth et NFC (Neuro Fuzzy Controller)
- Prise en charge de GNSS (Ground Network Scheduling System GPS) / GPS pour le suivi de position
- Prise en charge de différents capteurs tels que capteur de proximité, capteur de lumière, magnétomètre, gyroscope, thermomètre, scanner d'iris, moniteur de fréquence cardiaque, etc.

#### a). Architecture d'un téléphone cellulaire 5G :

Un téléphone portable 5G a les deux principaux blocs de construction suivants :

- Bloc de traitement en bande de base
- Bloc de traitement RF (Radio Frequency)

##### a.1. Le bloc de traitement en bande de base :

Un bloc de traitement en bande de base est constitué de différents cœurs (cœur de l'application, cœur multimédia, cœur de la communication, etc.). Ces composants de base

permettent au système d'exploitation, aux pilotes de périphériques, à l'interface avec Mic, Caméra, Écran, etc. Le logiciel de bande de base pour téléphone cellulaire 5G devrait prendre en charge la 5G NR dans les deux bandes de fréquences, c'est-à-dire les bandes inférieures à 6 GHz et les ondes millimétriques. Parallèlement à cela, les logiciels de protocole doivent prendre en charge la 4G LTE, la 3G WCDMA et la 2G GSM / EDGE (Enhanced Data for GSM Evolution). Le logiciel doit également inclure la prise en charge du protocole pour les technologies non-3GPP telles que Wi-Fi, Bluetooth et NFC pour les communications à courte portée. Le logiciel de protocole spécifique à la couche physique doit prendre en charge des algorithmes avancés de traitement du signal en bande de base afin de permettre les fonctionnalités Massive MIMO, beamforming et suppression des interférences.

### a).2. Le bloc de traitement RF :

Le bloc de traitement RF est responsable de la réception et de la transmission des signaux en bande de base. Ce bloc est constitué d'un circuit intégré RF, d'un module frontal FEM (Front End Multiplexer), d'un LNA (Low Noise Amplifier), de réseaux d'antennes et de capteurs. Les circuits intégrés RF permettent la coexistence de différents signaux d'accès radio (Wi-Fi, cellulaire, GNSS, etc.). Le téléphone portable 5G. aura un module d'antenne différent pour prendre en charge une large gamme de bandes de fréquences, telles que les ondes millimétriques, les bandes inférieures à 6 GHz et les bandes de basses fréquences. La section RF doit comporter des capteurs importants tels que capteur de proximité, capteur de lumière, baromètre, magnétomètre, accéléromètre, gyroscope, thermomètre, scanner de la rétine, moniteur de fréquence cardiaque, moniteur de pouls. [11]

### 1.5.3. Accès Radio :

Un **renouvellement de l'accès radio** avec le déploiement de **nouvelles antennes**, appelées gNB (pour Next Génération NodeB), intégrant les technologies suivantes :

- L'utilisation d'une **nouvelle bande de fréquences** : la bande des ondes millimétriques (>20GHz).
- L'utilisation du **Beamforming** : permet de concentrer la puissance d'une antenne dans une direction.
- L'amélioration des techniques MIMO (présentent en 3G et 4G) pour aller vers du **Massive MIMO** : antenne physique composée d'une grille de micro-antennes.
- **Full-Duplex** : permet d'émettre et recevoir sur la même fréquence. Précédemment les fréquences utilisées en émission et en réception étaient disjointes pour éviter un brouillage.

- L'amélioration de l'utilisation de la ressource radio via l'utilisation de **nouvelle technique de multiplexage NOMA** : permet une distribution plus flexible et plus efficace de la ressource radio à plusieurs utilisateurs.
- Architecture NG-RAN (Next Génération- Radio Access Network) : Faciliter le processus de communication via le nœud téléphonique appelé station de base gNB

### 1.5.3.1. Utilisation des ondes millimétriques :

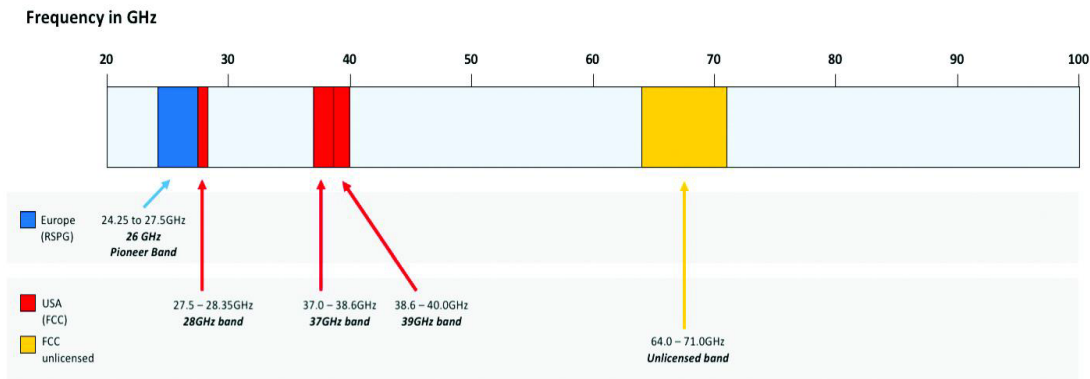
#### a) Technique mmWave :

mmWave (**Ondemm** en français, pour « ondes millimétriques ») est une technologie radar sans contact, de télédéttection et de télécommunication. Elle fut créée pour détecter des objets et fournir la portée, la vitesse et l'angle de ces objets. La mmWave n'est pas une marque déposée mais plutôt un procédé technologique utilisant les ondes hertziennes millimétriques.

#### b) Spectre et fréquence de la 5G

Selon les dernières recherches sur les besoins en spectre, en 2020 Et les années après ça, les besoins de spectre supplémentaires dans le monde seront de 1 000 à 2 000 MHz, tandis que la ressource de basse fréquence aura été largement épuisée. Comparées à la bande de basse fréquence utilisée, les ressources de fréquence disponibles dans la bande d'ondes millimétriques (30–300 GHz) sont assez abondantes, ce qui correspond à environ 200 fois la bande de basse fréquence. Par conséquent, l'industrie a commencé à explorer comment utiliser la bande de fréquences millimétrique (30–300 GHz) dans les communications sans fil.

La 5G utilise les très hautes fréquences (extremely high fréquences ; “mm Waves”) ; cela est un des éléments qui la caractérise le plus. Aux États-Unis, l'écrasante majorité des systèmes de communication fonctionne avec des fréquences inférieures à 3 Gigahertz (GHz). Pour la 5G, cinq bandes seront utilisées : quatre sans licence et une sous licence. La bande LMDS agréée offre environ 1,5 GHz de bande passante entre 27,5 et 31,5 GHz. Une deuxième bande de 7 GHz qui fonctionnera dans la gamme 57-64 GHz est déjà utilisée pour certains équipements Wi-Fi. Enfin, la bande dite « E-Band » est composée de trois segments de bande passante totalisant 12,9 GHz ; elle est également sans licence.



**Figure 1. 8 :** Quelques bandes millimétriques pour les applications **5G**.

Ce qui distingue ces bandes à haute fréquence des autres est leur vitesse. Si le codage des signaux radio est approprié, les vitesses 5G seront mille fois plus rapides que celles des générations précédentes de téléphonie mobile. Ces bandes représentent presque l'équivalent de l'ensemble de la bande passante du spectre radio attribué en dessous de 5 GHz.

L'utilisation de telles longueurs d'ondes courtes pose plusieurs défis techniques. Ceux-ci, à leur tour, conduiront à la mise en place d'une architecture apte à supporter leur utilisation.

#### **c) Absorption d'eau et d'oxygène :**

Ces hautes fréquences sont vulnérables, elles sont absorbées par l'humidité de l'air, et certaines le sont par l'oxygène. Les fréquences 22 et 183 GHz peuvent être absorbées par l'eau ; les fréquences 60 et 118 GHz par l'oxygène lui-même. En d'autres termes, s'il pleut, les communications mobiles utilisant des fréquences 5G peuvent être interrompues ou leur qualité peut être dégradée.

#### **d) Incapacité à pénétrer :**

Ces ondes à haute fréquence (« mm Waves ») ne sont pas en mesure de traverser les murs des bâtiments ou une végétation dense (forêt et même une simple rangée d'arbres). En conséquence, si l'actuelle infrastructure physique de la 3G / 4G était réutilisée telle quelle pour la 5G, rien ne fonctionnerait parce que ces ondes se comportent différemment. Concrètement, cela veut dire que la distance minimale à prévoir entre l'antenne-relais cellulaire et le récepteur de l'utilisateur (le téléphone mobile) doit être considérablement réduite.

Ces faiblesses conduisent à une nouvelle architecture de l'infrastructure et du réseau 5G, et comme nous le verrons, cette nouvelle architecture définit également le contexte de la propagation de nouveaux modèles de gestion et d'activités, non seulement pour les consommateurs, mais aussi pour les opérateurs [12].

L'UIT a toutefois décidé d'intervenir très en amont pour poser quelques fondations. Son dernier « brouillon », qui doit servir de base à la rédaction d'une spécification définitive d'ici à la fin de l'année, définit ainsi les grands traits des réseaux de cinquième génération :

- Les opérateurs devront posséder des blocs de fréquence de 100 MHz au moins, ce qui est encore possible dans la bande SHF (Supra-Haute Fréquence), et passer à 1 GHz le plus rapidement possible, ce qui demandera de passer à la bande EHF (Extrêmement Haute Fréquence).
- Les relais devront fournir un lien descendant à 20 Gb/s et un lien montant à 10 Gb/s, liens qui seront partagés entre les utilisateurs connectés.
- Mais chaque utilisateur devra bénéficier d'au moins 100 Mb/s en descendant et 50 Mb/s en montant.
  
- Y compris en se déplaçant à 500 km/h ;
- Sachant que le réseau devra être capable de prendre en charge un million d'appareils par kilomètre carré.
- Grâce à une meilleure efficacité spectrale (30 bits/Hz en descendant et 15 bits/Hz en montant en MIMO 8x4).
- Et une meilleure efficacité énergétique (réponse au changement de conditions en moins de 10 ms) [13].

### 1.5.3.2. Beamforming:

Le beamforming est une autre technologie révolutionnaire essentielle au succès de la 5G. Les stations de base conventionnelles transmettaient des signaux dans de multiples directions, sans tenir compte de l'emplacement des utilisateurs ou des appareils ciblés. Grâce à des matrices MIMO (entrées multiples, sorties multiples) munies de douzaines de petites antennes combinées en une formation unique, il est possible d'utiliser des algorithmes de traitement des signaux pour déterminer le chemin de transmission le plus efficace vers chaque utilisateur, tandis que des paquets individuels peuvent être envoyés dans de multiples directions, puis orchestrés pour atteindre l'utilisateur final selon une séquence prédéterminée.[10]

### 1.5.3.3. MIMO massive :

Massive MIMO peut fournir des gains de multiplexage spatial et de diversité. L'avantage le plus important que le MIMO massif peut apporter à la 5G est son amélioration de l'efficacité spectrale (plus de 10 fois par rapport à celle du LTE-A). En exploitant le multiplexage spatial, le MIMO massif peut transformer un canal à évanouissement sévère hostile (par exemple, un canal à évanouissement iid Rayleigh) en plusieurs canaux indépendants pouvant être utilisés pour transporter plusieurs flux d'informations simultanément. En exploitant la diversité spatiale, la fiabilité de la liaison peut être augmentée car les mêmes flux d'informations sont transmis sur plusieurs antennes vers le même UE.

Cette Technologie se caractérise par l'utilisation d'un nombre élevé de micro antennes « intelligentes » sur un seul équipement (de 8 à 128 actuellement, mais le nombre

augmentera avec l'utilisation de fréquences à 6Ghz). L'attrait de l'utilisation du massive MIMO est double [14] :

- □ Permet d'augmenter les débits grâce au multiplexage spatio-temporel.
- □ Permet de focaliser l'énergie sur un terminal pour améliorer son bilan de liaison.

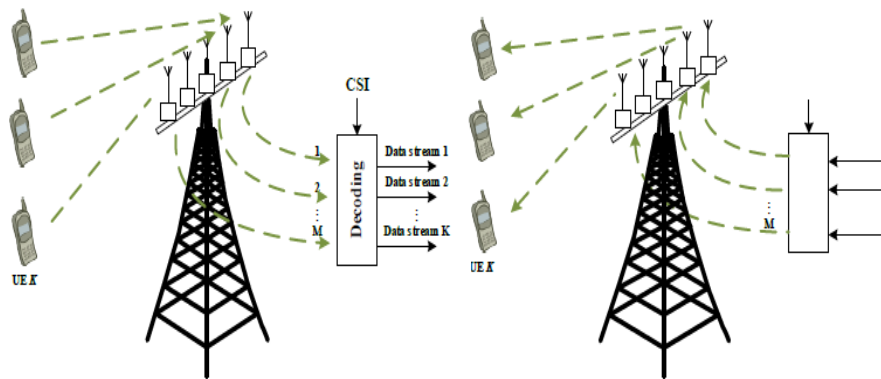


Figure 1.9. MIMO massive.

#### 1.5.3.4. Full duplex :

Dans les systèmes classiques, l'émission et la réception se font soit sur des bandes de fréquences différentes (duplexage en fréquences dit FDD, frequency division duplexing, utilisé sur toutes les bandes des réseaux mobiles français) soit à des instants différents (duplexage temporel dit TDD, time division duplexing). Le full duplex ambitionne de permettre l'émission et la réception simultanée d'information, sur les mêmes fréquences, au même moment et au même endroit

## Communication Full-Duplex

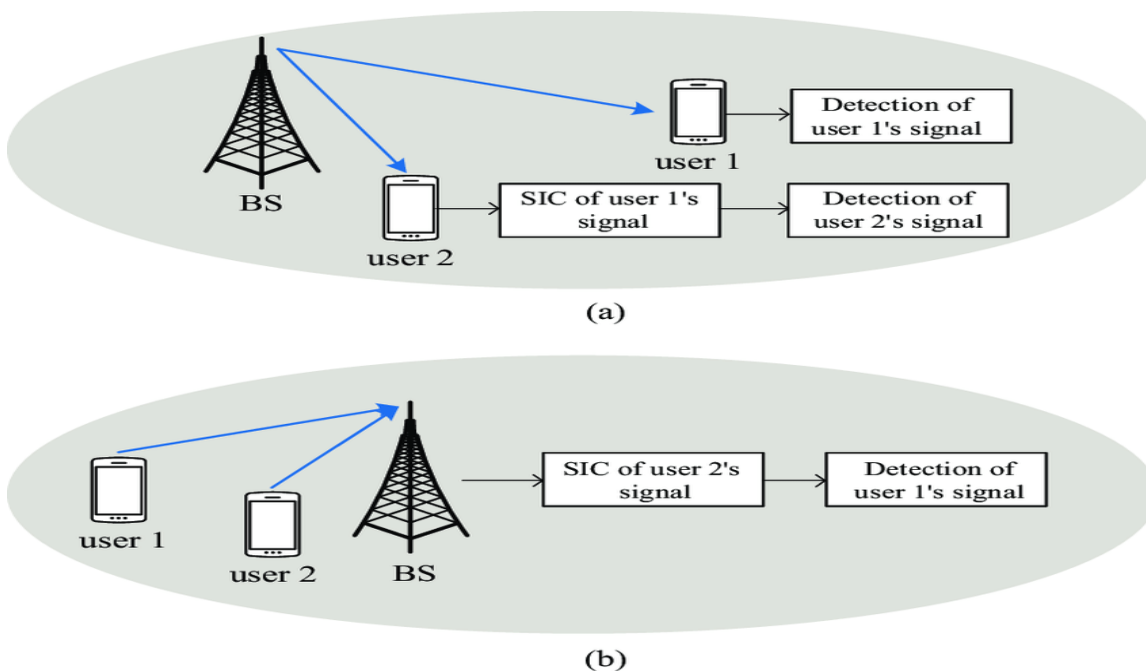


Figure 1.10 : Communication en Full duplex

### 1.5.3.5. Techniques d'accès multiple (NOMA) :

Des techniques d'accès multiple non orthogonal NOMA (Non Orthogonal Multiple Access.) ont été récemment proposées pour les réseaux 5G et beyond 5G. Dans les futurs réseaux, en raison du grand nombre d'utilisateurs (utilisateurs cellulaires, utilisateurs de type machine, capteurs, communications Device-to-Device ...), un nombre important d'émetteurs vont communiquer simultanément. Les techniques NOMA sont une solution innovante pour permettre la connectivité massive grâce au multiplexage de plusieurs données d'émetteurs sur les mêmes ressources radio.

La technique NOMA est effectuée soit dans le domaine de la puissance (superposition de plusieurs utilisateurs dans le domaine de la puissance en exploitant la différence de gain de canal entre les utilisateurs multiplexés), soit par codage (CD-NOMA) comme pour l'accès multiple SCMA. Pour le CD-NOMA, la détection multi-utilisateurs peut être effectuée en utilisant un algorithme par propagation de message(MPA) mais en raison de sa complexité élevée, des algorithmes à complexité réduite sont aussi envisagés. Les deux objectifs principaux de cette thèse sont les suivants : -améliorer les performances des techniques NOMA pour les réseaux de communication sans fil denses basés sur CD-NOMA et PD-NOMA en optimisant à la fois les sous-ensembles d'émetteurs impliqués et les algorithmes. De grands gains de performance peuvent être espérés en sélectionnant les bons sous-ensembles d'émetteurs impliqués dans la même transmission NOMA. - proposer des algorithmes de décodage de complexité réduite pour les techniques NOMA étudiées en exploitant les propriétés des codes, de la parcimonie des canaux et des statistiques des signaux.[14]



**Figure 1.11:** Illustration de multiplexage power Domain NOMA

1.5.3.6 Architecture générale d'un NG-RAN :

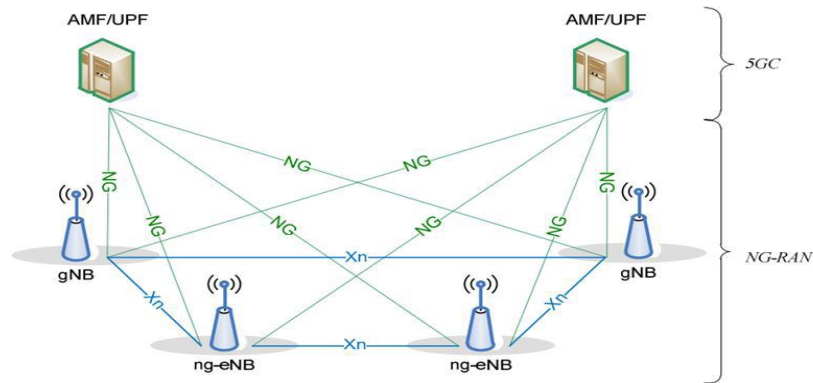


Figure 1.12 : Architecture NG-RAN avec ses interfaces

L'accès radio 5G (NG-RAN : Next Generation RAN) est constitué de stations de base de nouvelle génération qui forment le noeud de connexion des mobiles avec le cœur réseau 5G (5GC) . Les mobiles UE communiquent avec les stations de base soit par un lien radio 5G, soit par un lien radio 4G. Si la communication est en 5G, la station de base se nomme gNB (Next Generation Node Base Station), si la communication est en 4G, la station de base est une station de base 4G eNB évoluée pour s'interconnecter avec le cœur réseau 5G. La station de base se nomme ng-eNB (Next Generation eNB) ou eLTE-eNB.

Les fonctions de la station de base gNb sont assez similaires avec l'entité eNB (Evolved NodeB). Cependant, les différences concernent la gestion de la qualité de service par flux et non par support (bearer) et la gestion des tranches de réseau (Slices) sur l'interface radio. [8]

1.5.3.7. Architecture logique d'un gNB :

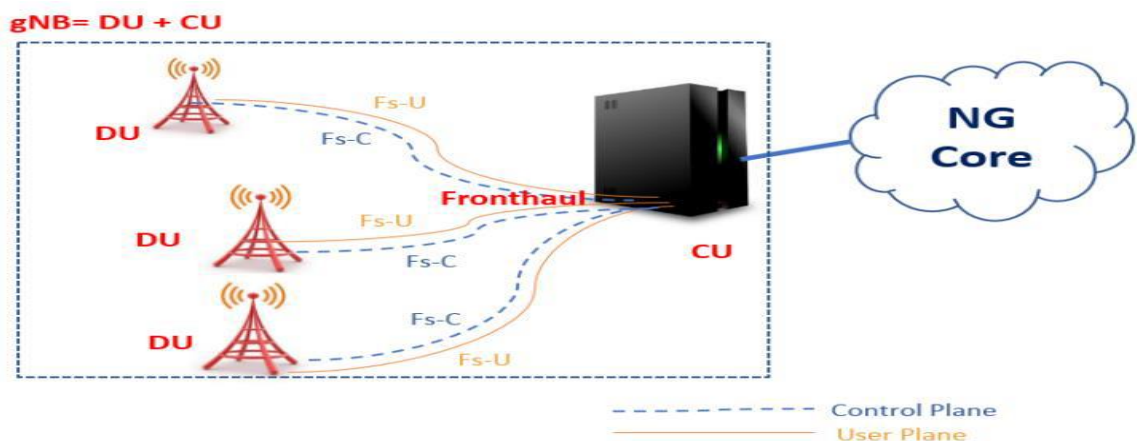


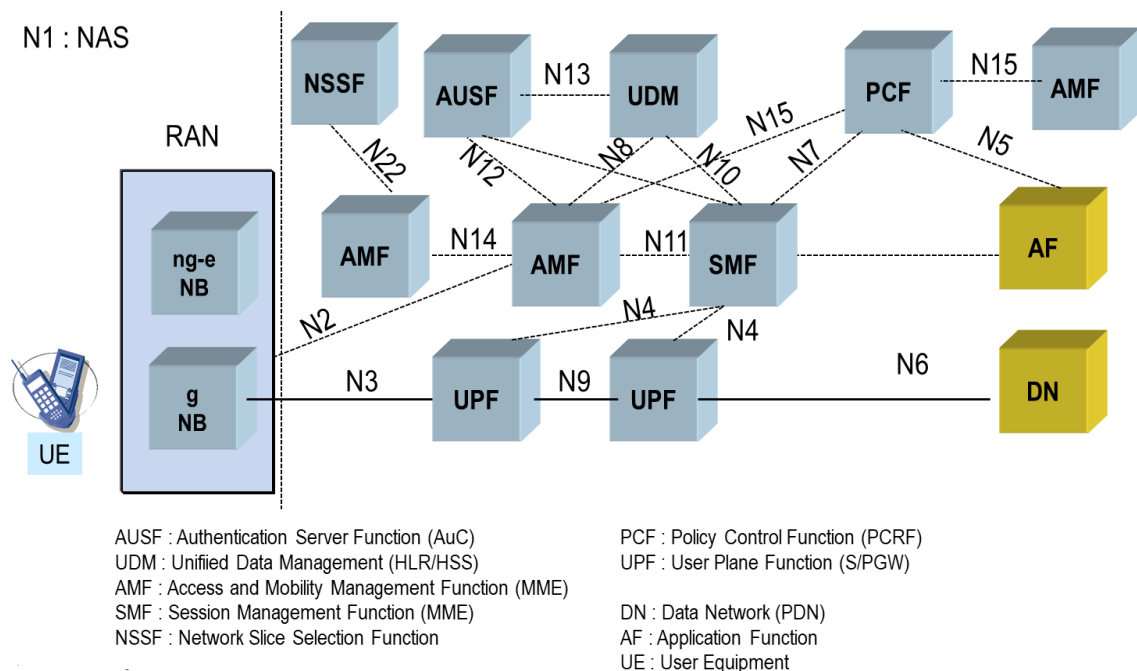
Figure 1.13 : Architecture logique de la gNb

**CU (Central Unit)** : C'est un noeud logique qui inclut les fonctions du gNB telles que le transfert de données utilisateur, le contrôle de la mobilité, le partage de réseau d'accès radio, le positionnement, la gestion de session, etc., à l'exception des fonctions attribuées exclusivement au DU. Le CU contrôle le fonctionnement des DU sur l'interface F-(Front-Haul). Une unité centrale (CU) peut également être appelée BBU (Base Band Unit) / REC (Regional Engineering Center) / RCC (Remote Control Center) / C-RAN (Cloud- Radio Access Network) / V-RAN (Virtualized-Radio Access Network).

**DU (Distributed Unit)** : Ce noeud logique comprend un sous-ensemble des fonctions du gNB, en fonction de l'option de fractionnement fonctionnel. Son fonctionnement est contrôlé par la CU. Distributed Unit (DU) également connu sous d'autres noms comme RRH (Remote Radio Header) / RRU (Remote Radio Unit) / RE / RU (Remote Unit). [9]

#### 1.5.4. Architecture du cœur 5G:

L'architecture du cœur 5G est au centre de la nouvelle spécification 5G et permet de répondre aux exigences de débit plus élevé que la 5G doit pouvoir prendre en charge. Le nouveau cœur 5G, tel que défini par la norme 3GPP, utilise une architecture des services (SBA) qui couvre toutes les fonctions et interactions de la 5G, y compris l'authentification, la sécurité, la gestion de sessions et l'agrégation du trafic en provenance des appareils terminaux. Le cœur 5G fait de la NFV un élément conceptuel encore plus fondamental, avec des fonctions logicielles virtualisées pouvant être déployées en utilisant l'infrastructure MEC (Multi-access Edge computing) essentielle aux principes architecturaux de la 5G.



**Figure 1.14** : Architecture réseau 5G dans 3GPP Release 15

### 1.5. 4.1. Notion de Network Slicing :

Le Network Slicing ou découpage du réseau est une technique de virtualisation du réseau similaire aux SDN et NFV. Le Slicing permet d'avoir plusieurs réseaux virtuels par-dessus l'infrastructure physique. Le principe du slicing est de découper le réseau pour allouer les ressources par type d'usage, et ainsi prioriser certains services.

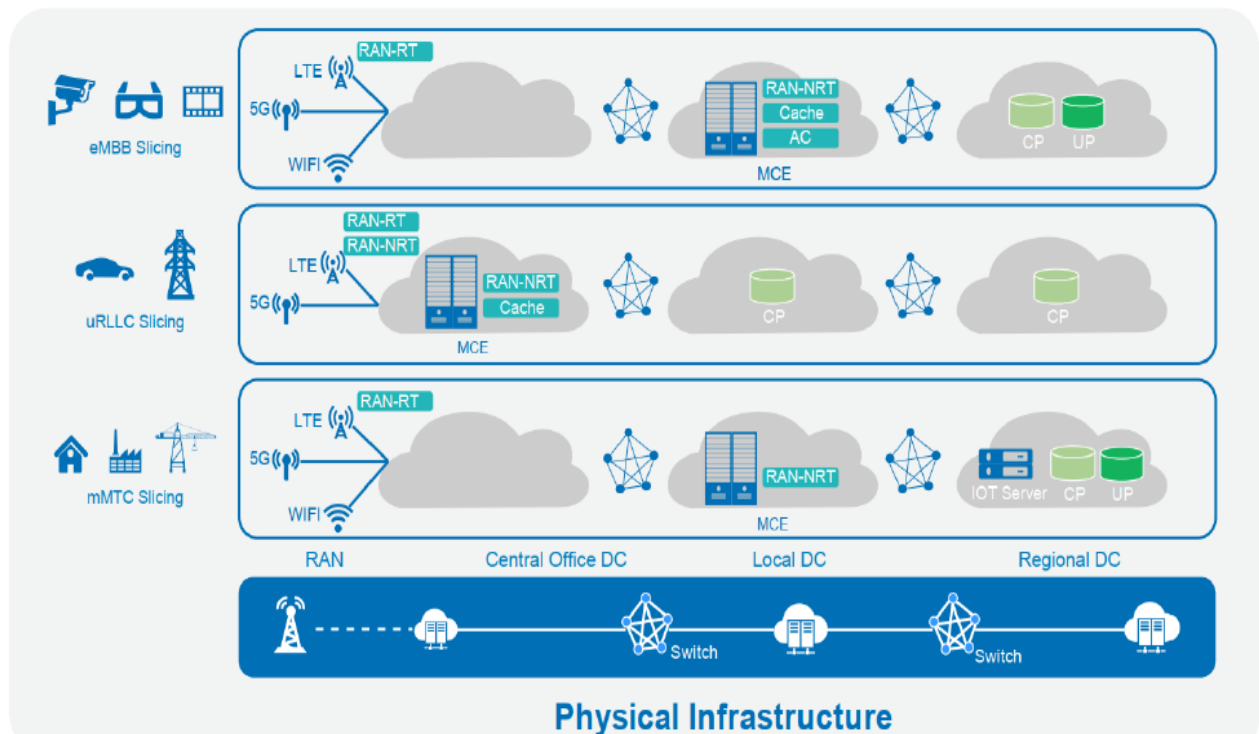
Tous les appareils n'ont pas besoin des mêmes ressources, par exemple ; un temps de latence optimale pour les voitures autonomes, et un débit élevé pour les smartphones.

Certaines applications essentielles comme la voiture sans conducteur exigent une latence très agressive (temps de réponse rapide), alors qu'elles n'ont pas besoin de vitesses de données rapides. À l'inverse, les services d'entreprises basés sur le cloud avec des analyses massives de données privilégient la vitesse par rapport au temps de latence.

Ainsi, un slice ou tranche de réseau est composé d'instances logiques du réseau mobile permettant d'apporter un service réseau de manière efficace en vue de répondre à une QoS (qualité de service) spécifique à ce service.

Network Slicing est la fondation pour supporter les services diversifiés de la 5G, et est aussi la clé pour l'évolution de l'architecture réseau en 5G. Basé sur NFV et SDN, l'infrastructure physique est constituée par des sites et des Data-Center (DC) en 3 couches.

Les Network Slices présentent une disposition logique et sont séparées en tant que structure individuelle, ce qui permet d'obtenir des fonctions de services fortement manipulable et modifiable, et permet aussi d'obtenir une opération et maintenance (O&M) indépendantes. [5]



**Figure 1.15 :** Network Slicing par-dessus l'infrastructure physique

### 1.6. Les Différentes Formes d'ondes spécifiques pour la 5G :

Bien que la couche physique de la 4G utilise la technologie basée sur le (OFDM) (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), la forme d'onde OFDM elle-même présente certains défauts. Par exemple :

1. De grandes fuites hors bande, par conséquent, un intervalle de garde du spectre plus long est nécessaire.

2. Pour éviter les interférences entre les porteuses, une synchronisation est nécessaire entre les nœuds de transmission. Dans le réseau hiérarchique, les stations de base ayant une couverture différente doivent être synchronisées.

Parce que les scénarios d'application de la 5G sont bien plus complexes que la 4G, sa latence et le nombre de ses besoins d'accès sont très stricts.

Cependant, la caractéristique de fuite de l'OFDM et sa synchronisation stricte ne peuvent pas s'adapter à un accès rapide asynchrone pour les entreprises en temps réel et à une utilisation efficace du spectre non continu. Maintenant que la 5G est étudiée, il y a une excellente opportunité de considérer les formes d'onde optimales qui serviront jusqu'à au moins 2040.

Ciblant les inconvénients de l'OFDM, de nombreuses formes d'onde alternatives ont été proposées.

#### a). Modulation UFMC :

**(Universal Filtered Multi-Carrier)** : Il diffère de FBMC au lieu de filtrer chaque sous-porteuse individuellement, UFMC divise le signal en un certain nombre de sous-bandes qu'il filtre. Ensuite, on peut l'utiliser pour améliorer la protection contre les interférences entre symboles.

#### b). Modulation FBMC :

**( Filter Bank based Multi-Carrier )** : son principe de base est de diviser le spectre de fréquence en plusieurs sous-porteuses qui sont très étroites et les filtrer individuellement, il est capable de fournir un très haut niveau d'efficacité spectrale.

**. GFDM : (Generalized Frequency division Multiplexing)**: Est une technique de transmission multi-porteuse flexible qui présente de nombreuses similitudes avec OFDM. La principale différence est que les porteurs ne sont pas orthogonaux entre eux. GFDM fournit un meilleur contrôle des émissions hors bande et réduit le rapport puissance/puissance moyenne.

### 1.7. Conclusion :

Ce chapitre se compose de deux parties. Dans la première partie, nous avons traité des différentes générations de téléphones. Les réseaux 1G ont permis aux services de téléphonie analogique de bénéficier de la mobilité. Les réseaux de deuxième génération ont été caractérisés par la naissance des services de téléphonie cellulaire. Les réseaux 2.5G ont une légère amélioration des services de données avec EDGE. Les réseaux 3G ont amélioré l'expérience Internet mobile, mais avec un succès limité dans l'adoption massive des services de données. Les réseaux 3.5G ont rendu l'utilisation de l'Internet mobile mondiale et ils sont à la base du succès des écosystèmes d'applications mobiles. Les réseaux 4G fournissaient alors tous les services IP (voix et données), une expérience Internet haut débit, avec des architectures et des protocoles de réseau standardisés. Les réseaux 4.5G (LTE Advanced) doublent les vitesses de transfert de données par rapport aux réseaux 4G.

Les technologies évoluent constamment, de nouveaux services et services évoluent avec plus de ressources, notamment en termes de débits ou de latence. Par conséquent, pour obtenir des services de données plus rapidement, le réseau doit être mis à niveau et il doit évoluer. Cette évolution complète du réseau conduit à la transition vers une nouvelle génération de réseaux mobiles.

Dans la deuxième partie, nous avons étudié cette génération, qui est la 5G de cinquième génération, qui se caractérise par des caractéristiques et des technologies avancées qui lui ont permis de faire face à l'augmentation massive du nombre d'équipements utilisateurs qui ne se limite plus aux téléphones portables mais vient d'ajouter des objets connectés.

Le développement de la 5G devrait avoir une myriade de cas d'utilisation, dont beaucoup sont inimaginables aujourd'hui. Il est déjà en mesure de répondre aux exigences et aux contextes d'affaires de 2021 et au-delà. Il est nécessaire de fournir un débit beaucoup plus élevé, une latence beaucoup plus faible, une fiabilité très élevée, une densité de connexion élevée et une bande passante plus élevée. Cela permettra de fournir beaucoup plus de services que les services voix et données. Les exigences 5G couvrent des considérations transversales, y compris les exigences pour les utilisateurs, les systèmes, les services améliorés, la gestion, les opérations, les appareils et les modèles commerciaux.

Par la suite, nous avons présenté les technologies clés utiliser pour répondre aux exigences des réseaux 5G, notamment les formes d'onde post-OFDM. Ces dernières feront l'objet du chapitre deux de ce mémoire.

### 2.1. Introduction :

La forme d'onde est un composant essentiel de toute technologie de communication. De manière générale, il y a deux catégories principales de formes d'onde : formes d'onde à porteuse unique, formes d'onde à porteuses multiples. Les réseaux 2G et 3G ainsi que Zig Bee et Bluetooth adoptent les formes d'ondes. Le réseau 4G utilise une forme d'onde à porteuses multiples. Ils sont également utilisés ADSL, les réseaux locaux sans fil (WLAN), normes WiMax, diffusion audio numérique (DAB) et diffusion vidéo numérique terrestre (DVB-T (Digital Video Broadcasting Terrestria)).

En règle générale, les formes d'onde à porteuse unique ont un rapport de puissance crête sur la puissance moyenne PAPR (Peak to Average Power Ratio) faible, ce qui les rend éco énergétiques - adaptées aux scénarios de couverture limitée et à l'allongement de la durée de vie de la batterie des équipements de l'utilisateur. D'autre part, les formes d'onde multi-porteuses offrent une efficacité spectrale élevée, une allocation de ressources flexible dans le domaine des fréquences et, éventuellement, une intégration facile avec la technologie multi-antennaire. Les formes d'onde à multi porteuses ont été considérées comme les principaux candidats de la 5G pour les raisons susmentionnées.

Dans ce chapitre, nous présentons une étude théorique des formes d'onde multi-porteuses: OFDM, FBMC et UFCM. Dans ce contexte, les principes de mise en œuvre de ces modifications et leurs caractéristiques ainsi que les structures de leurs émetteurs et récepteurs sont étudiés en détail.

### 2.2. Notion de forme d'ondes :

La modulation mono-porteuse consiste à transmettre l'information à travers un canal en la transportant sur une seule onde porteuse à un débit  $D$  (symboles par seconde). Cependant, une fois transmis dans un canal à évanouissement multi-trajets, un symbole peut être distordu à cause de IES) l'Interférence Entre Symbole ISI (Inter Symbol Interférence).

La forme d'onde définit la forme physique du signal qui transporte les informations modulées dans un canal. Les informations sont mappées de l'espace de message à l'espace de signal de l'émetteur et une opération inverse est effectuée sur le récepteur pour récupérer le message dans un système de communication. La forme d'onde, qui définit la structure et la forme des informations dans l'espace du signal, peut être décrite par ses éléments fondamentaux : symbole, forme d'impulsion et le treillis, comme indiqué sur la [Figure 2. 1](#). Les symboles constituent la partie aléatoire d'une forme d'onde, tandis que la forme d'impulsion et le réseau constituent la partie déterministe.

- Symbole : un symbole est un ensemble de nombres complexes dans l'espace de message qui est généré en regroupant un nombre de bits. Le nombre de bits regroupés dans un symbole détermine l'ordre de modulation qui a un impact élevé sur le débit.
- Forme d'impulsion ou forme d'onde (pulse Shape) : la forme des symboles dans le plan du signal est définie par les filtres de mise en forme des impulsions. La forme des filtres détermine comment l'énergie est répartie sur les domaines temporel et fréquentiel et a un effet important sur les caractéristiques du signal.
- Treillis (Lattice) : le treillis est généré en échantillonnant le plan temps-fréquence, et les emplacements des échantillons définissent les coordonnées des filtres dans la grille temps-fréquence. La géométrie du réseau peut présenter différentes formes telles que rectangulaire et hexagonale en fonction de la formation et des distances entre les échantillons. En outre, le treillis peut être exploité en incluant des dimensions supplémentaires telles que le domaine spatial. [32]

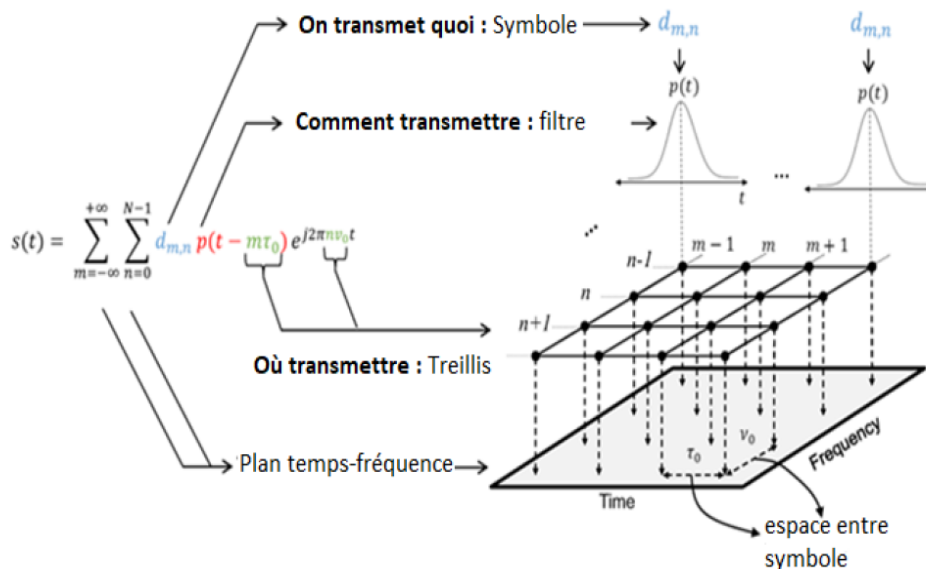


Figure 2.1: Définition d'une forme d'onde

### 2.3. Classification des formes d'ondes multi-porteuses :

Avant de présenter les différentes formes d'onde (FO) candidatent pour la couche physique des futurs réseaux 5G, il est intéressant de les classer en fonction d'un aspect crucial, à savoir l'orthogonalité entre les symboles de données transmis. Dans cette section, nous définirons la condition d'orthogonalité dans les domaines complexes et réels. Ensuite, nous introduirons les formes d'onde non orthogonales.

Dans le contexte de la transmission des données, les modulations multi porteuses se réfèrent à une structure dans laquelle plusieurs symboles sont envoyés en même temps en occupant des sous-bandes différentes. La décomposition de la bande peut être uniforme ce qui conduit à des modulations basées sur les systèmes de Gabor, ou non-uniforme ce qui génère des systèmes de modulation en ondelettes ou en paquets d'ondelettes [29]. Dans le cadre de notre étude nous nous limitons au premier cas avec une décomposition uniforme de la bande.

Dans ce cas les FO multi porteuses peuvent être soit orthogonales soit non orthogonales. Pour les FO orthogonales deux classes existe suivant le domaine d'orthogonalité. Les FO qui respectent la condition d'orthogonalité complexe donnée par l'équation (2.1), et ceux qui respectent la condition d'orthogonalité dans le domaine réel donnée par l'équation (2.2) [11].

$$\int_{\mathbb{R}} g_T(t - mT) e^{\frac{j2\pi k' t}{T}} g_R(t - m'T) e^{\frac{j2\pi k t}{T}} dt = \delta_{m, m'} \delta_{k, k'} \quad (2.1)$$

$$\int_{\mathbb{R}} g_T(\mathbf{t} - \mathbf{m}\mathbf{T}) e^{\frac{j2\pi k t}{T}} e^{\frac{j(m+K)\pi}{2}} g_T(\mathbf{t} - \mathbf{m}'\mathbf{T}) e^{\frac{j2\pi k' t}{T}} e^{\frac{j(m'+k')\pi}{2}} dt = \delta_{m, m'} \delta_{k, k'} \quad (2.2)$$

Où  $\delta_{k, k'}$  la fonction delta de Kronecker est égale à 1 si  $k=k'$  et 0 ailleurs.  $g_T$  et  $g_R$  sont des fonction prototypes des filtres d'émission et de réception.  $\Re[\cdot]$  est l'opérateur de la partie réel.

Dans le tableau 2.1, nous présentons une classification des FO candidates pour la couche physique des futurs réseaux 5G en fonction de la condition d'orthogonalité.

**Tableau 2.1 : Classification basée sur la condition d'orthogonalité des FO candidates à la 5G. [30].**

FO avec orthogonalité dans $\mathbb{C}$	FO avec orthogonalité dans $\mathbb{R}$	FO sans orthogonalité
<ul style="list-style-type: none"> <li>– CP-OFDM</li> <li>– WOLA-OFDM</li> <li>– UFMC</li> <li>– Filtered-OFDM</li> <li>– N-continuous OFDM</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– FBMC-OQAM.</li> <li>– Lapped-OFDMOQAM</li> <li>– WCP-COQAM</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– FBMC-QAM</li> <li>– GFDM</li> </ul>

Dans les sections suivantes nous allons décrire les formes d'ondes multi-porteuses les plus connus dans la littérature.

## 2.4 .modulations multi-porteuses de type OFDM :

### 2.4.1. Historique :

La modulation multi-porteuses a été introduite à la fin des années 50, sa première utilisation était dans les systèmes de communications hautes fréquences militaires. Quelques années plus tard elle a été améliorée avec l'apparition du concept des signaux orthogonaux à bande limitée, concept que l'on appellera par la suite "Orthogonal Fréquence Division Multiplexant" (OFDM) ou multiplexage par division de fréquences orthogonales. La mise en oeuvre de l'OFDM à l'époque consistait à utiliser des filtres de Nyquist. Du fait de la complexité à générer des bancs de filtres de sinusoides, l'OFDM n'a pas tout de suite intéressé les industriels civils. 20 ans plus tard le schéma de modulation-démodulation a été simplifié avec l'utilisation de la transformée de Fourier discrète inverse IFFT(Inverse Fast Fourier Transform) à l'émission et de la FFT(Fast Fourier Transform) au niveau de la réception, ce qui rend facile son implémentation numérique .

L'OFDM a été adopté dans plusieurs normes sans fil telles que les systèmes de radiodiffusion numérique terrestre (Digital Audio Broadcasting (DAB)), la télédiffusion numérique terrestre (Digital Video Broadcasting-Terrestrial (DVB-T)), la norme IEEE802.11a/g / Wi-Fi et le réseau local (Local Area Network (LAN)) de norme IEEE 802.16a/WiMax, elle est également utilisé dans les systèmes mobiles sans fil MC-HSPA (Multi Carrier-High Speed Packet data Access) de troisième génération, et dans les réseaux mobiles de nouvelle génération (Long Term Evolution (LTE)) et 4G [15].

### 2.4.2. problèmes d'interférences :

#### □ □ interférences entre symboles (IES)

Dans un environnement à trajets multiples, un symbole transmis prend différents retards pour arriver au récepteur par différents chemins de propagation. Du point de vue du récepteur, le canal présente une dispersion temporelle dans laquelle la durée du symbole reçu est étalée. Prolonger la durée de symbole fait chevaucher le symbole reçu à l'instant  $t$  avec les symboles reçus aux autres instants. C'est le phénomène des interférences entre symboles IES(Interférence Entre Symbole). Dans le but de surpasser ce problème l'OFDM utilise un intervalle garde qui sera détailler dans la suite du chapitre.

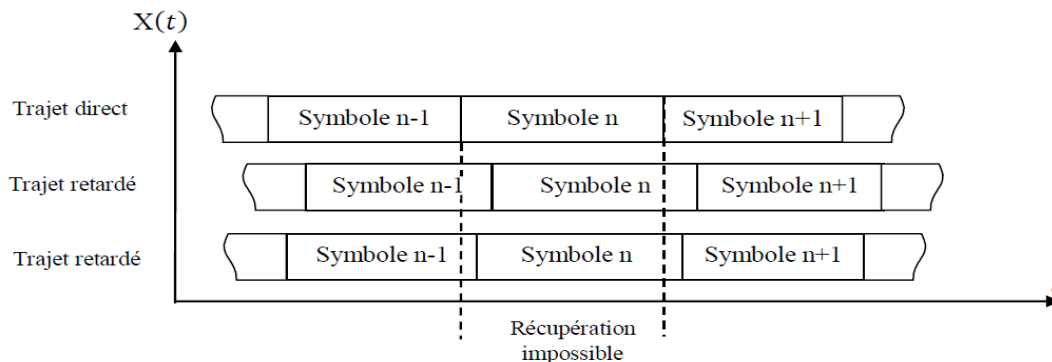
#### □ □ interférences entre porteuses (IEP)

Ce genre d'interférence (IEP) peut apparaître dans les systèmes de transmissions multi-porteuses lors des chevauchements des spectres des différentes sous-porteuses. Ces interférences sont causées principalement par une perte d'orthogonalité entre les différentes sous-porteuses adjacentes.

Afin d'éliminer ces interférences la notion d'orthogonalité qui sera développé au paragraphe (2.2.4) s'avère incontournable. Dans les systèmes OFDM, les spectres des sous-porteuses se recouvrent mais demeurent orthogonaux entre eux, ceci signifie qu'au maximum de chaque spectre de sous-porteuse, tous les spectres des autres sous-porteuses s'annulent [15].

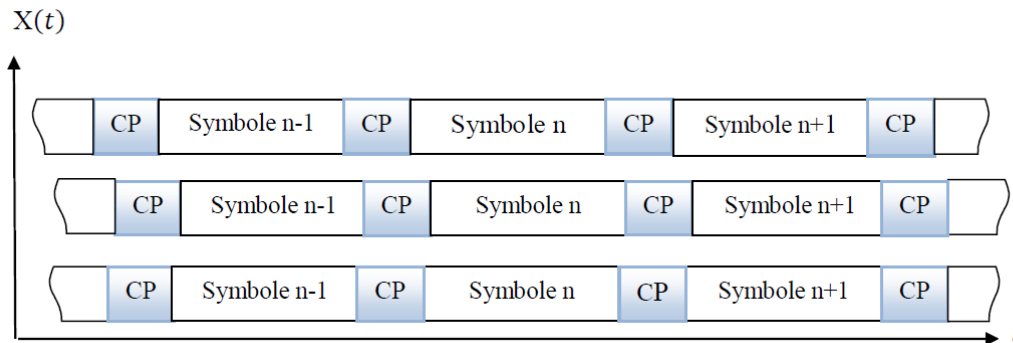
### 2.4.3. Du préfixe cyclique :

Dans la **figure (2.2)**, on observe qu'en présence d'un canal multi-trajet, des versions décalées du symbole  $n$  s'additionnent entre elles et avec les symboles  $(n-1)$ , créant de l'IES. La récupération du symbole est alors impossible.



**Figure 2.2:** Effet du multi-trajet sur le symbole OFDM [15].

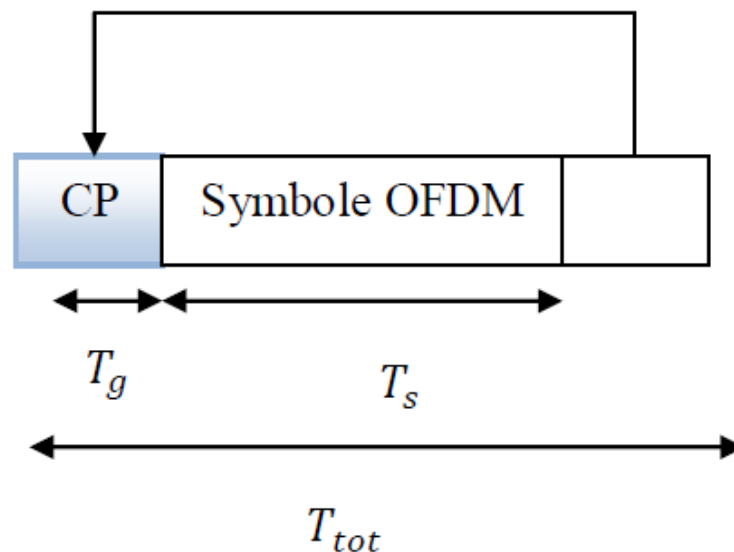
Pour absorber ce retard, une astuce consiste à allonger le symbole OFDM avec un CP (Préfixe cyclique) ou intervalle de garde (GI). Sa durée est généralement comprise entre 1/4 et 1/32 de la durée du symbole. Le débit utile est réduit dans les mêmes proportions. **La figure (2.3)** montre que grâce au préfixe cyclique, il n'y a plus d'interférence entre symboles et la récupération des symboles est alors possible.



**Figure 2.3:** Effet de l'intervalle de garde sur le signal OFDM [15].

La question qui se pose est que doit-on mettre dans l'intervalle de garde pour pouvoir décoder correctement le symbole  $n$  ?

La réponse est qu'il faut restaurer l'orthogonalité des sous-porteuses qui a été perdue. Pour cela, on va copier la fin du symbole au début comme le montre le schéma suivant :



**Figure 2.4:** Insertion du préfixe cyclique [15].

Raisonnons sur des porteuses réelles. Chaque sous-porteuse OFDM correspond à un nombre entier de périodes sur le symbole OFDM (de 0 à  $N-1$ ). En copiant la fin du symbole dans l'intervalle de garde, on prolonge le signal sans créer de discontinuité. On appelle cette donnée, le préfixe cyclique (Figure 2.5).

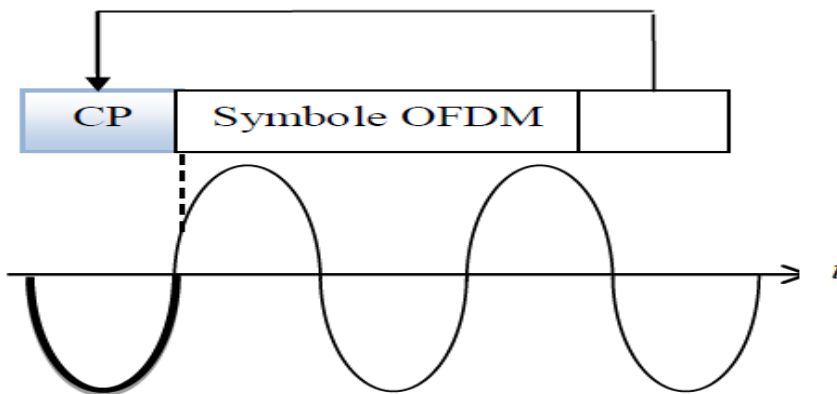


Figure 2.5 : Restauration des porteuses [15].

Le temps de garde peut être un intervalle de garde "blanc" pendant lequel on émet rien cette méthode s'appelle ZP (zéros padding), est plus généralement une copie de la fin de la trame OFDM .[15]

ZP-OFDM

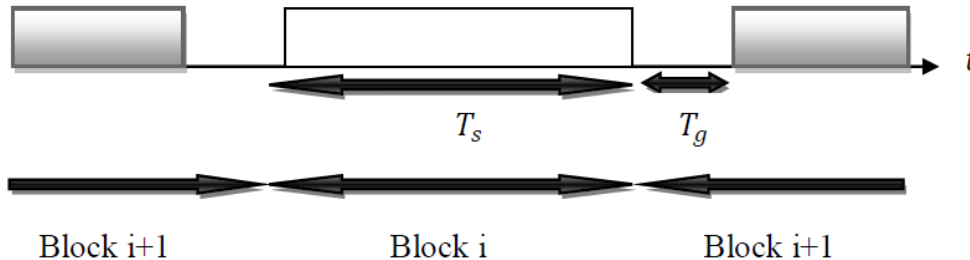


Figure 2.6: Insertion du zéros padding.[15]

2.4.4. Notion d'orthogonalité :

2.4.4.1. Description mathématique :

La notion d'orthogonalité sur un intervalle  $[a b]$  peut être facilement traduite si deux fonctions  $f(t)$  et  $g(t)$  respectent la condition donnée par la formule (2.3) qui traduit le produit scalaire, formant ainsi une base de l'espace fonctionnel . Alors, les sous-porteuses doivent vérifier la condition d'orthogonalité suivante :

$$\int_a^b f(t).g(t)dt = 0 \tag{2.3}$$

Cette condition implique que les deux fonctions considérées sont linéairement indépendantes, c'est-à-dire qu'elles sont disjointes sur l'intervalle  $[a, b]$  et n'interfèrent pas entre elles. Une base fonctionnelle à  $N$  dimension sur un intervalle  $[a, b]$  est construite de manière identique

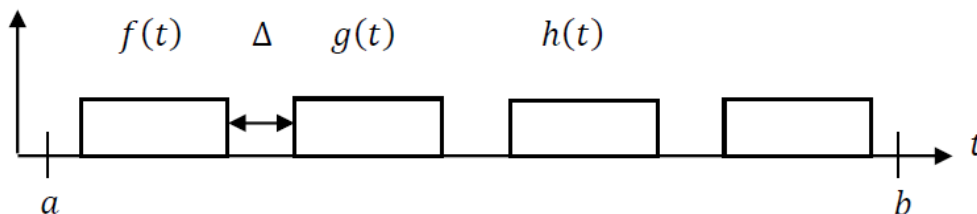
En considérant autant de fonctions  $(f(t), h(t), \dots)$  nécessaires. Celles-ci forment alors une base à  $N$  dimensions. [15]

Afin de pouvoir séparer les sous porteuses à la réception, les porteuses doivent respecter une contrainte d'orthogonalité, à la fois dans le domaine temporel et fréquentiel.

### A. Orthogonalité temporelle :

On considère des fenêtres rectangulaires espacées avec un intervalle de garde  $\Delta$  sur un intervalle de temps  $t$  entre  $a$  et  $b$ . Ces fonctions (fenêtres rectangulaires) sont linéairement indépendantes. La figure ci-dessous illustre un exemple de telles fonctions.

#### Fonction de $t$



**Figure 2.7:** Base orthogonale en temps [15].

Il est évident que :

$$\int f(t) \cdot g(t) dt = 0$$

Et que :

$$\int_a^b g(t) \cdot h(t) dt = 0, \quad \text{etc....}$$

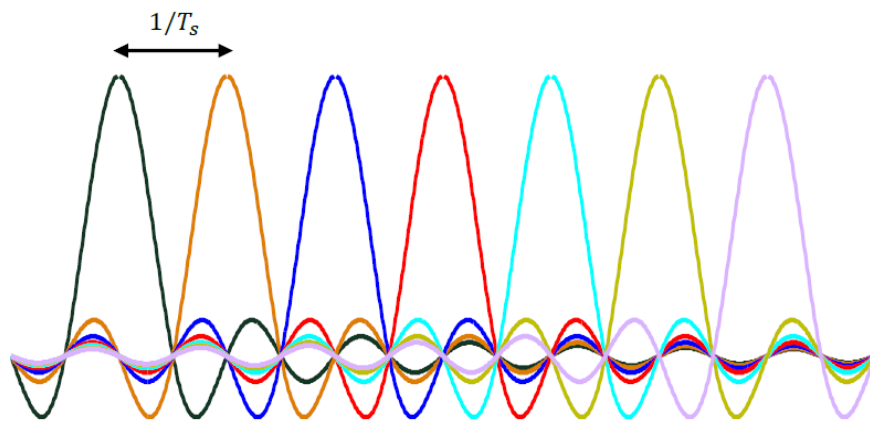
Donc, ces fonctions forment une base orthogonale à  $N$  dimension (autant que de fonctions sur le segment temporel  $[a, b]$  dans un espace fonctionnel à  $N$  dimensions, paramétré en temps sur un support  $[a, b]$ ).

### b. Orthogonalité fréquentielle :

La transformée de Fourier ( $\{.\}$ ) de la fonction porte  $II(t)$  d'amplitude  $A$  et de largeur  $T$  est un sinus cardinal exprimé par l'équation (2.4) :

$$\text{TF}\{II_T(t)\} = A \frac{\sin(\pi f T_s)}{\pi f} = AT \text{Sinc}(f T_s) \quad (2.4)$$

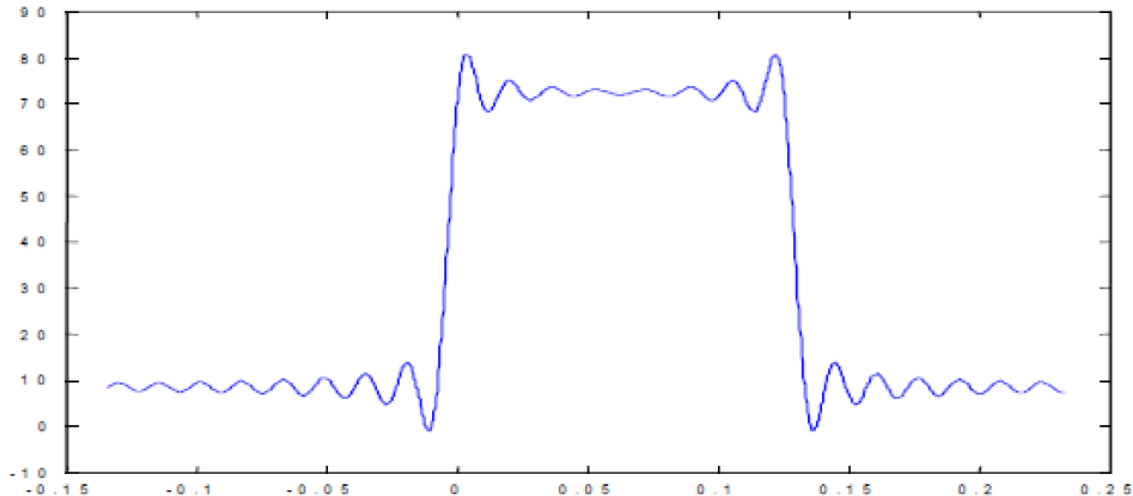
Il est donc possible d'associer à une base orthogonale temporelle de fonctions porte  $II(t)$ , une base orthogonale fréquentielle de sinus cardinaux par la transformée de Fourier de chaque porte. La figure (2.8) représente un exemple de base orthogonale en fréquence dérivée de la base orthogonale en temps décrite au point précédent dans la figure (2.7).



**Figure 2.8:** Spectres des différentes porteuses. [15]

Comme c'est indiqué sur la figure (2.8), quand n'importe quelle sous-porteuse particulière atteint l'amplitude maximale, les sous-porteuses restantes sont à zéros. Chaque porteuse modulant une donnée pendant une fenêtre de durée  $T_s$ . On constate que l'OFDM peut être vue comme une combinaison à coefficients complexes de signaux orthogonaux, représentant les translatés temps/fréquence d'une onde rectangulaire. La transformée de Fourier d'un signal rectangulaire étant un sinus cardinal espacé de  $\Delta f = 1/T_s$ , on note que les sous porteuses se recouvrent spectralement tout en restant orthogonales entre elles. On déduit que l'OFDM réduit l'encombrement spectral et permet d'augmenter sensiblement le nombre de porteuses.

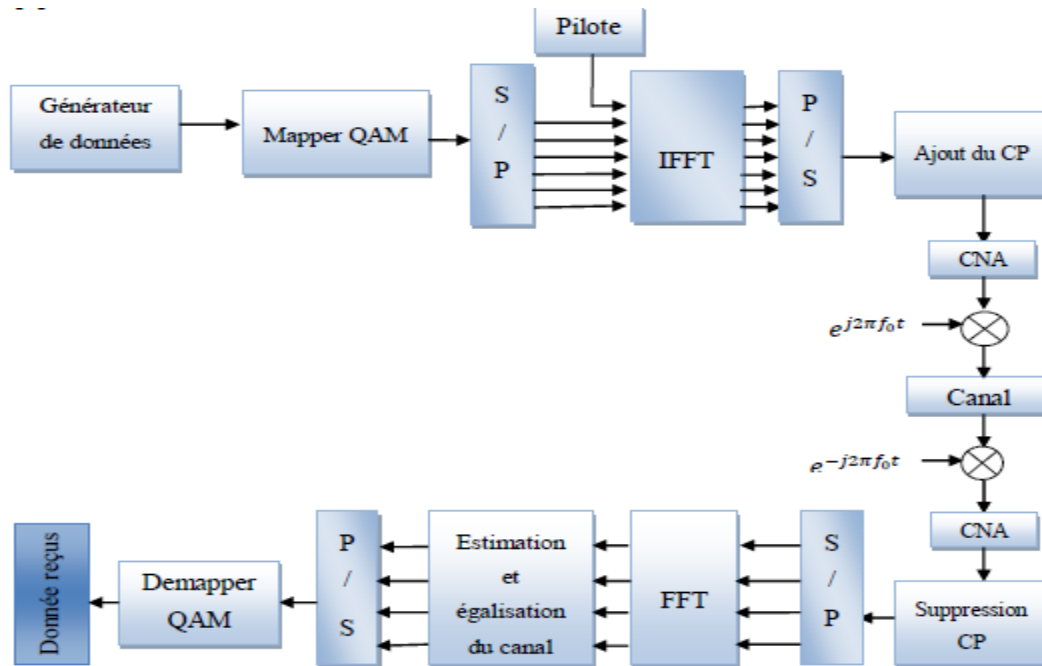
La figure (2.9) montre que, la bande en fréquence est occupée de façon optimale. Puisque le spectre est presque plat dans cette bande. La bande occupée est à peu près  $B=NT$  (En excluant les lobes secondaires de part et d'autre du spectre principal).



**Figure 2.9:** Spectre du signal OFDM pour 8 porteuses .[15]

#### 2.4.5 La chaîne de transmission OFDM :

Le synoptique de la figure (2.10) illustre les différents modules qui composent la chaîne de transmission OFDM. Le modulateur numérique  $M$ -QAM (modulation d'amplitude en quadrature) transforme les données binaires  $bi$  de durée  $Tb$  en symboles complexes  $Ck$  de durée  $Ts=log_2MTb$ , le convertisseur série parallèle divise les données à son entrée en des flux de données parallèles à un débit réduit. La transformée de Fourier discrète inverse (IFFT), permet de générer le signal dans le domaine temporel constitué de  $Nsc$  échantillons. En général, toutes les sous-porteuses sont modulées en utilisant les symboles de données, mais certaines sous-porteuses sont des porteuses pilotes. Les pilotes (Estimation Pilots (EP)) sont connus au niveau des émetteurs et des récepteurs et sont utilisés pour l'estimation du canal. Le nombre de pilotes insérés entre les données dépend du canal et de la précision requise pour son estimation. Les symboles pilotes peuvent être répartis sur plusieurs symboles OFDM consécutifs. Le préfixe cyclique (CP) de longueur  $Tg$  est ajouté pour éliminer les interférences entre symboles tout en gardant l'orthogonalité entre les sous-porteuses. Enfin le symbole OFDM est transmis à l'étage radiofréquence comportant la conversion numérique/analogique et la translation sous la fréquence porteuse [16].

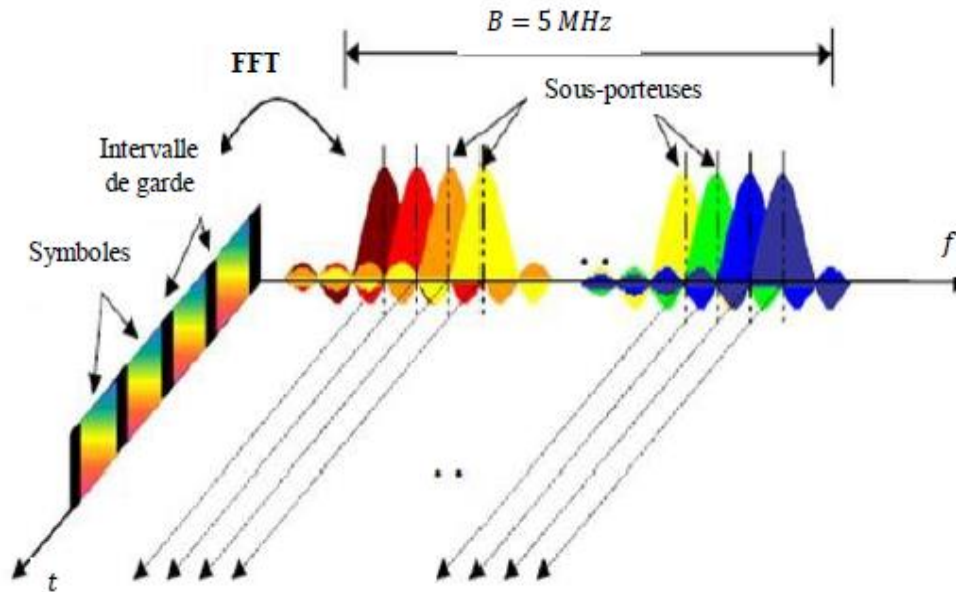


**Figure 2.10:** Chaîne de transmission OFDM . [16]

A la réception, les opérations inverses sont réalisées, en commençant par la suppression du préfixe cyclique la décomposition spectrale des échantillons reçus calculée en utilisant l'algorithme FFT et enfin la démodulation pour retrouver les données binaires transmises.

#### 2.4.6. Principe et fonctionnement de l'OFDM :

Le principe de l'OFDM est de transmettre les informations sur plusieurs porteuses orthogonales entre elles, ainsi le spectre du signal présente une occupation optimale de la bande allouée. Comme le montre la Figure (2.11), l'OFDM découpe le canal en cellule selon les axes du temps et des fréquences. Une porteuse est attribuée à chaque cellule temps/fréquence. L'information à transmettre est répartie sur l'ensemble de ces porteuses, modulée chacune à faible débit par une modulation du type PSK (Phase Shift Keying) ou QAM. Un symbole OFDM comprend l'ensemble des informations contenues dans l'ensemble des porteuses à un instant  $t$  [17]



**Figure 2.11:** Représentation fréquentielle et temporelle d'un signal OFDM . [17]

#### 2.4.7. Principe de la modulation OFDM :

Pour répartir les données à transmettre sur les  $N$  porteuses, on groupe les symboles par paquets de. Considérons une séquence de  $N$  symboles  $c_0, c_1, \dots, c_{N-1}$ . Appelons  $T_s$  la durée du symbole OFDM, c'est-à-dire le temps qui sépare 2 séquences de  $N$  données. Chaque donnée  $c_k$  module un signal à la fréquence.

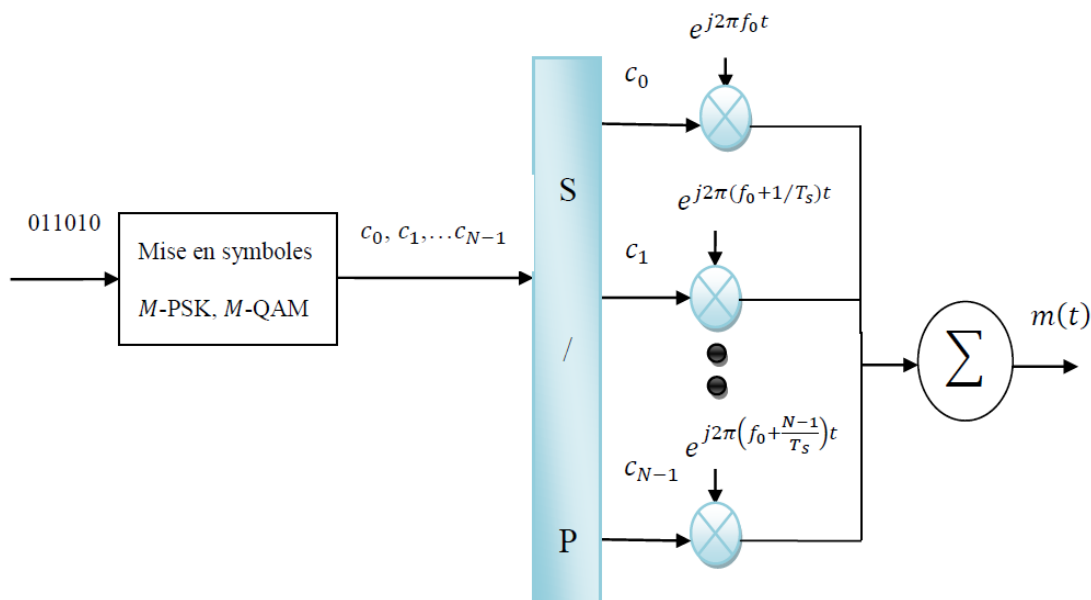
Le signal individuel s'écrit sous forme complexe :  $c_k = e^{2j\pi f_k t}$  (2.5)

Le signal ( $t$ ) total correspondant à toutes les données d'un symbole OFDM est la somme des signaux individuels :  $s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{2j\pi f_k t}$  (2.6)

Le multiplexage est orthogonal si l'espace entre les fréquences est  $1/T_s$ .

$$f_k = f_0 + \frac{k}{T_s}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad \text{et} \quad m(t) = e^{2j\pi f_0 t} \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{2j\pi \frac{k t}{T_s}} \quad (2.7)$$

Le schéma de principe de la modulation OFDM est illustré par la figure (2.12) :



**Figure 2.12:** Schéma de modulation OFDM .[18]

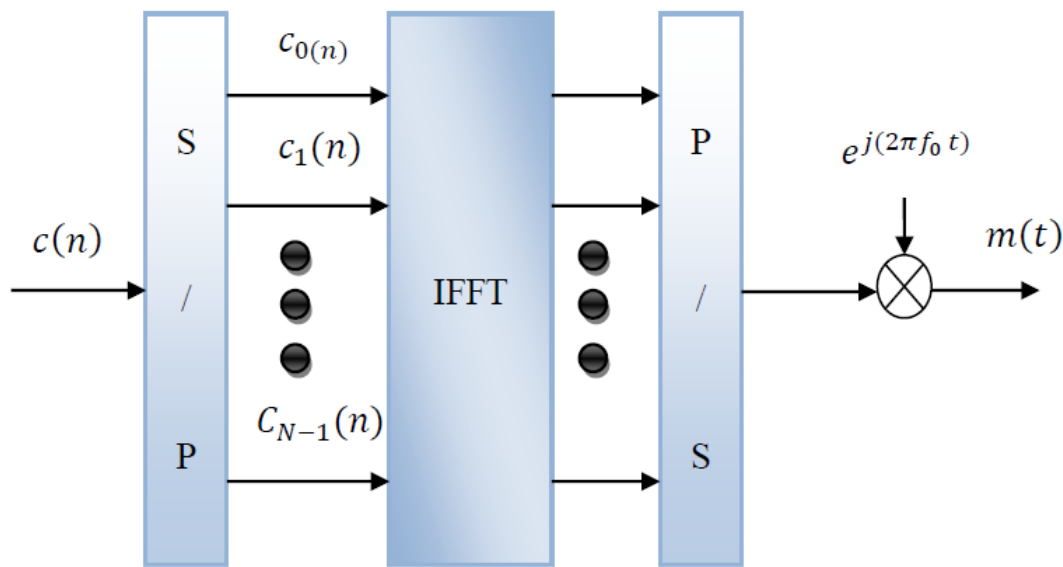
Plus précisément les données numériques  $ck$  sont des nombres complexes définis à partir d'éléments binaires par une constellation de modulation d'amplitude en quadrature QAM ou PSK à plusieurs états (4, 16, 64, de façon générale à  $M=2^n$  symboles  $M$ -aires). Ainsi un symbole  $M$ -aire véhicule l'équivalent de  $n=\log_2 M$  bits.

#### 2.4.8. Principe de la démodulation OFDM :

Le signal parvenu au récepteur s'écrit sur une durée de symbole  $T_s$  :

$$y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k H_k(t) e^{2j\pi(f_0 + \frac{k}{T_s})t} \quad (2.8)$$

$(t)$  : est la fonction de transfert du canal autour de la fréquence  $fk$  à l'instant  $t$ . Cette fonction varie lentement, on peut la supposer constante sur la période ( $T_s \ll 1/Bd$ ). La démodulation consisterait à démoduler le signal suivant les  $N$  sous porteuses, la figure (2.13) présente le principe de la démodulation OFDM.



**Figure 2.13:** Schéma de la démodulation OFDM [18].

#### 2.4.9. Implémentation numérique :

Dans les communications à haut débit, les débits sont limités par des contraintes physiques, le bruit dû aux imperfections des systèmes et la nature physique des composants affectent la transmission du signal émis. On réduit dans ce cas les erreurs de transmission en numérisant les informations. De plus l'implémentation numérique offre aussi l'opportunité d'ajouter des codes correcteurs d'erreurs afin de protéger le signal des perturbations engendrées par le canal de transmission [17].

##### 2.4.9.1. Implémentation numérique du modulateur :

Si on pose que le signal modulé en bande de base ( $t$ ) échantillonné par une période  $T_s/N$ . Appelons  $T_s$  la durée symbole OFDM, c'est-à-dire le temps qui sépare 2 séquences de  $N$  données. Les échantillons  $S_n$  s'écrivent sous la forme.

$$S_n = \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{2j\pi \frac{kn}{N}} \quad (2.9)$$

L'équation (2.7) représente la Transformé de Fourier Inverse des symboles  $ck$  déduis de la constellation de la modulation PSK ou QAM. Pour réaliser la modulation OFDM il suffit d'appliquer l'algorithme de la FFT (Fast Fourier Transform) sur ces symboles  $ck$ .

Le schéma de principe du modulateur OFDM en utilisant l'algorithme de la transformée de Fourier rapide inverse (IFFT) est présenté dans la figure (2.14).

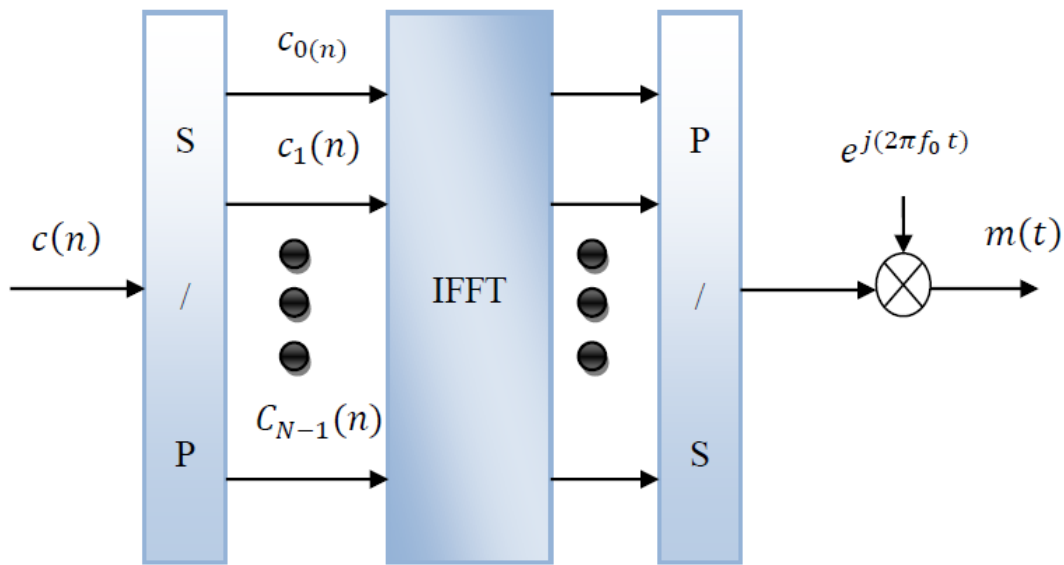


Figure 2.14: Modulateurs OFDM numérique [19].

2.4.9.2. Implémentation numérique du démodulateur :

Le signal parvenu au récepteur s'écrit sur une durée de symbole  $T_s$  :

$$y(t_n) = y(nTs/N) = y_n = (-1)^n = \sum_{k=0}^{N-1} C_k H_k e^{2j\pi \frac{k_n}{N}} \quad (2.10)$$

Où  $y(t_n)$  est la Transformée de Fourier discrète inverse de  $C_k H_k$ . La démodulation consiste à effectuer une Transformée de Fourier rapide de  $y = [y_0, \dots, y_{N-1}]$ . Le nombre de porteuses est choisi tel que  $N = 2n$ , on peut réaliser ce calcul à l'aide d'une FFT. La Figure (2.15) présente le schéma de principe du démodulateur OFDM. [20]

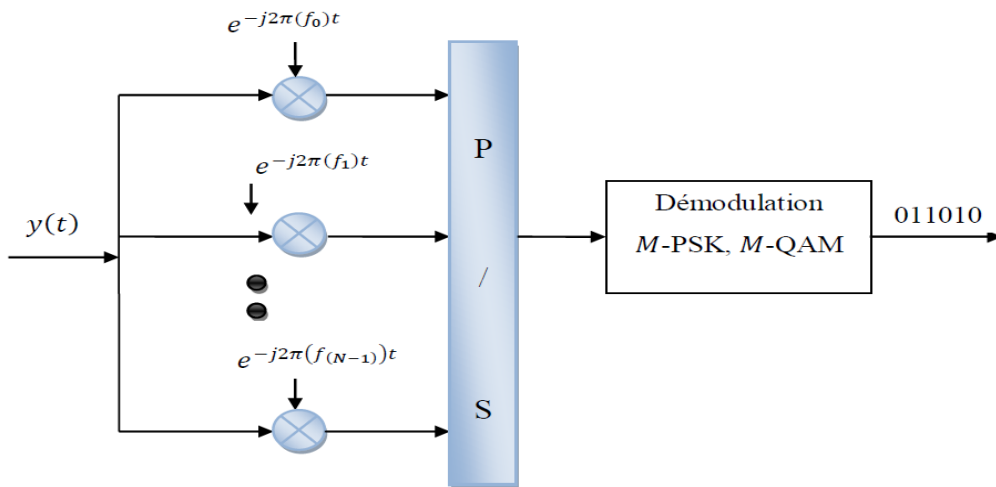


Figure 2.15: Démodulateurs OFDM numérique [19]

Fig

### 2.4.10. Les avantages et les inconvénients de l'OFDM :

#### □□ Les Avantages:

- Le modulateur et le démodulateur peuvent être réalisés en utilisant une IFFT et une FFT respectivement.
- La technique OFDM dispose d'une très grande flexibilité tant dans l'allocation de bits par sous-porteuse que dans l'allocation de débit dans un contexte multi-utilisateurs.
- Les interférences entre symboles ISI(Inter Symbol Interférence) et entre porteuses ICI(Inter Carrier Interférence) peuvent être évitées à l'émission et corrigées en réception.
- Les techniques multi-porteuses sont robustes en termes d'égalisation.
- Une utilisation efficace des ressources fréquentielles permet d'éviter le chevauchement entre canaux et de garder une orthogonalité parfaite.

#### □□ Les inconvénients:

- Flexibilité : les préfixes cycliques réduisent l'efficacité spectrale.
- Évolutive : la localisation spectrale est trop mauvaise
- Fluctuation d'enveloppe : Le signal OFDM présente une forte fluctuation d'enveloppe est donc un PAPR (Peak-to- Average Power Ratio) élevé. Exigeant une grande linéarité de la chaîne de transmission, en particulier au niveau de l'amplificateur de puissance, qui va présenter un rendement médiocre qui est incompatible avec une consommation optimisée pour une application mobile.
- Robuste et fiable : l'OFDM est également très vulnérable aux problèmes de décalage en fréquence (Frequency offset) et de synchronisation. Dans le premier cas, la fréquence offset engendre des interférences entre porteuses qui peuvent détruire l'orthogonalité entre les porteuses. Dans le second cas les erreurs de synchronisation introduisent un déphasage sur les symboles reçus
- Rapide : Très difficile à supporter des symboles courts avec le retard du canal.

## 2.5. La modulation multi porteuse à base de banc de filtre (FBMC) :

### 2.5.1. Introduction :

L'OFDM présente quelques inconvénients majeurs comme l'insertion de l'intervalle de garde, un niveau très élevé des lobes latéraux entraînant une fuite de puissance entre les différentes sous-porteuses. La technique OFDM va, alors, être moins utilisée au profit des techniques multi-porteuses à base de banc de filtres appelées FBMC fait partie des candidats les plus prometteurs pour la futur 5G. Les systèmes basés sur la modulation FBMC sont complexes par rapport à l'OFDM. Pour garantir une communication sans interférence, il est également conserve les avantages de l'OFDM.

2.5.2. Bancs de filtres:

A l'inverse de l'OFDM la FBMC utilise des bancs de filtre qui sont considérées comme un tableau qui regroupe  $M$  signaux en entrée sur  $M$  lignes et donne  $M$  signaux en sortie, tel qu'il est représenté sur la **figure 2.16**

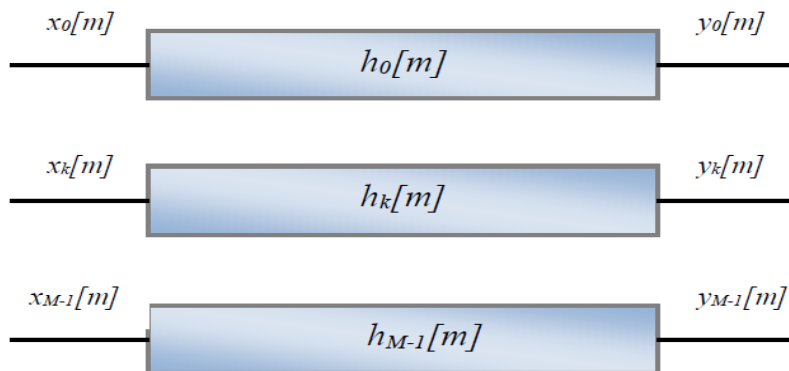


Figure 2.16 : Architecture d'un banc de filtre

Si toutes les entrées du filtre sont connectées entre elles, alors le même signal est envoyé à travers le banc de filtre  $x_i[m]=[m]$ . Dans ce cas le banc de filtre analyse l'entrée  $[m]$  sur dessous-banes selon les caractéristiques de chaque filtre, d'où ce filtre est appelé AFB (Analysais Filter Bank) et le système est dit système de sous-bande (**figure 2.17 (a)**).

Dans le cas contraire, les signaux sont filtrés et les sorties des filtres sont connectées et additionnés entre elles, un nouveau signal  $[m]=\sum_{k=0}^{M-1} y_k[m]$  sera composé et synthétisé. Dans ce cas le filtre est nommé SFB (Synthesis Filter Bank) **figure 2.17(b)** [21].

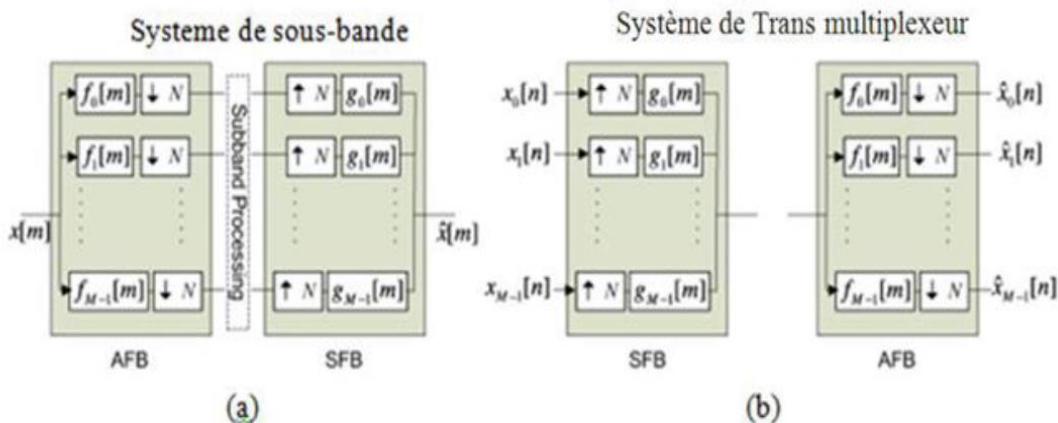


Figure2.17 : Configuration du system sous-band et de trans-multiplexeur [21].

### 2.5.3. Bancs de filtre multi-cadences :

On peut utiliser les bancs de filtres dans plusieurs domaines, comme le traitement du signal et la compression et le traitement d'image.

Le fonctionnement principal des bancs de filtre est de diviser le signal en des groupes de sous-bandes, en utilisant deux opérations principales sur le signal qui sont la décimation et l'interpolation. Ces opérations, détaillées dans les sous-sections suivantes, peuvent être effectuées par des blocs de construction appelés décimateurs et extenseurs [21].

#### 2.5.3.1. Décimation:

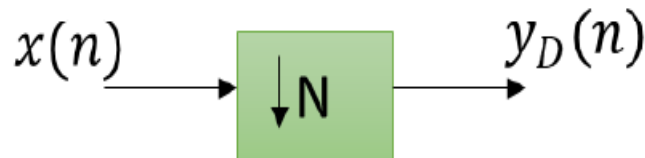
Cette opération réalisée dans le (AFB) c'est une opération qui fait un sous-échantillonnage du signal d'entrée. Le sous-échantillonnage réduit le taux d'échantillonnage en ne sélectionnant que  $N$  échantillons du signal filtré.

Le dispositif de décimation génère une séquence de sortie ( $n$ ) à partir d'un signal d'entrée  $x(n)$  en fonction de  $N$ , ou  $N$  est un entier.

$$y_D(n) = x(Nn) \quad (2.11)$$

Dans ce cas on ne peut pas récupérer le signal d'entrée ( $n$ ) à partir du signal de sortie  $y_D$

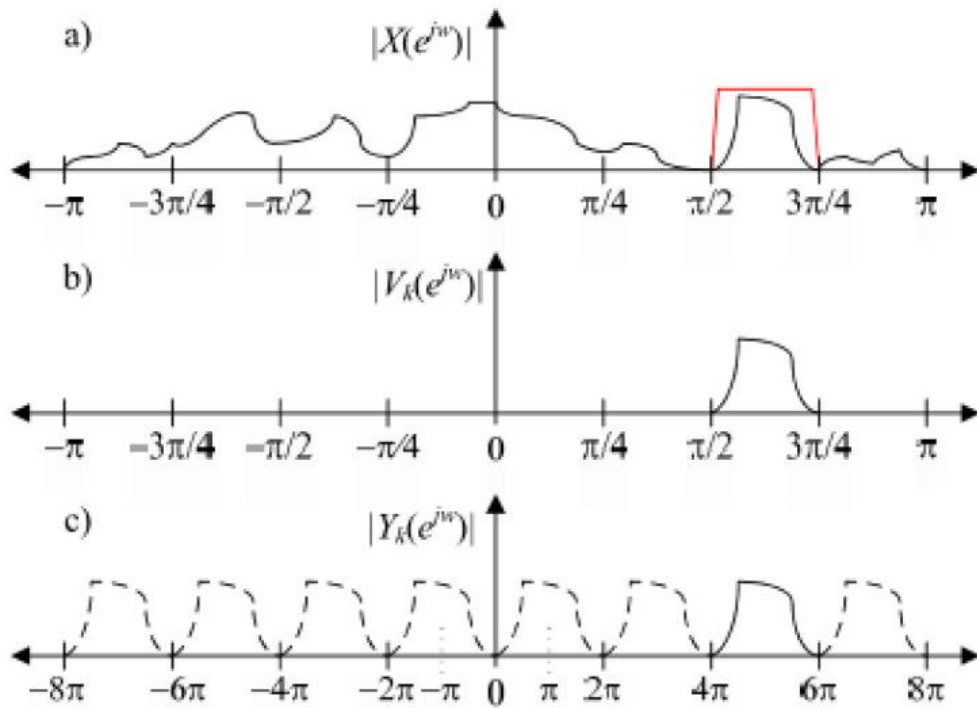
À cause de la perte d'information [21].



**Figure 2.18 :** Dispositif de decimation

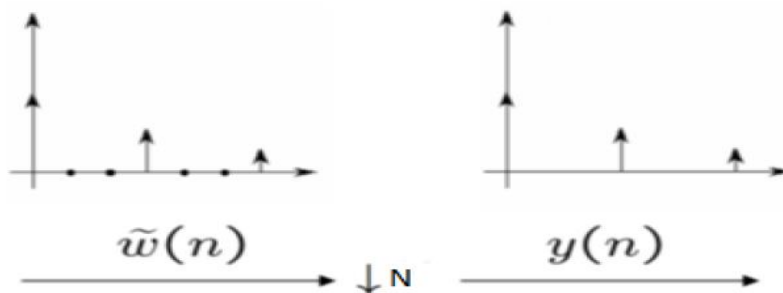
#### ➤ La fonction de décimation sur le domaine fréquentiel et temporel :

Dans le domaine fréquentiel, le spectre de sortie est représenté par une répartition de  $N$  répliques décalées du spectre d'entrée élargi par le facteur  $N$ . La **figure 2.19** représente dans le domaine fréquentiel les signaux aux différentes étapes de décimation pour un facteur  $N=8$ .



**Figure 2.19 :** Décimation du signal avec des filtres complexes. A : spectre du signal d'entrée. B : Spectre après filtrage anti alias. C : résultat du spectre après sous-échantillonnage par  $N = 8$ .

Dans le domaine temporel c'est la suppression et l'élimination de quelques échantillons.



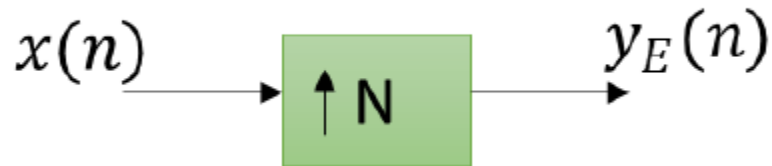
**Figure 2.20 :** Sous-échantillonnage par  $N=2$ .

Le signal de sortie est :

$$Y_D(e^{j\omega}) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(e^{j(\omega-2\pi k)/N}) \tag{2.12}$$

**2.5.3.2. Interpolation :**

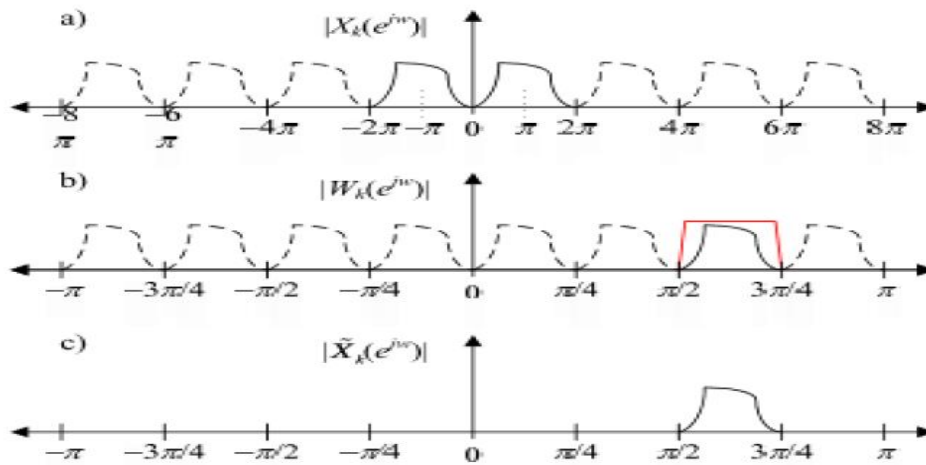
L'interpolation consiste à augmenter la fréquence d'échantillonnage dans un rapport entier  $N$ . Parfois, elle est appelée sur-échantillonnage. Cette opération peut se faire en insérant  $N-1$  valeurs nulles après chaque échantillon [23].



**Figure 2.21 :** Dispositif d'interpolation.[23]

➤ **La fonction d'interpolation sur le domaine fréquentiel et temporel**

Dans le domaine fréquentiel, le spectre du signal d'entrée (a) passe par le suréchantillonnage qui met en évidence la bande d'intérêt (b) par la suite l'interpolation par un filtre passe-bande décide du choix du spectre du signal . [22]

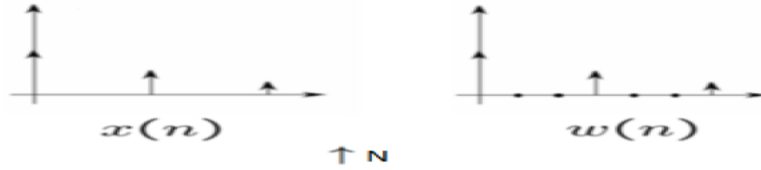


**Figure 2.22 :** Représentation des étapes d'Interpolation

Le signal de sortie  $Y_E$  est :

$$y_E(Z) \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)Z^{-kL} = x(Z^L) \tag{2.13}$$

Dans le domaine temporel, cette opération ajoute des zéros entre les échantillons dans le Domaine temporel.



**Figure 2.23 :** Sur-échantillonnage par la  $N = 2$  (L'insertion des échantillons d'une valeur zéro dans le domaine temporel).

**2.5.3.3. L'identité multi-cadence :**

Pour finaliser cette section, il est nécessaire de rappeler les identités dans le traitement du signal multi-cadence à la **figure 2.24**. Ces identités multi-cadences permettent la commutation de l'ordre de l'opération sur/sous-échantillonnage avec les filtres correspondants [22].



**Figure 2.24 :** Identité de taux variable

Le filtrage a lieu au taux inférieur, et avec des filtres décimés, ce qui permet un traitement plus efficace et moins complexe. Les identités sont exploitées lorsque l'objectif est d'implémenter le banc de filtre d'une manière efficace. [22]

**2.5.4. Bancs de filtre modulés :**

L'idée est de combiner le principe de transformé en blocs avec celle de banc de filtre en introduisant du recouvrement. Pour cela, il suffit que le nombre de voies d'entrée du banc d'analyse soit plus grand que le nombre de voies de sorties et inversement pour le banc de synthèse. On obtient donc un banc de filtre de  $L$  retard à l'entrée, un sous échantillonnage par  $M$ ,  $M$  voies intermédiaires, et  $L$  retard à la sortie .[25]

Pour obtenir les filtres du canal du banc de filtre on se base seulement sur de filtre FIR, et on obtient la modulation par la multiplication avec cosinus, sinus ou exponentielle. [21]

**2.5.4.1. Bancs de filtre à modulation cosinus CMFB :**

Dans cette technique, les filtres d'analyse et de synthèse sont obtenus à partir du filtre prototype par modulation cosinoïdale.

On a  $P_p(n)$  les coefficients de réponse impulsionnelle du filtre, donc les coefficients d'analyse  $h_K(n)$  et le filtre de synthèse  $f_K(n)$  sont donnés par :

$$h_k^c(n) = 2h_p(n)\cos\left((2K + 1)\frac{\pi}{2M}\left(n - \frac{N}{2}\right) + (-1)^{K\frac{\pi}{4}}\right) \tag{2.14}$$

$$f_k^c(n) = 2h_p(n) \cos \left( (2K + 1) \frac{\pi}{2M} \left( n - \frac{N}{2} \right) - (-1)^{K \frac{\pi}{4}} \right) \quad (2.15)$$

Où

$$k = 0, 1, 2, \dots, M - 1 \text{ et } n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$$

A partir des équations précédentes on remarque que les filtres de synthèse sont des versions inversées dans le temps des filtres d'analyse.

$$f_k^c = h_k^c(N - n) \quad (2.16)$$

Pour la réalisation de ces systèmes on utilise la transformée discrète en cosinus. Le but principal de cette technique est d'optimiser les coefficients du filtre prototype et ainsi réduire le coût de mise en oeuvre, ceci est l'un des points positifs de ce système. [22]

#### 2.5.4.2. Bancs de filtre à modulation sinus SMFB :

Dans ce système, les filtres d'analyse et de synthèse sont obtenus à partir du filtre prototype par modulation sinusoïdale.

Les filtres de sous-canal pour le SMFB sont obtenus lorsque l'on remplace le terme cosinus dans les équations (2.17) et (2.18) pour une durée indéterminée. Les blocs de modulation utilisés dans les CMFB (Cosinus Modulation Filter Bank) et SMFB implémentations sont définis comme suit : [22]

$$[\mathbf{C}]_{kn} = \sqrt{\frac{2}{M}} \cos \left( \left( n + \frac{1}{2} \right) \left( K + \frac{1}{2} \right) \frac{\pi}{M} \right) \quad (2.17)$$

$$[\mathbf{S}]_{kn} = \sqrt{\frac{2}{M}} \sin \left( \left( n + \frac{1}{2} \right) \left( K + \frac{1}{2} \right) \frac{\pi}{M} \right) \quad (2.18)$$

#### 2.5.4.3. Banc de filtre à modulation exponentielle EMFB :

Les bancs de filtres à modulation exponentielle (EMFB) sont appelés modulation complexe, ils sont obtenus par la modulation exponentielle du filtre prototype. L'analyse et la synthèse des filtres résultants ont des réponses d'amplitude simples qui divisent toute la gamme de fréquence uniforme. Les bancs de filtres à modulation exponentielle peuvent être mis en oeuvre indépendamment ou dérivés d'une combinaison de banc de filtre à modulation cosinus et banc de filtre à modulation sinus. [22]

Les filtres d'analyse  $H_k$  sont liés aux filtres prototype

$H_0$  Avec  $H_k = H_0 Z W_M^K$  où  $W_M = e^{-j \frac{2\pi}{M}}$   
Sont obtenus par la modulation exponentielle de  $h_0(n)$ .

$$h_k[n] = h_0[n] e^{\frac{j2\pi kn}{M}} \quad (2.19)$$

Les coefficients de  $h_k[n]$  sont complexes, même lorsque  $h_0[n]$  est réel, quand ils sont mis en oeuvre en utilisant la transformée DFT. Ainsi les bancs de filtres DFT sont un type de bancs de filtres exponentiellement modulés qui sont implémentés en utilisant des

structures polyphasées et FFT. La différence entre les DFT et les EMFB est dans l'échantillonnage et leurs canaux sont empilés. [22]

La mise en oeuvre la plus populaire des bancs filtre modulés exponentiellement est donnée par les équations (2.20) et (2.21). Considérons  $h(n)$  comme le filtre passe-bas prototype. La synthèse et l'analyse des bancs de filtre pour un sur-échantillonné par un facteur 2 sont définis comme suit: [22]

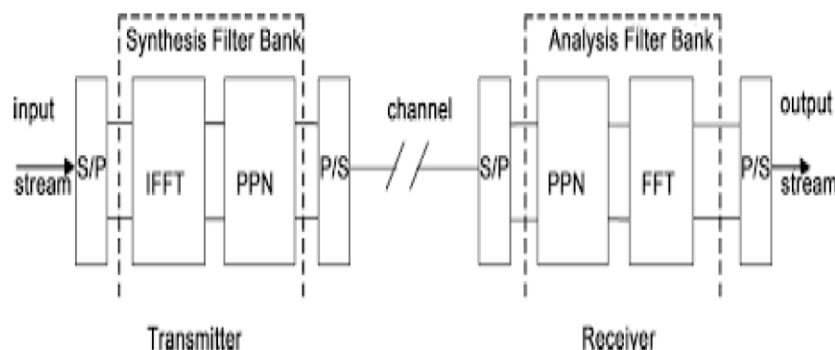
$$f_k^e(n) = \sqrt{\frac{2}{M}} h_p(n) \exp \left( j \left( n + \frac{M+1}{2} \right) \left( K + \frac{1}{2} \right) \frac{\pi}{M} \right) \quad (2.20)$$

$$h_k^e(n) = \sqrt{\frac{2}{M}} h_p(n) \exp \left( -j \left( N - n + \frac{M+1}{2} \right) \left( K + \frac{1}{2} \right) \frac{\pi}{M} \right) \quad (2.21)$$

Où  $n=0, 1, \dots,$   
Et  $k=0, 1, \dots, 2M-1$

### 2.5.5. Principe de fonctionnement de la technique FBMC :

La technique FBMC utilise le même principe que l'OFDM, la plus grande différence entre ces derniers c'est le type du filtre utilisé.



**Figure 2.25 :** Chaîne de transmission FBMC.

#### 2.5.5.1. Principe de modulation :

Dans la partie d'émission FBMC, le signal modulé passe par le bloc d'IFFT pour convertir le signal du domaine fréquentiel au domaine temporel ensuite il sort et passe par le bloc du filtre polyphasé et enfin les signaux résultants seront regroupés parallèlement ou en série et envoyé sur le canal.

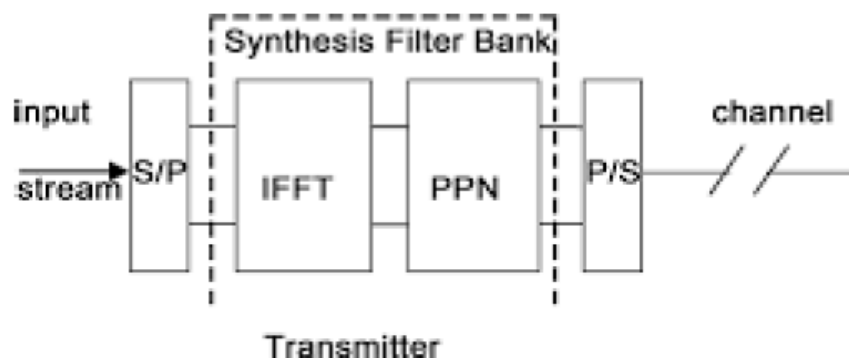


Figure 2.26 : Architecture d'un émetteur FBMC

### 2.5.5.2. Principe de démodulation :

À la réception c'est l'opération inverse qui se fait, une conversion série parallèle du signal est effectuée avant le passage par le filtre polyphasé, ensuite par le bloc FFT et enfin le signal de sortie est démodulé et on peut récupérer les informations.

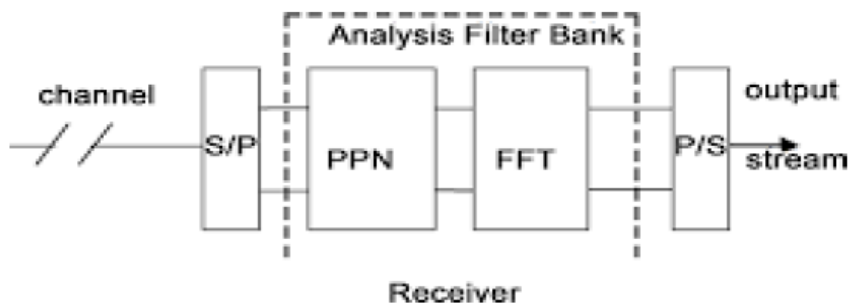


Figure 2.27 : Architecture d'un récepteur FBMC

### 2.5.6. Structure FBMC avec modulation OQAM :

La base des systèmes OFDM et FBMC est le calcul FFT. Dans la FBMC, le réseau polyphasé (PPN) qui est un ensemble de filtres numériques est ajouté après le calcul FFT (banque de filtre d'analyse à l'émetteur et banque de filtre de synthèse au récepteur). En conséquence, pendant la transmission du signal de données, le streaming est différent dans chaque système. Pour atteindre une efficacité maximale, les bancs de filtres sont combinés avec modulation Offset-QAM. [24]

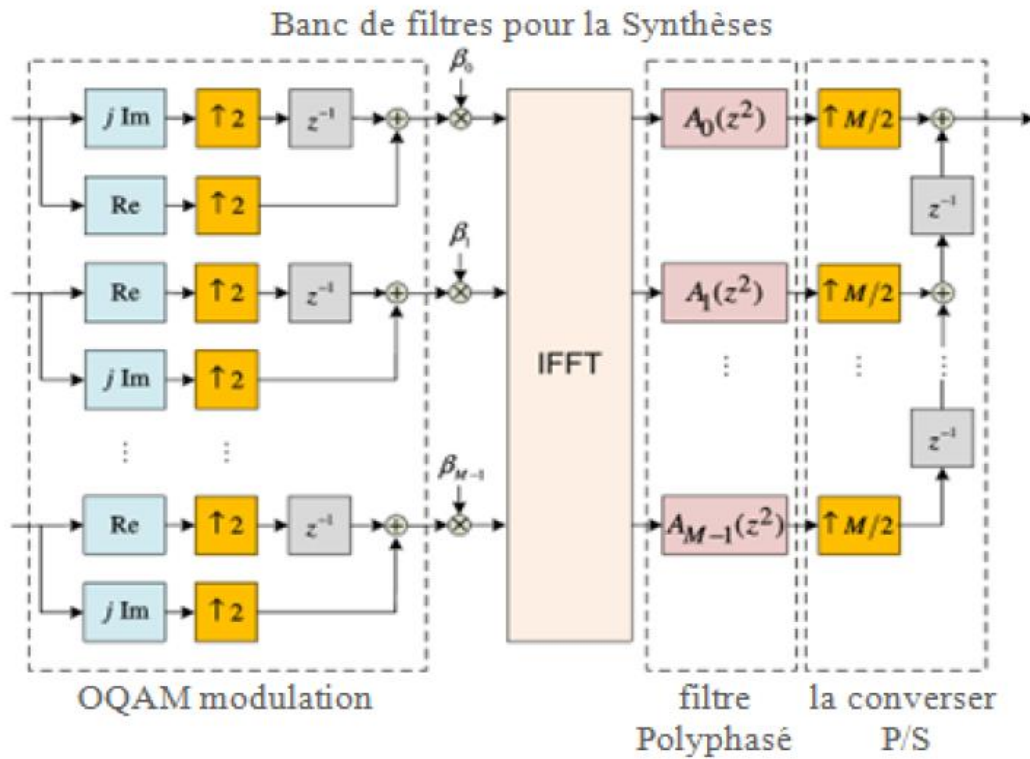


Figure 2.28 : Structure d'un émetteur FBMC/OQAM

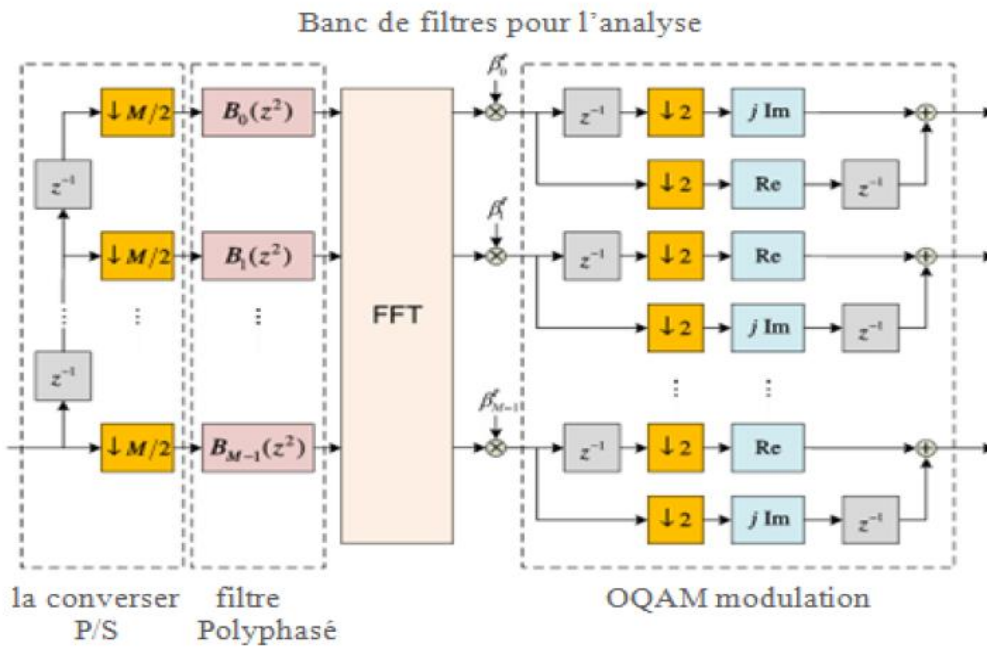


Figure 2.29 : Structure d'un récepteur FBMC/OQAM (Offset QAM)

### 2.5.7. Avantages et inconvénients de la FBMC :

- **Les avantages**

- Pas d'insertion d'un préfixe cyclique.
- Réduction du OOB (Out Of Band) et PARP.
- L'impulsion dans le domaine fréquentiel et temporel est bien localisé.
- Donne un spectre efficace.

- **Les inconvénients**

- Implémentation des filtres dans ses systèmes est complexe.
- Fournit un bruit robuste.

### 2.6. Les modulations multi-porteuses de type UFMC :

Universal Filtered Multi-Carrier (UFMC) est un format de modulations multi-porteuses vues comme une modification de la forme d'onde 4 G bien connue CP-OFDM. Au lieu d'appliquer un CP, il applique un filtrage par groupe de sous porteuses. En décrivant  $K$  le nombre total de sous-porteuses, supposons que ces sous-porteuses  $K$  sont divisées en  $B$  groupes distincts ; bien que les groupes soient autorisés à être composés de nombres différents de sous-porteuses, en raison de simplicité, on propose ici que chaque groupe est composé de  $N$  sous-porteuses, de sorte que  $K = N B$  .[26]

#### 2.6.1 L'émetteur UFMC :

La figure (2.30) montre que l'UFMC divise la bande complète des  $N$  sous-porteuses en sous-bandes dont chacune a un nombre fixe de sous-porteuses. Une IFFT de  $N$  points est calculée au niveau de chaque sous-bande, par la suite la fonctionnalité de filtrage permet de réduire la longueur du filtre. Enfin les réponses des différents filtres sont additionnées.

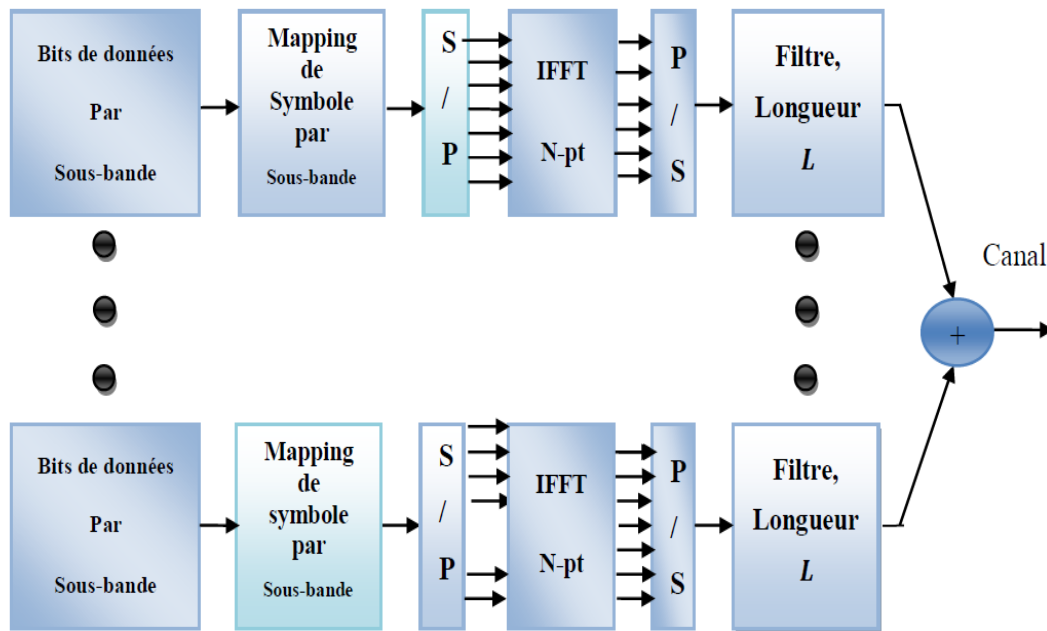


Figure 2.30: Emetteur UFM.

### 2.6.2 Le récepteur UFM :

Le figure (2.31) illustre le traitement de la modulation UFM à la réception, basé sur la transformé de Fourier. Le filtrage par sous-bande étend la fenêtre de temps de réception à la prochaine valeur de puissance de deux pour l'opération FFT. Chaque valeur de fréquence alternative correspond à un lobe principal de sous-porteuse. Dans des scénarios typiques, l'égalisation par sous-porteuse est utilisée pour égaliser l'effet conjoint du canal.

Dans cet exemple, seul le filtre de sous-bande est égalisé car aucun effet de canal n'est modélisé. Du bruit est ajouté au signal reçu pour obtenir le rapport signal / bruit désiré.

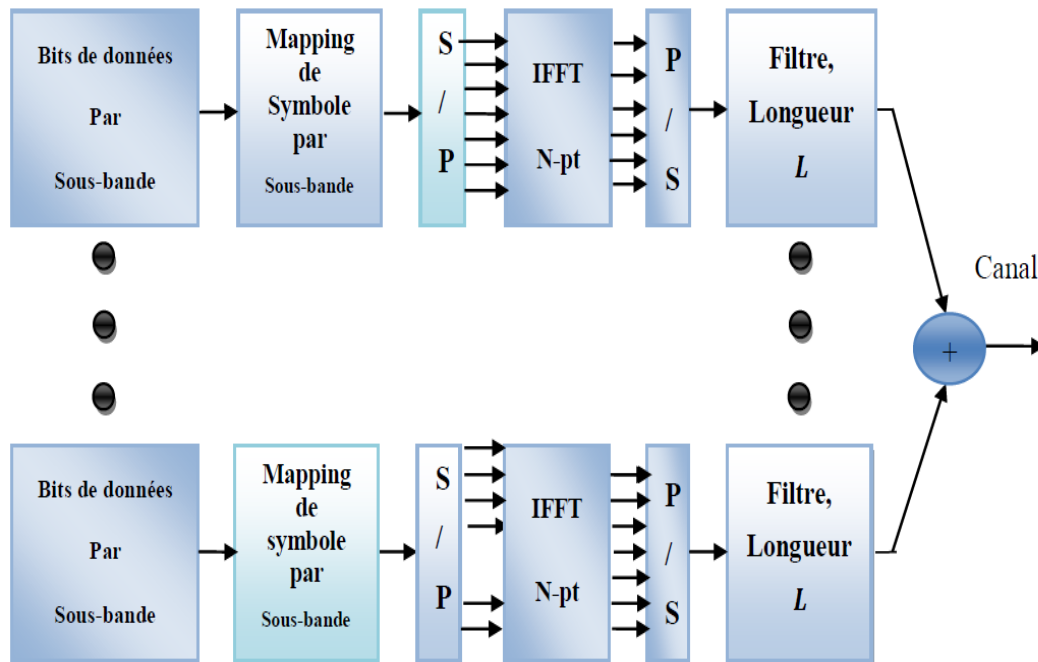


Figure 2.31: Récepteur UFMC.

### 2.6.3 .Les filtres prototypes :

Les filtres prototypes sont des conceptions de filtres électroniques utilisés comme un modèle de conception de filtre modifiée à une application particulière. Ils constituent un exemple de conception non dimensionnée à partir de laquelle le filtre souhaité peut être transformé.

Le choix du filtre prototype est particulièrement important. Il fournit en effet des possibilités d'adaptation par rapport à l'OFDM : Les filtres prototypes peuvent ainsi être construits afin de satisfaire certains objectifs, tels que la location en temps et fréquence, la régularité, etc.

Il est néanmoins nécessaire que le filtre prototype vérifie une contrainte d'orthogonalité, ce filtrage supplémentaire, associé à l'opération IFFT, forme une structure de bancs de filtres, dans laquelle le filtre prototype est conçu pour la suppression des interférences entre symboles.

### 2.6.4 .Les bancs des filtres :

Le banc de filtre est un tableau de  $M$  filtres, il est supposé regrouper les  $M$  signaux d'entrée sur  $M$  lignes distinctes à l'arrivée.

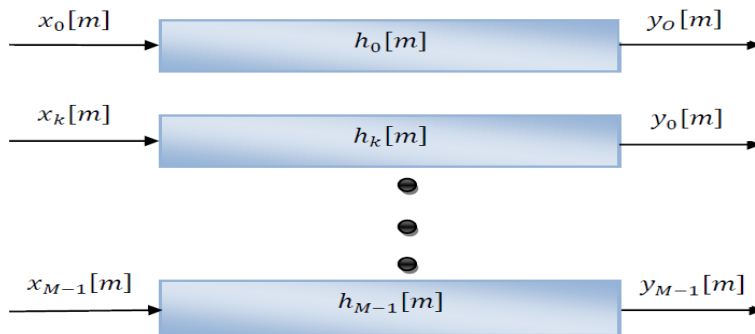


Figure 2.32: Un exemple d'un banc de filtre .[22]

Il existe deux types de banc du filtre (SIMO, MIMO), SIMO (Single Input Multiple output) c'est un banc de filtre à une seule entrée qui se divise après sur M signaux. D'autre part le MIMO a plusieurs entrées/sorties qui dépendent du nombre de signaux M avec une seule sortie.

Le vrai pouvoir des bancs de filtre est mis à profit quand ils sont utilisés par paires, en les combinant comme un système de sous-bande figure (2.33- (a)) ou Trans-multiplexeurs figure (2.33-(b)), comme indiqué à la figure (2.33) on suppose que les conversions des taux  $N$  sont les mêmes dans toutes les sous- bandes. D'autre part, la configuration du système Trans-multiplexeur est appliquée dans les communications multi-porteuses .[22]

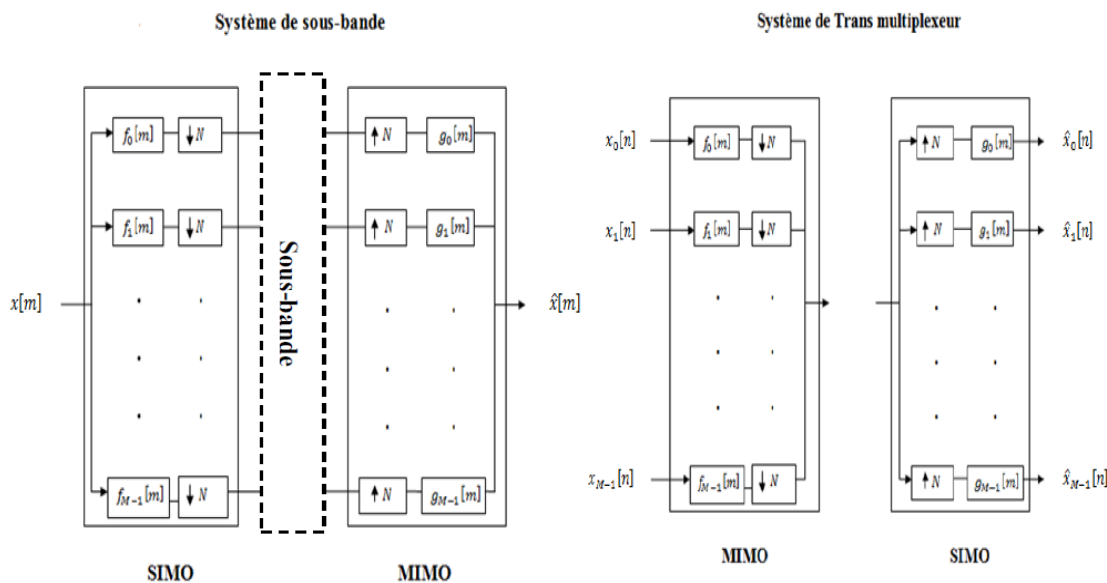


Figure 2.33: Système de sous-bande et les configurations de Trans-multiplexeur .[22]

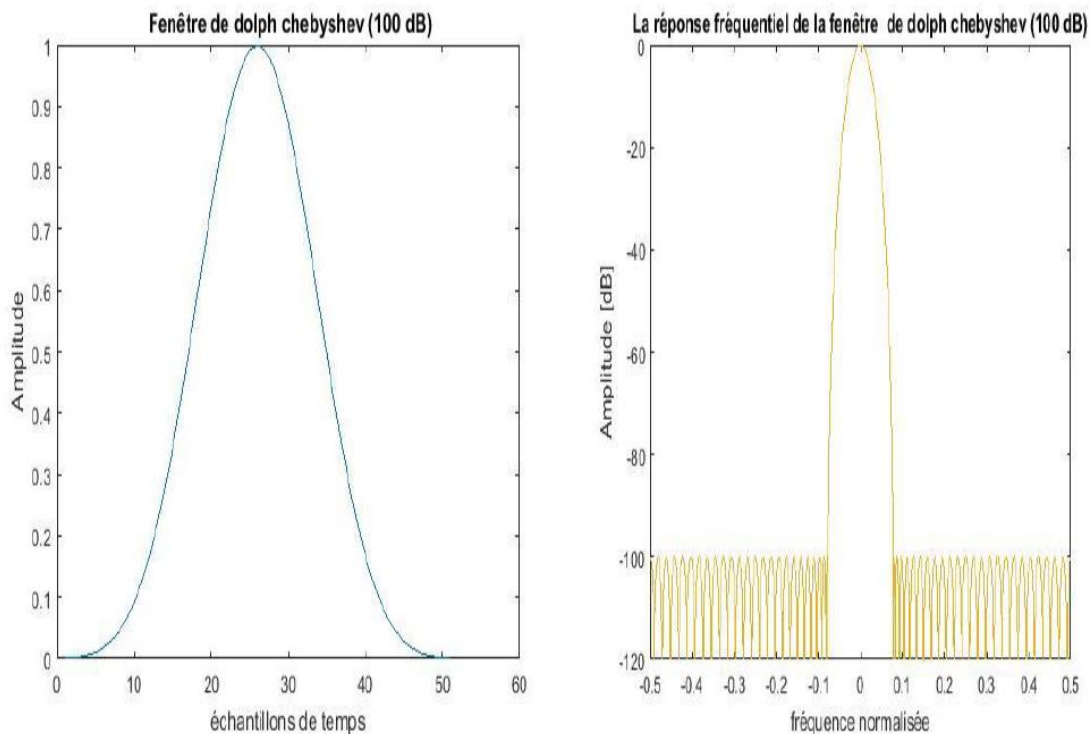
Différents filtres par sous-bande peuvent être appliqués. Cependant, dans notre étude, un filtre « Dolph-Tchebychev » à FIR (Finité Impulse Réponse) est utilisé pour le filtrage de chaque sous-bande.

### 2.6.5. Le filtre FIR Dolph-Tchebyshev :

Les filtres numériques (FIR) restreignent la réponse impulsionnelle infinie d'un filtre idéal, pour le calcul de ces filtres une séquence de poids de longueur finie est utilisée, cette tâche permet de trouver des fonctions limitées dans le temps, la transformée de Fourier qui se rapproche de la fonction est limitée en fréquence, c'est-à-dire qu'ils ont une part d'énergie minimale en dehors de la gamme de fréquences spécifiée.

Une méthode de formation des caractéristiques du filtre numérique en limitant la réponse impulsionnelle du filtre idéal à l'aide d'une fenêtre de pondération est appelée « méthode de pondération ».

Cette méthode minimise le rayonnement hors bande du signal UPMC et augmente sa résistance aux erreurs de synchronisation et aux distorsions du canal multi-trajets. En tant que filtres pour l'UPMC, on propose d'utiliser des filtres obtenus par la fenêtre de pondération « Dolph-Chebyshev » avec la fonction de poids  $L$  qui est approximativement égale à la longueur du préfixe cyclique  $L_{cp}$ . La figure (2.34) montre les caractéristiques d'un tel filtre. Les signaux provenant des sorties des filtres de sous-bande sont additionnés .[27]

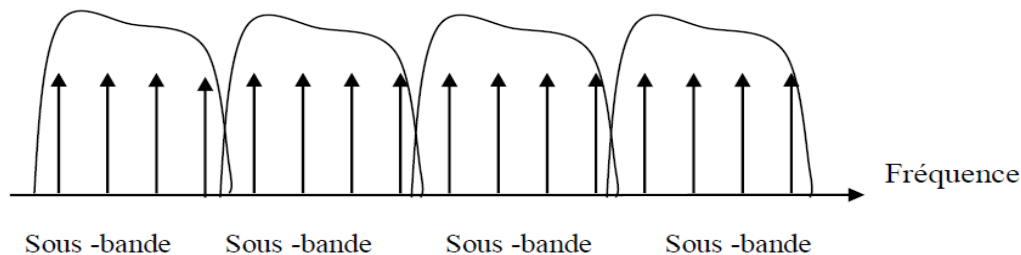


**Figure 2.34:** Les caractéristiques d'impulsion et de fréquence du filtre numérique.

La conception du filtre « Dolph-Chebyshev » indique une protection contre le décalage de synchronisation, car une énergie relativement faible. Ainsi, le choix idéal des paramètres peut contribuer à l'atténuation de l'IES.

### 2.6.6 Le principe de l'UFMC :

L'UFMC divise le bloc ( $k \in 1 \dots N$ ) de symboles QAM (Quadrature Amplitude Modulation) en  $B$  sous-blocs, chaque bloc est constitué de  $n_i$  symboles QAM, ces symboles sont regroupés en  $s_{ik}$  ( $i \in 1 \dots B$ ) et transmis à aux blocs IFFT. La gamme de fréquences est formée de  $B$  sous-bandes consécutives, et les  $N$  sous-porteuses d'informations sont transmises dans chaque sous-bande (figure 2.35).



**Figure 2.35.** Formation du signal UFMC dans le domaine fréquentiel .[27]

Les signaux de sortie des blocs IFFT sont fournis séparément aux filtres « Dolph-Tchebyshev ». Les caractéristiques fréquentielles du filtre sont décalées en fréquence en fonction des sous-porteuses d'informations de la sous-bande correspondante. Le signal émis  $x_k$  dans le domaine temporel est la somme des signaux de toutes les sous-bandes, et peut être représenté en utilisant l'expression suivante :

$$\underbrace{x_k}_{[(N+L-1) \times 1]} = \sum_{i=1}^B \underbrace{F_{i,k}}_{[(N+L-1) \times N]} \cdot \underbrace{V_{i,k}}_{[N \times n_i]} \cdot \underbrace{S_{i,k}}_{[n_i \times 1]} \quad (2.22)$$

Où

□  $F_{i,k}$  : est une matrice de Toeplitz de dimension  $((N+L-1) \times N)$  composée de la réponse impulsionnelle du filtre, effectuant la convolution linéaire entre les signaux

$X_{i,k}$  et  $F_{i,k}$

□  $V_{i,k}$  : inclut les colonnes pertinentes de la matrice de Fourier inverse en fonction de la position de la sous-bande respective, dans la gamme de fréquences globale disponible.

□  $S_{i,k}$  : est un vecteur de symboles QAM de la  $i$ ème sous-bande. Après superposition, le signal  $x_k$  est converti et traité dans le domaine radiofréquence et transmis au canal de communication, la fréquence du signal radio reçu est transmise vers le récepteur et traitée dans le domaine temporel.

Le vecteur  $y$  du signal UFMC reçu est représenté comme un produit entre le signal transmit

$x_k$  Et la matrice  $H$  caractérisant la réponse impulsionnelle du canal dans le domaine temporel, incluant le bruit additif ( $t$ ).

$$y=H.x_k+(t) \quad (2.23)$$

Ensuite, le signal UFMC est transformé en bande de base et transmis à l'unité de transformée de Fourier discrète directe (FFT) de  $2N$  points, enfin transféré vers le domaine fréquentiel. Les échantillons disparus à l'entrée du bloc FFT sont complétés par des zéros.

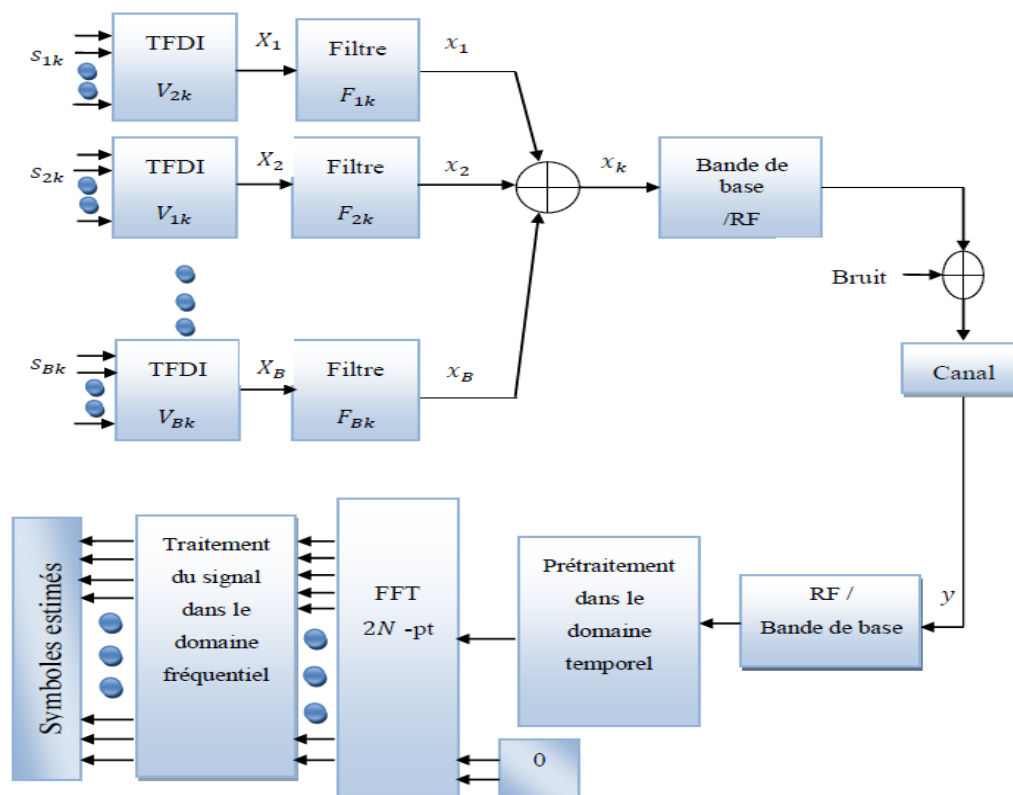


Figure 2.36: Système modèle d'UFMC .[27]

### 2.6.7. Avantages et inconvénients de la modulation UFMC :

les avantages :

- Amélioré les conditions de synchronisation
- Bonne efficacité spectrale similaire à FBMC
- Moins de frais généraux requis par rapport au FBMC.
- Bien adapté aux transmissions en rafales courtes
- Activation des modes à faible latence. [28].

**Les inconvénients :**

- Comme l'orthogonalité complexe est partiellement perdue, l'UFMC peut ne pas convenir à des débits de données très élevés.
- Avec un retard élevé, des égaliseurs multi-tap doivent être appliqués
- Une plus grande taille FFT au niveau du récepteur augmente la complexité
- Interférence due à des sous-bandes qui se chevauchent partiellement [28].
- PARP élevé.

**2.7. Caractéristiques des formes d'ondes multi-porteuses :****2.7.1. Facteur de crête (PAPR) :**

Le PAPR de tout signal est défini comme la proportion de la puissance instantanée maximale du signal et de sa puissance moyenne. [31]

Si  $[n]$  est un signal OFDM en bande de base transmis, le PAPR est défini comme suit :

$$PAP(x[n]) = \frac{\max_{0 \leq n \leq NL} [|x[n]|]^2}{E[|x[n]|]^2} \quad (2.24)$$

**2.7.2. Rayonnements hors bande (Out of Band (O.O.B)):**

Le rayonnement hors bande ou le OOB (Out Of Band) est l'un des problèmes majeurs des modulations multi-porteuses. Il représente une émission de puissance dans les fréquences hors de la bande nécessaire à la transmission à cause du processus de la modulation, donc il est nécessaire de réduire ce rayonnement pour éviter des pertes d'énergie et interférences avec d'autre bande fréquences.

Comme il est détaillé dans plusieurs documents, le rayonnement OOB (**OOBradiation**) est défini comme étant le rapport entre la quantité d'énergie qui est émise dans la plage de fréquence *OOB* et la quantité d'énergie dans la bande passante allouée *B* par :

$$\text{OOB}_{\text{radiation}} = \frac{|B|}{|\text{OOB}|} \cdot \frac{\int_{f \in \text{OOB}} \text{PSD}(f) df}{\int_{f \in B} \text{PSD}(f) df} \quad (2.25)$$

**2.7.3. Taux d'erreur binaire (BER) :**

BER (Bit Error Rate) ou TEB (Taux d'erreur binaire) est un paramètre clé qui est utilisée dans l'évaluation des systèmes qui transmettent des données numériques à partir d'un emplacement à un autre. Il est utilisé pour quantifier un canal de transport de données en comptant le taux d'erreurs dans une chaîne de données. Un taux d'erreur binaire est défini comme étant le taux auquel les erreurs se produisent dans un système de

transmission. La définition du taux d'erreur binaire peut être traduite en une formule simple :

$$BER = \frac{N_e}{N_b} = \frac{\text{Nombre d'erreurs}}{\text{Nombre total de bits envoyés}} \quad (2.26)$$

#### 2.7.4. Densité spectrale de puissance (DSP) :

On définit la **densité spectrale de puissance** (*DSP* en abrégé, *Power Spectral Density* ou *PSD* en [anglais](#)) comme étant le carré du module de la [transformée de Fourier](#), divisé par la largeur de bande spectrale, elle-même égale à l'inverse du temps d'intégration  $T$  (ou, plus rigoureusement, la limite quand  $T$  tend vers l'infini de l'espérance mathématique du carré du module de la transformée de Fourier du signal - on parle alors de densité spectrale de puissance moyenne). Ainsi, si  $x$  est un signal et  $X$  sa transformée de Fourier, la densité spectrale de puissance vaut :

$$T_x = \frac{|X|^2}{T} \quad (2.27)$$

Elle représente la répartition fréquentielle de la puissance d'un signal suivant les fréquences qui le composent (son unité est de la forme  $Ux^2/\text{Hz}$ , où  $Ux$  représente l'unité physique du signal  $x$ , soit par exemple  $V^2/\text{Hz}$ ). Elle sert à caractériser les signaux aléatoires gaussiens stationnaires et ergodiques et se révèle indispensable à la quantification des bruits électroniques.

#### 2.7.5. Rapport signal bruit (SNR):

Signal to noise ratio is a relative measure of the signal power compared to the noise power. Assuming Gaussian noise model for wireless channels and complex signals, SNR can be defined:

$$SNR = \frac{\text{Signal Power}}{\text{Noise Power}} \quad (2.28)$$

#### 2.7.6. Rapport de puissance du canal adjacent (ACPR) :

Pour quantifier l'interférence générée dans les bandes adjacentes de la bande utile, un paramètre ACPR est défini. L'ACPR est défini par l'écart en puissance entre le lobe principal (bande utile) et les lobes secondaires comme le montre la figure (2.37).

On parle d'ACPR droite et d'ACPR gauche suivant le côté de la bande adjacente prise en compte. L'ACPR est donné par la relation suivant :

$$\text{ACPR} = \frac{\int_{BU} \text{DSP}(f) df}{\int_{BA} \text{DSP}(f) df} \quad (2.29)$$

Où BU et BA représentent la bande adjacente et la bande utile, respectivement.[33]

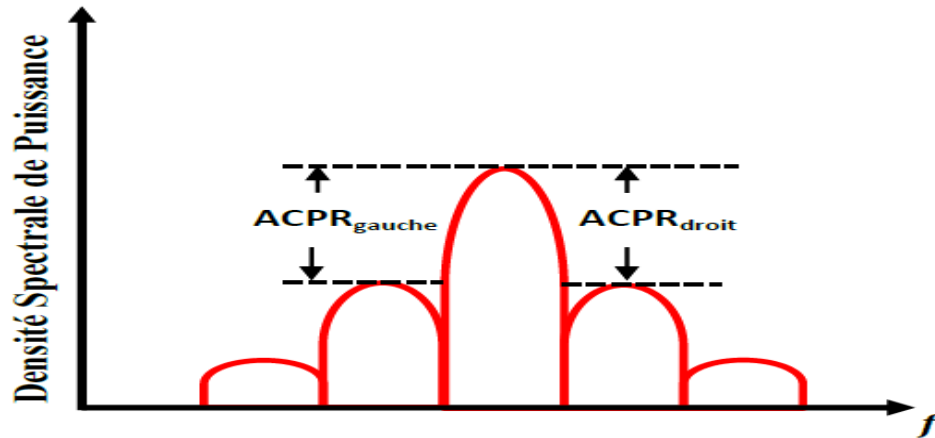


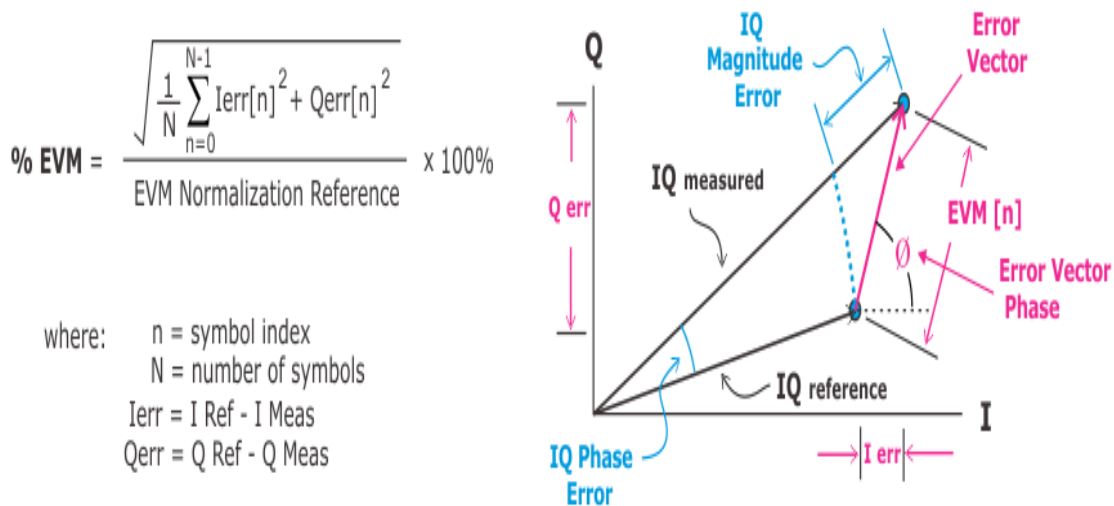
Figure 2.37 : Calcul de l'ACPR.

### 2.7.7. La magnitude du vecteur d'erreur (EVM) :

La magnitude du vecteur d'erreur ou EVM (parfois appelée erreur relative de constellation ou RCE) est une mesure utilisée pour déterminer les performances d'un émetteur ou d'un récepteur radio numérique. Le signal émis depuis un émetteur idéal ou reçu par un récepteur contiendra tous les points de la constellation précisément aux emplacements idéaux, mais divers défauts de mise en œuvre (tels que fuite de porteuse, faible taux de réjection d'image, bruit de phase, etc.). S'écarter des sites idéaux. De manière informelle, l'EVM est une mesure de la distance entre des points et des emplacements idéaux.

. En d'autres termes, c'est la différence entre les symboles reçus réels et les symboles idéaux.

$$\text{EVM (dB)} = \left( \frac{\text{EVM}(\%)}{100(\%)} \right) \quad (2.30)$$



**Figure 2.38** : Error Vecteur Magnitude (digital démodulation)

**2.7.8. Complementary Cumulative Distribution Function (CCDF) :**

Une courbe CCDF montre combien de temps le signal passe à ou au-dessus d'un niveau de puissance donné. Le niveau de puissance est exprimé en dB par rapport à la puissance moyenne. Par exemple, chacune des lignes à travers la forme d'onde représentée sur la figure A représenté un niveau de puissance spécifique au-dessus de la moyenne. Le pourcentage de temps que le signal passe au niveau ou au-dessus de chaque ligne définit la probabilité pour ce niveau de puissance particulier. Une courbe CCDF est un tracé des niveaux de puissance relatifs en fonction de la probabilité.

La fonction cumulative de répartition du PAPR connu sous le nom de CCDF (“Complementary Cumulative Destruction Function”) est approximativement.[33]

## 2.8. Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à l'étude de trois formes d'onde candidates aux réseaux radio-mobiles de 5ème génération. Dans ce contexte nous avons commencé par présenter une classification générale des formes d'onde ainsi que les définitions des caractéristiques principales de ces formes d'onde. OFDM, UFMC, et FBMC.

Des formules mathématiques ainsi que des architectures des canaux d'émetteur et de récepteur et la modulateur et démodulateur pour chaque forme d'onde sont également présentées.

Et son concept et quel est le principe et mécanisme de travail de chacun et ce qui le distingue des avantages et inconvénients de chaque forme d'onde. Et quels sont les réglages sur lesquels il est basé à partir de la densité spectrale d'énergie(DSP) et du taux d'erreur(BER) Qui se mesure en termes de rapport signal sur bruit (SNR) connu et non oublier la transmission en dehors de la bande de fréquence ou ce qu'on appelle cela O.O.B . et.... ..

Chaque forme d'onde a ses avantages et ses inconvénients, mais en fin de compte, elle reste l'un des piliers techniques de la cinquième génération, ce qui la distingue pour fournir un service élevé dans le domaine des communications, gagner du temps pour les utilisateurs de la technologie, augmenter le niveau d'application et vitesse croissante. Ce qui convient le mieux à cette génération.

Dans le prochain chapitre, nous aborderons les nouveaux plans et déploiements d'ondes et de radio 5G à travers des études dans le Nouveau Monde qui construisent tous ses plans en développement sur les communications filaires et leur relation avec les utilisations en direct du système de forme d'onde dans la cinquième génération en étudiant les préparations qui sont les dimensions de ce système.

### 3.1. Introduction :

Le réseau mobile de cinquième génération (5G) promet de créer une plate-forme et un écosystème pour fournir un accès omniprésent à un large éventail d'applications et de services. Il soutiendra à la fois l'industrie mobile et les secteurs verticaux tels que l'automobile, l'automatisation de l'industrie et la sécurité publique. Il est prévu que la 5G coexistera avec d'autres technologies d'accès radio (RAT) telles que LTE-A/Pro, NB-IoT et Wifi pendant une période de temps considérable.

Les technologies sans fil 5G devaient entrer en vigueur d'ici 2020. Mais la crise que traverse le monde depuis 2019 et maintenant en 2021 en raison du protocole sanitaire imposé par les organismes internationaux en raison de l'épidémie de COV a retardé certains plans. La vitesse de mise en œuvre a été réduite pour des raisons dues à l'effondrement économique, qui a eu des répercussions négatives sur la recherche scientifique et les industries technologiques, en particulier dans le domaine des communications et de la radio.

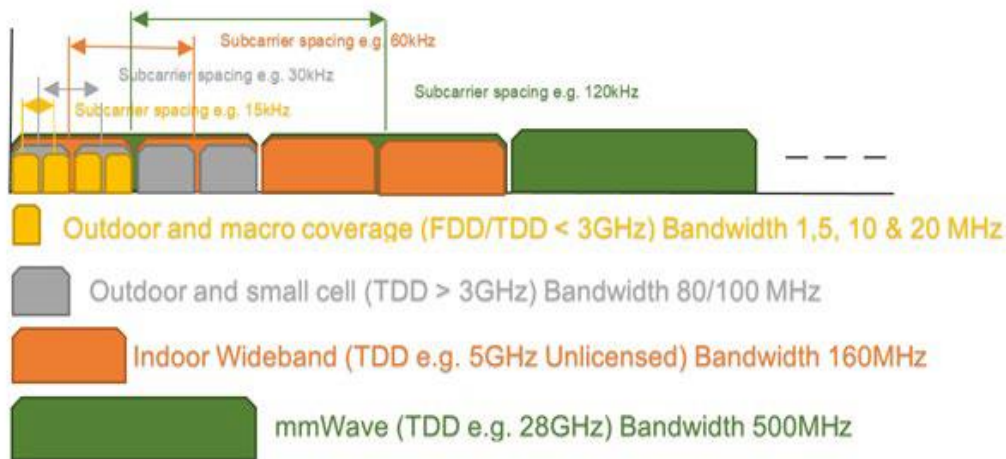
Cependant, tout cela n'a pas été empêché de pratiquer la mise en œuvre de nouvelles technologies radio (NR) dans la 5G afin de surmonter les restrictions 4G / LTE basées sur l'ofdm. FBMC utilise la technologie de filtration sur chaque sous-traduction OFDM. D'autre part, UFMC analyse la plage dédiée aux sous-pages et applique la technologie de filtrage à chaque sous-bande. Cet article décrit FBMC et UFMC pour la 5G qui exécutent différents candidats pour des prototypes.

### 3.2. Numérologie OFDM évolutive:

Comme mentionné précédemment, les bandes d'ondes milliaires qui ont des largeurs de bande de canal plus larges devraient être déployées dans la 5G NR. Afin de prendre en charge de grandes largeurs de bande dans les bandes mmWave, la numérologie évolutive ofdm est proposée pour prendre en charge des bandes passantes porteuses plus larges tout en limitant la taille de la FFT.[34]

le principe est d'introduire l'espacement évolutif des sous-porteuses OFDM et les durées de préfixe cycliques en fonction de la fréquence porteuse et de la bande passante. Plus précisément, pour simplifier la mise en œuvre de la numérologie évolutive de l'OFDM, il a été proposé d'utiliser un certain nombre de facteurs d'échelle, une valeur commune de l'espacement des sous-porteuses et une valeur commune de la durée des préfixes cycliques pour déterminer tous les espacements des sous-porteuses et les durées des préfixes cycliques pour toutes les configurations de fréquences porteuses et de largeurs de bande. Cela peut simplifier la conception des fréquences d'horloge d'échantillonnage puisque la durée du symbole OFDM est inverse de l'espacement des

sous-porteuses. En outre, pour simplifier la planification et la conception du signal de référence, il a été proposé que le nombre de symboles OFDM dans un sous-cadre soit égal pour toutes les valeurs d'espacement des sous-porteuses, ce qui signifie que l'augmentation de l'espacement des sous-porteuses raccourcit la durée de la sous-trame, comme le montre la figure (3.1).



**Figure 3.1:** OFDM numérologie

Une solution spécifique adoptée par 3GPP utilise une puissance entière de 2 comme mise à l'échelle de l'espacement des sous-porteuses à partir de 15 kHz. Cette solution peut également répondre à l'exigence d'un alignement strict des sous-trames dans un réseau LTE-TDD, car la durée des sous-trames d'une certaine fréquence porteuse et d'une certaine bande passante est divisible par des entiers divisibles par toutes les durées de sous-trame plus petites.[34]

### 3.2.1. Scalabilité de CP-OFDM pour 5G NR :

La forme d'onde CP-OFDM a quelques paramètres de conception : espacement des sous-porteuses, préfixe cyclique et nombre de sous-porteuses. Pour un système de communication, ces paramètres peuvent être optimisés en fonction d'un certain nombre de facteurs, notamment la fréquence de la porteuse, la mobilité de l'utilisateur, le bruit de phase, l'étalement du retard de canal, les exigences de qualité de service, la largeur de bande du signal et la complexité de mise en oeuvre. Pour une fréquence porteuse donnée, le bruit de phase et l'effet Doppler définissent des exigences relatives à l'espacement minimal des sous-porteuses. L'utilisation d'espacements de sous-porteuses plus petits entraîne une magnitude de vecteur d'erreurs (EVM) due au bruit de phase ou à des exigences strictes non souhaitées concernant l'oscillateur local. Des espacements de sous-

porteuse trop étroites entraînent une dégradation des performances dans des scénarios à effet Doppler élevé.

Le préfixe cyclique requis (et donc l'étalement de retard anticipé) définit une limite supérieure pour l'espacement des sous-porteuses ; la sélection de sous-porteuses plus grandes entraînerait une surcharge indésirable en CP (efficacité spectrale dégradante). La taille maximale de la FFT du modulateur OFDM (ou le nombre total de sous-porteuses) ainsi que l'espacement des sous-porteuses déterminent la largeur de bande du canal. Sur la base de ces relations, l'espacement des sous-porteuses est généralement choisi aussi petit que possible, tout en restant robuste contre le bruit de phase et l'effet Doppler et en fournissant la bande passante de canal souhaitée.

### **3. 3. Exigences des planifications et Dimensions du réseau d'accès 5G NR :**

#### **3.3.1. Modélisation de l'environnement d'exploitation en 5G NR :**

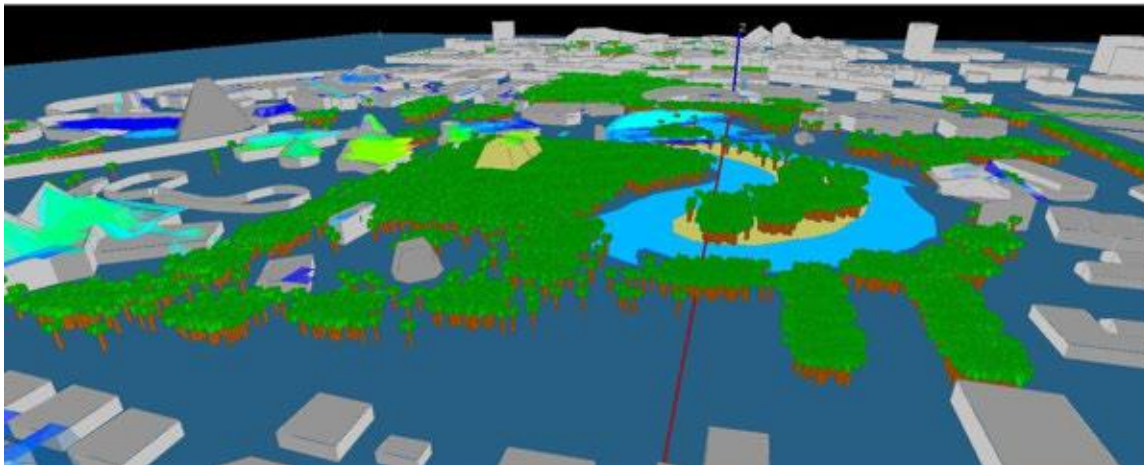
Où la 5G NR sera déployée doivent être modélisés avec précision. Ceci est principalement dû au fait que les signaux mmWave seront affectés par les petits objets tels que les arbres, la végétation, le mobilier urbain, les véhicules et la foule. De plus, la 5G NR sera plus intégrée à leurs environnements d'exploitation, par exemple, de petites cellules seront montées sous les toits et sur le mobilier urbain, les antennes seront intégrées aux structures des bâtiments et les nœuds IoT seront intégrés dans les murs, les routes, etc.

La modélisation précise des environnements d'exploitation 5G NR comprend : SIG avec des données vectorielles 3D haute résolution pour l'extérieur urbain ; Structure de bâtiment 3D et matériau électromagnétique (EM) propriété pour l'intérieur ; et l'intégration transparente des sig extérieurs et des modèles de bâtiments 3D intérieurs.

##### **3.3.1.1. Système d'information géographique (SIG) :**

Les SIG sont largement utilisés pour les outils de planification des réseaux radio extérieurs depuis les années 1990. Les SIG fournissent plusieurs couches d'informations pour la planification des réseaux radio, y compris des données de terrain, d'encombrement et vectorielles (par exemple, pour les bâtiments). La résolution des SIG requise est passée de 20m à 5m for2G à la planification du réseau radio 4G.[34]

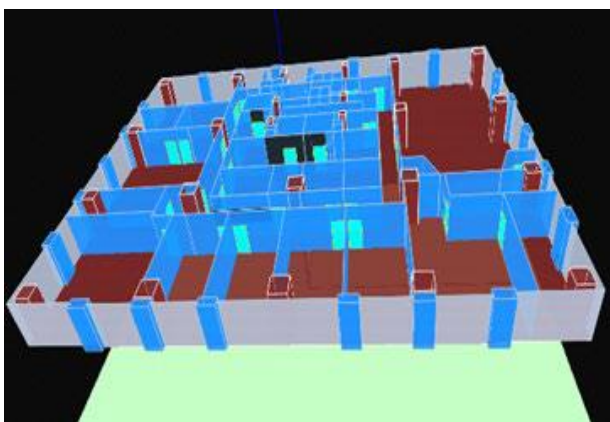
Pour la planification du réseau 5G NR, pour révéler des objets tels que des arbres, des végétations, du mobilier urbain (par exemple, des lampadaires), des bâtiments, des données vectorielles 3D d'une résolution de 1 m ou plus (p. ex., 0,10 m ou 0,40 m) sont nécessaires pour la planification 5G NR. Ceci est illustré à la figure (3.2) :



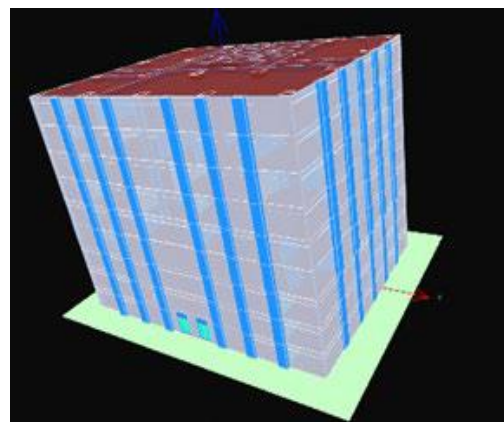
**Figure 3-2 :** SIG extérieur avec végétation (Capture d'écran de Ranplan Professional)  
[34]

### 3.3.1.2. Modèles de bâtiments 3D :

À ce jour, plus de 80% du trafic mobile a lieu à l'intérieur. La croissance exponentielle prévue du trafic mobile de 1000 fois au cours de la prochaine décennie n'est pas uniforme dans toutes les zones géographiques et se déroule principalement dans des points chauds qui se trouvent généralement dans les environnements bâtis (BE) tels que les quartiers d'affaires centraux (CBD), les stations, les aéroports, les centres commerciaux, etc. [34]



**a)** Modèles de bâtiments 3D (un étage) créés automatiquement dans Ranplan Professional en chargeant le fichier CAO.



**b)** Modèles de bâtiments 3D (bâtiment entier) créés

**Figure 3.2:** Modèle de construction de modèles 3D. [34]

Dans les réseaux mobiles 2G/3G/4G, la majeure partie du trafic mobile intérieur est desservie par des macrocellules extérieures. Cependant, cela deviendra impossible à l'ère de la 5G, car la 5G utilisera des fréquences plus élevées, qui ne sont pas

Bon à pénétrer dans les bâtiments. On estime que plus de 80 % de la circulation intérieure (c.-à-d. environ les 2/3 de la circulation totale) sera desservie par des réseaux mobiles installés dans les bâtiments. Afin de déployer de petites cellules de manière rentable, DAS à l'intérieur, des modèles de construction 3D précis sont nécessaires. Les modèles de bâtiments 3D modéliseront : 1) les structures de bâtiment avec des éléments de murs, de portes, de fenêtres, de colonnes, comme le montre la figure (3.2); et 2) des modèles de bâtiments 3D entiers dans la figure (3.2).

Au fur et à mesure que les propriétés EM du matériau de construction changent au fil des fréquences, elles doivent être mesurées dans toute la gamme de fréquences dans laquelle la 5G NR fonctionnera. La mesure des propriétés EM des matériaux de construction aux bandes mmWave est particulièrement difficile en raison de l'effet de réflexion diffuse, car la rugosité de la surface du matériau est comparable à la longueur d'onde porteuse. Les propriétés EM des matériaux de construction doivent être stockées dans une base de données, comme le montre la figure (3.3).

The screenshot shows the 'Material DB Management' application window. On the left is a tree view of material categories: Concrete (Heavy, Light, Medium), Glass, Metal, Plaster, Plastic, Stone, and Wood. The main area displays a table of frequency bands (Band-43 to Band-51) with columns for Name, Direction, Min, Max, Units, and Properties. Below this is a 'Property' table for the selected Band-51, showing values for Frequency, Transmission, Reflection, and Diffraction.

Name	Direction	Min	Max	Units	Properties
Band-43	Both	25000	30000	MHz	(4 Properties)
Band-44	Both	30000	35000	MHz	(4 Properties)
Band-45	Both	35000	40000	MHz	(4 Properties)
Band-46	Both	40000	45000	MHz	(4 Properties)
Band-47	Both	45000	50000	MHz	(4 Properties)
Band-48	Both	50000	55000	MHz	(4 Properties)
Band-49	Both	55000	60000	MHz	(4 Properties)
Band-50	Both	60000	65000	MHz	(4 Properties)
Band-51	Both	65000	70000	MHz	(4 Properties)

Category	Name	Value	Unit	Mode
Calculate	Frequency	67500	MHz	ReadWrite
Calculate	Transmission	462.6	dB	ReadWrite
Calculate	Reflection	6.00	dB	ReadWrite
Calculate	Diffraction	44	dB	ReadWrite

**Figure 3.3:** Base de données de matériaux dans Ranplan Professional couvrant toutes les bandes de fréquences 5G. [34]

### 3.3.1.3. Intégration des SIG extérieurs et des modèles de bâtiments 3D intérieurs :

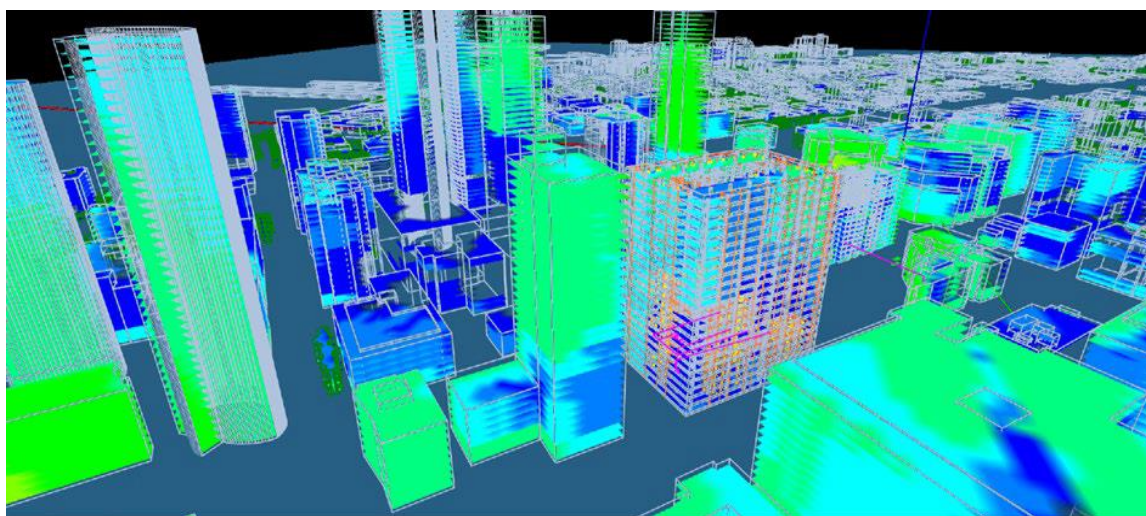
À mesure que les réseaux intérieurs augmentent, les interactions entre l'intérieur et l'extérieur deviennent importantes. Afin d'assurer un service continu et de minimiser les interférences entre les réseaux intérieurs et extérieurs, les réseaux intérieurs et extérieurs doivent être planifiés/optimisés en coordination. Le modèle d'intégration est illustré à la figure (3.4).

Pour planifier l'intérieur et l'extérieur de manière cohérente et efficace, les outils de planification du réseau radio doivent intégrer à la fois les modèles extérieurs et intérieurs.

Tout d'abord, les ingénieurs RF doivent modéliser de manière transparente les environnements extérieurs et intérieurs. Cela signifie que l'outil de planification RF doit être en mesure d'entrer des SIG extérieurs pour l'extérieur. L'outil de planification RF doit également modéliser les bâtiments qui ont besoin de réseaux sans fil intérieurs dédiés.

Deuxièmement, l'outil doit également charger des configurations de réseau extérieur et intérieur. Cela signifie que votre outil doit être en mesure de mettre les réseaux extérieurs sur le SIG et les réseaux intérieurs sur les structures de bâtiment. Notre outil prend en charge les deux.

Troisièmement, l'outil doit pouvoir charger les deux réseaux rapidement. La compatibilité avec le format des opérateurs et le format principal de l'outil de planification RF extérieur est également importante.[35]



**Figure 3.4:** Intégration transparente du sig et du modèle de bâtiment 3D avec le signal radio extérieur et intérieur dans Ranplan Professional .[35]

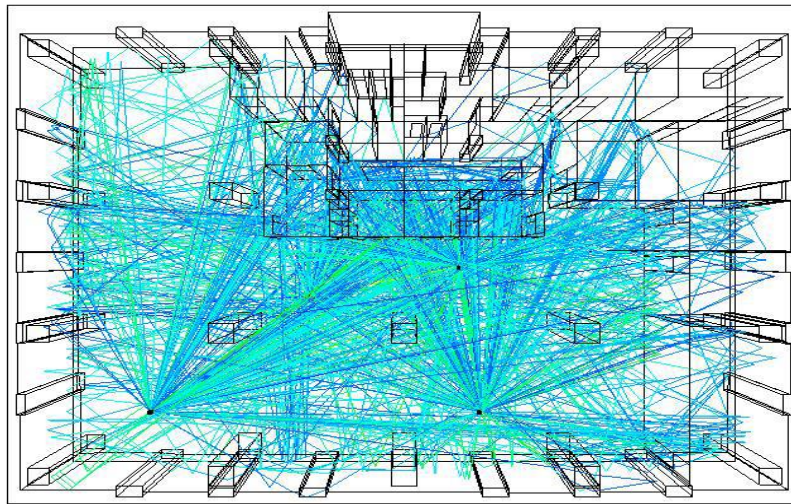
### 3.3.2. Modélisation de la propagation radio :

La couverture et la capacité sont deux exigences fondamentales pour un réseau de caves. En particulier, la couverture est l'exigence minimale pour un réseau cellulaire. Le modèle de propagation radio est essentiel pour la planification de la couverture des réseaux cellulaires.

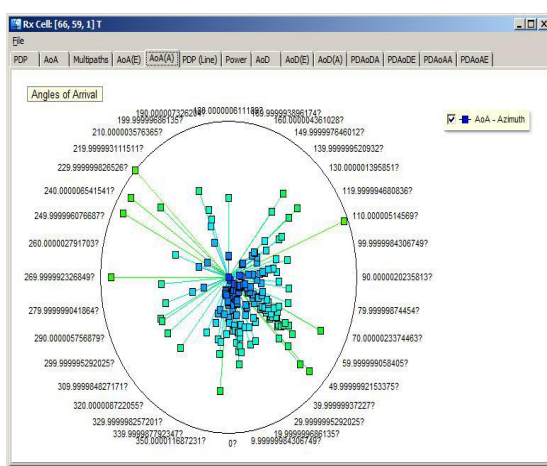
Le modèle Hata et sa version étendue COST231-Hata, qui sont tous deux une sorte de modèle empirique, sont largement utilisés dans la planification des macrocellules extérieures 2G /3G / 4G dans les environnements urbains. L'avantage d'un modèle empirique est sa vitesse rapide ; cependant, il est spécifique au site et n'est pas précis. À mesure que la capacité est devenue de plus en plus importante au cours de la dernière décennie, des modèles de propagation radio déterministes plus précis basés sur le lancer/traçage de rayons sont devenus de plus en plus largement utilisés.

Même si les modèles de propagation radio déterministe basés sur les rayons sont plus précis que les modèles empiriques, ils prennent beaucoup plus de temps. Afin de réduire le temps, la plupart des modèles commerciaux de lancer de rayons simplifient le calcul par le nombre de rayons considérés, par exemple, en ne considérant que le chemin dominant. Cependant, ce type de modèle ne fournit pas suffisamment d'informations pour évaluer les performances MIMO massives.[35]

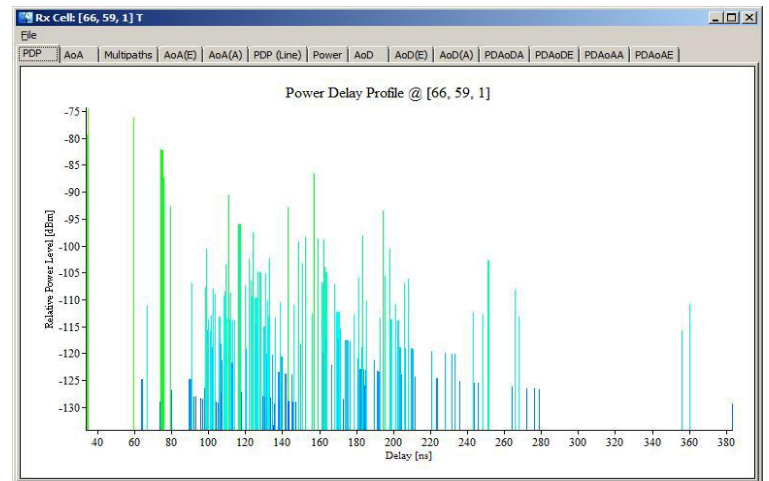
Pour la 5G NR, de véritables informations à chemins multiples (par exemple, AoA, AoD, EoA, EoD, retard et informations de phase) sont nécessaires pour générer une matrice de canal MIMO, ce qui est essentiel pour évaluer les performances de MIMO massif. Sur la base de la matrice de canaux et des algorithmes de pré codage (par exemple, des algorithmes standard tels que ZF, MRT et MMSE ou des algorithmes spécifiques au fournisseur), les performances massives de MIMO peuvent être évaluées; par conséquent, un véritable modèle de propagation radio de traçage/lancement de rayons à trajets multiples 3D est nécessaire pour le MIMO massif 5G NR. Voir la **figure 3-5**.



a) Véritable lancement de rayons 3D à chemins multiples



b) Angles d'arrivée



c) Profil de retard de puissance

**Figure 3.5 :** vrai modèle de propagation radio de lancer/suivi de rayons à chemins multiples 3D. [35]

### 3.3.3. Modélisation du système 5G NR(Dimensionnement) :

Afin de planifier un réseau 5G NR, les numéologies 5G NR doivent d'abord être modélisées dans l'outil de planification. Dans le tableau 3-1, nous résumons ces numéologies 5G NR :

**Tableau 3.1. Numéologies 5G NR**

OFDM Parameters	Configuration					
Espacement des sous-porteuses (kHz)	15	30	60	120	240	480
Durée du symbole (us)	66.7	33.3	16.6	8.33	4.17	2.08
CP nominal (us)	4.7	2.41	1.205	0.6	0.3	0.15
Nominal max BW (MHz)	49.5	99	198	396	397.4	397.4
FFT max. size	4096	4096	4096	4096	2048	1024
Intervalle de planification minimal (ms)	1	0.5	0.25	0.125	0.0625	0.0312

Deuxièmement, les structures de cadre correspondantes doivent également être modélisées. Par exemple, pour l'espacement de sous-porteuse 120kHz, 8 emplacements/sous-trame (1 ms), 80 emplacements/trame (10 ms), 14 symboles/emplacement OFDM. Ceci est illustré à la figure (3.6).[34]



Figure 3.6: Numéologies 5G

Troisièmement, les nouveaux schémas de modulation tels que 256QAM doivent être modélisés. Dans le tableau 3.2, nous résumons tous les schémas de modulation pris en charge dans la 5G NR.

Tableau 3.2: Schémas de modulation 5G NR

Modulation Scheme	UL/DL
QPSK	UL/DL
16QAM	UL/DL
64QAM	UL/DL
256QAM	UL/DL

Quatrièmement, le contrôle 5G NR et les canaux de données tels que PDSCH, PDCCH et PUSCH doivent être modélisés. Le tableau 3.3 présente des détails.[34]

**Tableau 3.3:** Canal de liaison montante et de liaison descendante

	PDSCH	PDCCH	PUSCH
Objectif	Dépendant de la numéologie	Transmettre le contrôle DL	Transmettre le contrôle et les données UL
Forme d'onde	CP-OFDM	CP-OFDM	CP-OFDM and DFT-s-OFDM
Bande passante	Dépendant de la numéologie	Flexible, dépendant de la numéologie	Dépendant de la numéologie
Signaux de référence	Spécifique à l'UE	Spécifique à l'UE	Spécifique à l'UE
Compensation du bruit de phase	Oui	Non	Oui
Modulation	Jusqu'à 256QAM	QPSK	Jusqu'à 256QAM
Schéma de codage	LDPC	Polaire	LDPC

### 3.4. Conclusion :

Plusieurs options présentées pour les formes d'onde dans le 3GPP étaient nécessaires pour définir des objectifs de performance afin d'évaluer et de comparer chacune d'entre elles. Les principales propositions étaient compatibles avec plusieurs technologies de base, dont la technologie MIMO, l'efficacité spectrale, le facteur de crête (PAPR).

Dans ce chapitre, nous avons discuté des dimensions sur lesquelles le système de planification du réseau 5G NR est basé, les paramètres 5G NR doivent d'abord être modélisés dans l'outil de planification, ce nouveau système 5G NR est basé sur le filtre et les paramètres OFDM Configurations. Ces paramètres sont ce qui dessine les tailles et les dimensions du système, et à travers eux, nous obtenons des résultats qui montrent les avantages et les inconvénients de ces filtres, et l'étendue de la disparité dans les lacunes qui pèsent sur la nouvelle génération qui cherche à y remédier. mentionnera le plus important de ces paramètres: nombre sous porteuse et espace des sous porteuses et cp-nominal et l'intervalle de planification minimale; et configurer ces paramètres. Les structures de cadre correspondantes doivent également être modélisées les nouveaux schémas de modulation tels que 256QAM doivent être modélisés le contrôle 5G NR et les canaux de données tels que PDSCH, PDCCH et PUSCH doivent être modélisés .doivent être modélisés en termes de valeurs <wave forme et Bandwith ,modulation> .

Dans le chapitre suivant, nous simulerons la forme d'onde OFDM utilisée pour générer le cinquième NR selon les paramètres précédents et la comparerons avec les formes d'onde UFMC .FBMC. Selon les mêmes paramètres et nous comparons ces formes d'onde. Nous concluons le meilleur et le plus approprié, et quels sont les critères qui déterminent le meilleur pour ce système .

#### 4.1. Introduction :

En route vers la 5G, la communauté des communications mobiles a été témoin de nombreuses propositions de formes d'onde pour NR. La plupart des propositions, en tant que formes d'onde à porteuses multiples, sont soit des variantes de OFDM (exemple : UFMC), ou de super un cas particulier d'une forme d'onde plus complexe (par exemple : FBMC). La tendance a été de modifier OFDM de toutes les manières possibles en filtrage par sous-porteuse ou mise en forme d'impulsions, filtrage de groupes de sous-porteuses, permettant à des symboles successifs de se chevaucher dans le temps, suppression du préfixe cyclique, remplacement du préfixe cyclique par zéros ou par une autre séquence. Diverses formes d'onde sont devenues de puissants prétendants à la 5G ; de nombreuses publications de recherche ont montré que CP-OFDM était dépassé. À un moment donné, on a eu le sentiment que chaque forme d'onde à porteuses multiples ferait partie de la 5G, à l'exception de CP-OFDM. On a réalisé que CP-OFDM était en fait le candidat le plus approprié pour NR.

Le CP-OFDM se classe au premier rang des indicateurs de performance les plus importants : compatibilité avec les technologies multi-antennes, efficacité spectrale élevée et complexité de mise en oeuvre réduite. De plus, CP-OFDM est bien localisé dans le domaine temporel, ce qui est important pour les applications critiques en latence et les déploiements TDD.

Le multiplexage par répartition en fréquence orthogonale (OFDM) a attiré beaucoup d'attention de la communauté des communications sans fil modernes, en raison de ses nombreuses caractéristiques souhaitables pour la transmission de données à grande vitesse. Dans OFDM, un signal à large bande est décomposé en plusieurs sous-porteuses à bande étroite et mis en oeuvre efficacement en utilisant l'algorithme IFFT. Les avantages OFDM comprennent : une interférence inter symbole plus faible, une utilisation efficace de la fréquence/du spectre grâce à l'utilisation de différentes modulations/codages sur les sous-porteuses et des capacités supérieures de suppression des interférences à bande étroite. Cependant, nous devons tenir compte des limitations matérielles pratiques des dispositifs RF et à signaux mixtes à faible coût lors de la conception de systèmes OFDM pour la transmission de données sans fil à large bande. L'un d'eux est la linéarité et la plage dynamique de l'amplificateur haute puissance (HPA), car les signaux OFDM ont des rapports de puissance crête sur moyenne (PAPR) plus élevés que les autres modulations hautes performances, et donc une attention particulière est requise. L'une des approches les plus prometteuses pour atténuer le problème de PAPR consiste à utiliser une prédistorsion appliquée au signal OFDM avant son entrée dans HPA. Son but est de compenser la non-linéarité du HPA et d'améliorer les performances du système. De nombreux chercheurs ont étudié les schémas de prédistorsion OFDM [2–5]. Cependant, toutes ces techniques sont basées sur une forme d'approximation générale pour le système non linéaire, plutôt que d'exploiter des formes

spécifiques glanées à partir de considérations relatives aux dispositifs physiques. Pour cette raison, nous avons proposé une prédistorsion fermée représentée par quelques paramètres.in MATLAB.

MATLAB, Matrix Laboratoire est un langage technique d'informatique. Il peut être utilisé pour le développement de l'algorithme, l'analyse des données, la visualisation et le calcul numérique. Il est un outil pour la manipulation du calcul mathématique. Un système interactif, son avantage réside dans le fait que cela vous permet de tracer et donc de visualiser les données de plusieurs façons. Travailler avec l'algèbre matricielle, polynômes et des fonctions d'intégration est très facile avec MATLAB. C'est un logiciel de calcul de programmation qui facilite la résolution des problèmes et améliorer le processus d'apprentissage. La résolution des problèmes numériques complexes sont résolus facilement et en une fraction du temps nécessaire avec un langage de programmation tel que Fortran ou ce qui rend donc souhaitable. MATLAB est discret dans la nature, et donc toutes les entrées et sorties de codes MATLAB sont discrets [32].

Nous allons simuler le système de transmission en utilisant OFDM-Hpa, cp-OFDM, UFMC et FBMC dans le programme Matlab afin d'analyser les résultats (courbes sur les figures et enfin la comparaison générale entre ces formes d'onde).

#### 4.2. Performances de l'OFDM :

Dans une FO de type CP-OFDM classique, les porteuses sont modulées à une fréquence  $k / N$ , à l'aide de formes rectangulaires dans le domaine temporel. Le processus de mappage / dé mappage peut être effectué avec une FFT inverse (IFFT) et permet ainsi une architecture peu complexe (voir Figure 4.1).

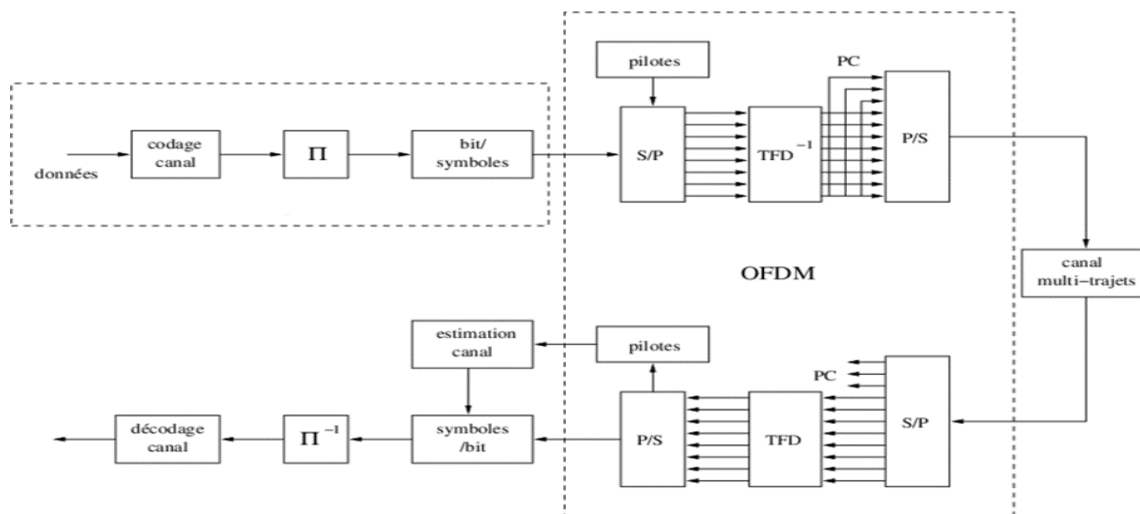


Figure 4.01 : Schéma fonctionnel de l'émetteur-récepteur OFDM.

#### 4.2.1. Paramètres de simulation :

En se basant sur le schéma fonctionnel de la figure (4.01), les paramètres implémentés pour la simulation de OFDM with HPA et la CP-OFDM sont décrits sur les tableaux (3.1) et (3.2) et (3.3) : **Expliqué dans le troisième chapitre :**

#### 4.2.2. Résultats des simulations :

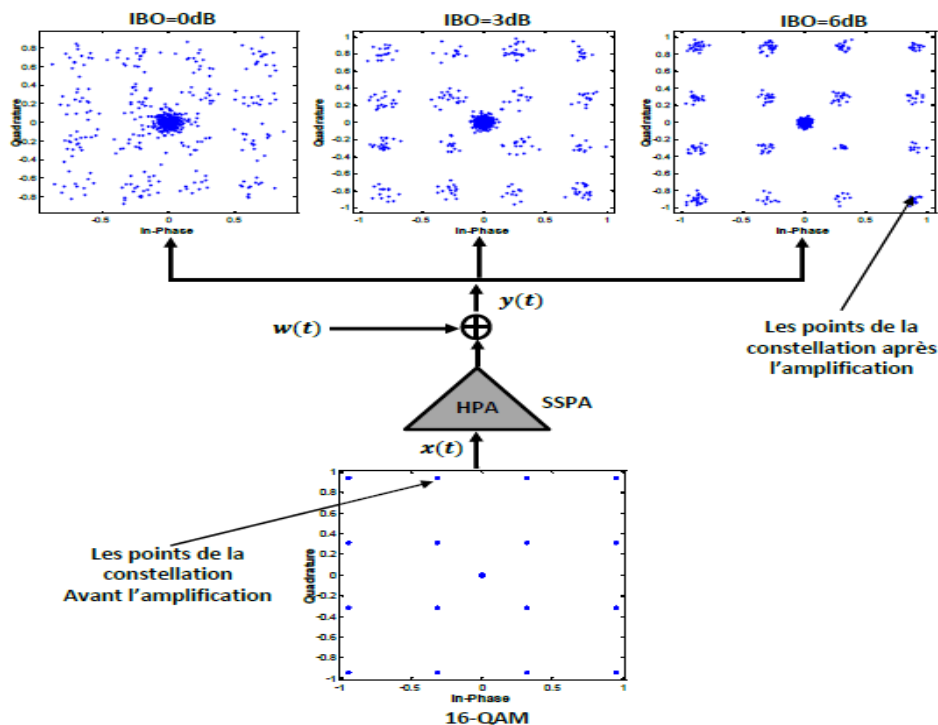
##### 4.2.2.1. Amplificateur de puissance dans les systèmes de communication :

Pour une utilisation efficace du spectre disponible, les systèmes de transmission numériques actuels utilisent des modulations multi-porteuses avec un grand nombre d'états de phase et d'amplitudes. Cependant, ces modulations sont très sensibles aux distorsions, bien entendu, aux distorsions non linéaires provenant des amplificateurs de la chaîne de transmission

##### **Définition :**

Pour assurer un routage correct des informations, les émetteurs ont besoin d'amplificateurs de puissance qui fournissent une certaine puissance aux signaux radiofréquences afin d'éviter leur dégradation grave lors de leur propagation en espace libre. L'amplificateur de puissance puise ensuite l'énergie nécessaire au signal dans une source d'alimentation en courant continu. En général, il existe deux catégories d'amplificateurs de puissance utilisés dans les systèmes de communication

L'amplificateur a une incidence directe sur la constellation ce qui se traduit par une déformation de celle-ci entraînant de ce fait des erreurs sur les bits transmis (voir la figure 4.2). Pour illustrer ce phénomène, nous considérons un schéma simplifié constitué d'un signal d'entrée (issu d'une modulation 16-QAM) et d'un amplificateur de puissance de type SSPA (donné par le modèle de Rapp). Un bruit blanc gaussien est ajouté à la sortie de l'amplificateur.



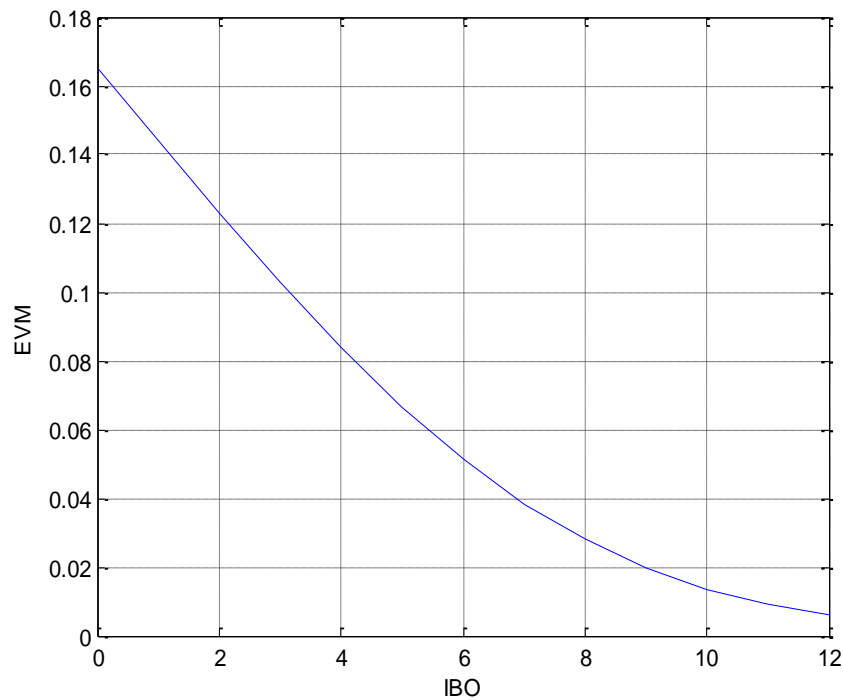
**Figure 4.2** : l'amplificateur de puissance sur les points de la constellation.[33]

La non-linéarité de l'amplificateur de puissance ne poserait pas de problème si les signaux d'entrée étaient à enveloppe constante et à faible dynamique (à faible PAPR). C'est le cas par exemple dans des signaux GSM. Les futurs systèmes (4G ou 5G) de communication devront faire face au problème existant de la non-linéarité de l'amplificateur de puissance mais avec une difficulté supplémentaire, du fait de la nature spécifique des signaux (signaux multistandards donc très large et à très grande dynamique, c'est-à-dire à fort PAPR). Nous présentons dans ce qui suit, les distorsions engendrées par la non-linéarité de l'amplificateur de puissance et les conséquences sur la qualité de la transmission.

#### 4.2.2.2. La magnitude du vecteur d'erreur EVM :

EVM peut être utilisé pour décrire la taille du bruit introduit. Lorsque le signal de sortie est complètement non déformé, Dans la figure suivante, nous montrons la relation courbe EVM avec Taux de coupure pour Ofdm EVM peut être utilisé pour décrire la taille du bruit introduit. Lorsque le signal de sortie est complètement non déformé, Dans la figure suivante, nous montrons la relation courbe EVM avec Taux de coupure pour Ofdm

Le signal  $x(t)$  à l'entrée de l'amplificateur de puissance est un signal monostandard de type WLAN (signal OFDM de sous-porteuses, de modulation 16-QAM). L'EVM calculé à partir des signaux et est donné par la (figure 4.3).



**Figure 4.3.**EVM vs IBo

Cela peut être vu parce que le signal EVM diminue davantage. Lorsque les valeurs IBO étaient (2, 6 et 10). Le signal EVM est de 12,4%, 5,2% et 1,4%), respectivement.

Donc déduire Elle montre que l'EVM décroît quand le recul d'entrée augmente, c'est-à-dire que, quand l'amplification se fait de plus en plus dans la zone linéaire. Elle montre aussi que l'EVM diminue avec le rapport signal à bruit (SNR). En effet, un IBO faible engendre des distorsions importantes dans le signal amplifié ; de la même manière, un SNR faible, signifie un niveau de bruit assez important dans la bande qui va Perturber de façon significative le signal émis.

**Tableau (4.1) :** l'ACPR selon les valeurs d'IBO.

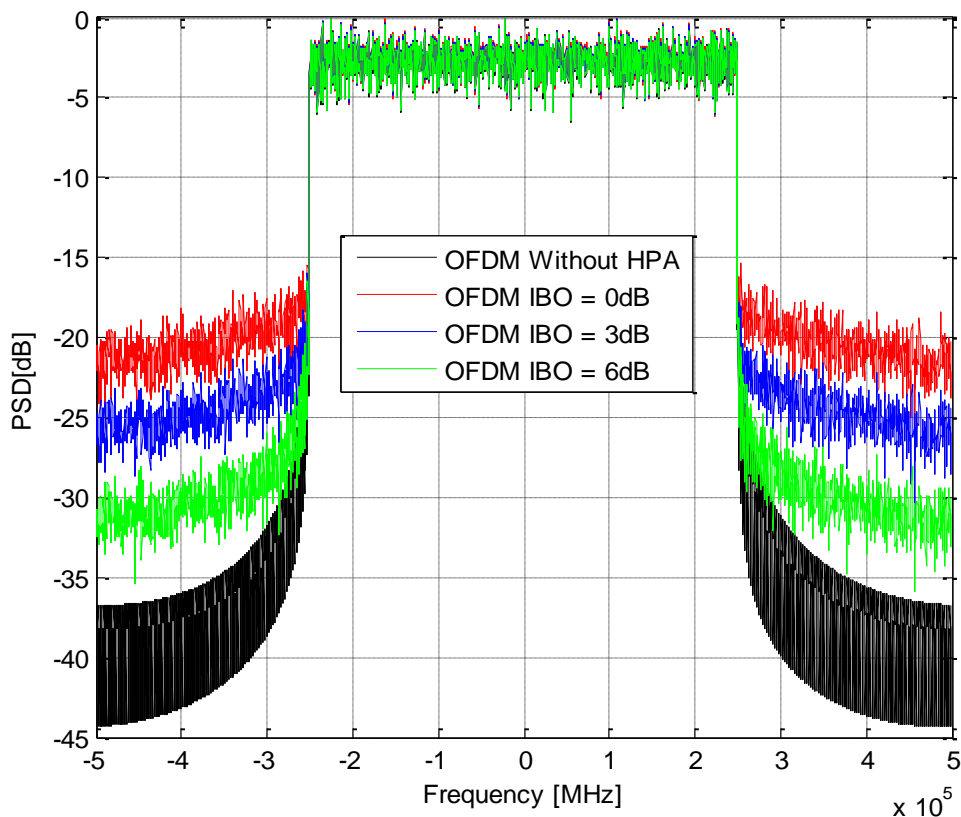
<i>IBO (dB)</i>	<i>0</i>	<i>3</i>	<i>6</i>	<i>12</i>	<i>15</i>
<i>ACPR (dB)</i>	<i>-34,1210</i>	<i>-34,0124</i>	<i>-33,8102</i>	<i>-33,4342</i>	<i>-33,2178</i>

### 4.2.2.3. Effet sur le spectre :

L'influence de la caractéristique non-linéaire de l'amplificateur sur les signaux amplifiés s'exprime aussi par des remontées spectrales. Cela se traduit par des interférences avec d'autres signaux émis dans des canaux voisins. Le facteur de mérite qui permet de mesurer les interférences avec les canaux adjacents est l'ACPR.

Le Tableau 4.1 montre les mesures de l'ACPR selon les valeurs d'IBO, où  $BU=BA=5MHz$ , il sera question de montrer l'influence d'une amplification non-linéaire sur le spectre des signaux à fortes dynamiques (PAPR élevé).

La figure 4.4 suivante montre la densité spectrale de puissance lors de la transmission de données à l'aide de OFDM-HPA et OFDM IBO



**Figure 4.4 :** Effet de l'amplificateur de puissance sur le spectre pour différentes valeurs du IBO.

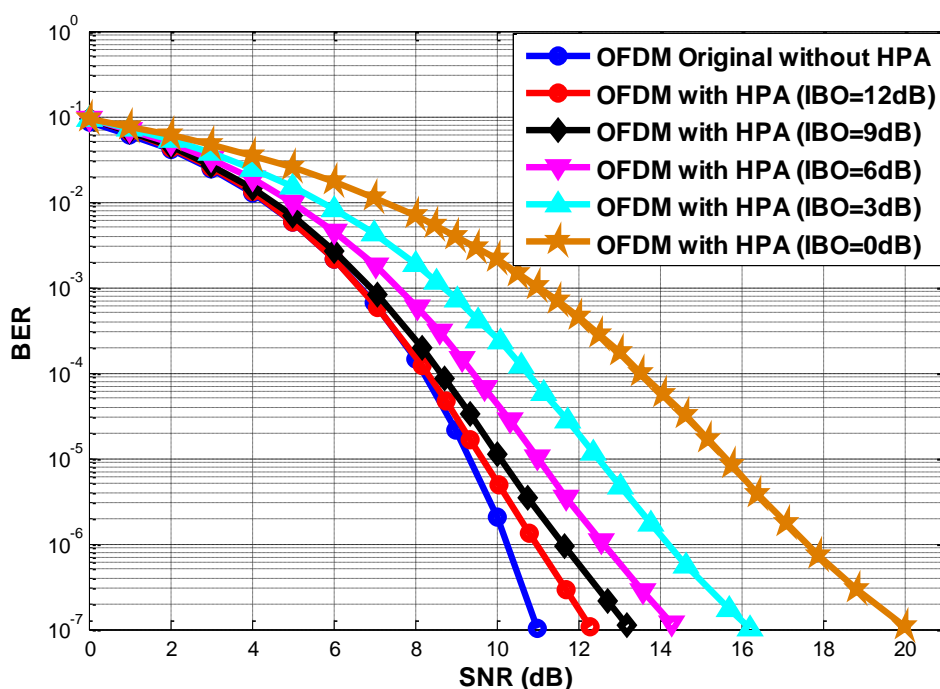
Le phénomène de remontée spectrale est montré par la figure 4.4. Elle montre que la remontée spectrale (les interférences avec les canaux adjacents) augmente quand le recul diminue. En effet, des valeurs faibles de l'IBO signifient que l'amplificateur de puissance fonctionne en limite de sa zone de saturation. C'est dans cette zone que les signaux subissent le plus de distorsions ce qui explique la remontée spectrale de plus en plus importante lorsque l'IBO devient de plus en plus faible .

#### 4.2.2.4. Effet sur le taux d'erreur binaire :

##### a).OFDM with HPA:

On a vu qu'une amplification non-linéaire des signaux a une incidence directe sur la constellation qui se traduit par un EVM qui augmente avec la perte de linéarité (quand on s'approche de la zone de saturation). Ceci a inévitablement une répercussion sur le BER.

Dans cette section nous présentons l'étude de l'évolution du taux d'erreur binaire (BER) en fonction du rapport signal sur bruit (SNR) pour différents schémas de **ofdm with HPA**



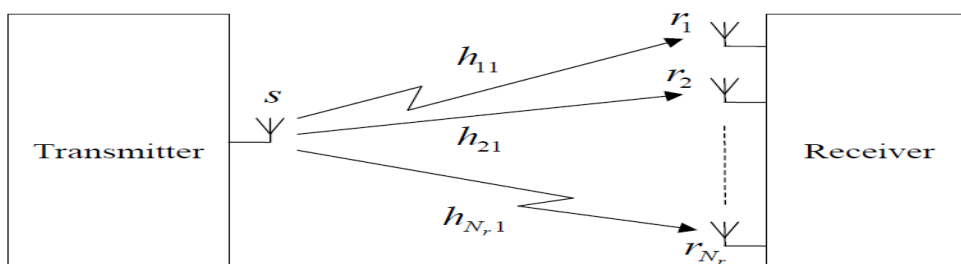
**Figure 4.5 :** Effet de l'amplificateur de puissance sur le BER pour différentes valeurs du IBO.

La figure (4.5) donne les performances du BER en fonction du SNR pour différentes valeurs de recul d'entrée (IBO). Le système de transmission simulé est de type OFDM comportant 64 sous porteuses de modulation 16-QAM. Le canal de transmission est un canal Gaussien comme montré par la figure 4.2. Nous pouvons effectivement observer une dégradation des performances du BER pour de faibles valeurs de l'IBO. Cependant lorsque l'IBO devient important, le BER tend à se fondre dans la courbe OFDM sans HPA. C'est la preuve qu'il y a moins de perturbations liées aux non-linéarités de l'amplificateur lorsque le signal est amplifié dans la zone linéaire et lorsque le signal est amplifié de plus en plus dans la zone de saturation, il subit de plus en plus de distorsions.

**B). Cp-OFDM :**

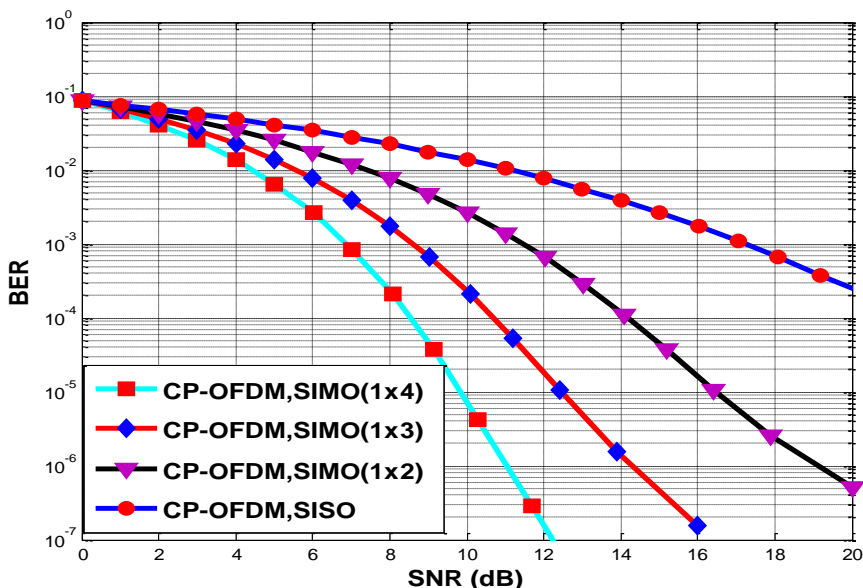
Le but de cette section est de présenter l'utilité d'avoir plusieurs antennes à l'émetteur et/ou côté récepteur. Ce concept, appelé Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) permet d'augmenter le débit du système et/ou d'exploiter la diversité spatiale conduisant le système à être plus robuste. Le cas particulier où  $N_t = N_r = 1$  est appelé un Canal à entrée unique et sortie unique (SISO). Un deuxième cas particulier est celui dans lequel  $N_t = 1$  et  $N_r = 2$ . Le système résultant est appelé un système à entrée unique et sorties multiples (SIMO) system :

Supposons que nous ayons du côté récepteur  $N_r$  antennes et une seule antenne d'émission. Ce format de communication est souvent décrit comme SIMO La figure 4.6 en donne la représentation.



**Figure 4.6 :** Modèle de représentation SIMO.

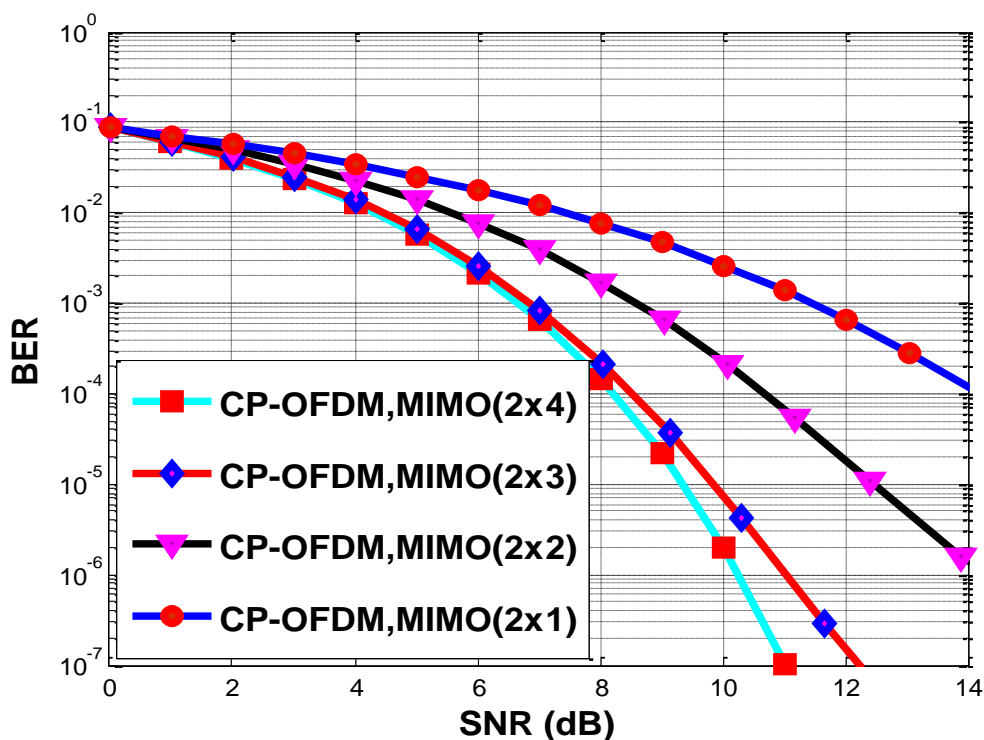
Dans la Figure (4.7), nous traçons le Bit Error Rate (BER) en fonction du SNRt pour différents Configurations cp-OFDM, SIMO et SISO :



**Figure4.7 :** Performances du BER en fonction du SNR pour le modèle cp-ofdm SIMO [(1x4) (1x3) (1x2) ; cp-OFDM SISO].

Les symboles sont modulés QPSK et les coefficients de canal sont  
 Totallement décorrélée. Comme on peut le voir, lorsque  $N_r$  augmente, les performances  
 en termes de Le BER diminue plus rapidement.  
 Les pentes des courbes illustrent le gain en ordre de diversité. La performance à  $SNR_t = 0$   
 dB est lié au moyennage du bruit sur la réception antennes.

Nous étudions la possibilité de supprimer le préfixe cyclique (CP) du  
 multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) dans les systèmes  
 MIMO. Nous considérons la transmission en liaison montante, tandis que nos résultats  
 sont également applicables à la liaison descendante. Nous avons vu que lorsque le préfixe  
 cyclique (CP) est plus long que le délai du canal réponse impulsionnelle, le modèle du  
 système OFDM est équivalent à un évanouissement plat tel qu'obtenu dans. Par  
 conséquent, les systèmes MIMO peuvent être parfaitement associés à la modulation  
 OFDM.



**Figure 4.8 :** BER vs SNR pour cp-OFDM, MIMO[(2x4) -(2x3) -(2x2) -(2x1)].

La figure illustre le BER pour un nombre de sous-porteuses égale à 4096 et des  
 MIMO[(2x4) -(2x3) -(2x2) -(2x1)]. Les résultats montrent qu'il y a une grande  
 sensibilité à la taille de la constellation utilisée,

Pour un système de transmission MIMO-OFDM  $4 \times 2$ , Pr\_Compact\_1 et  
 Pr\_Compact\_3 présentent une synchronisation parfaite pour un  $SNR \geq 10$  dB,

Ainsi que les deux autres méthodes peuvent avoir une probabilité de synchronisation

Temporelle égale à 98% pour le même SNR.

Dans ces deux figures, nous avons constaté qu'une dégradation de performance

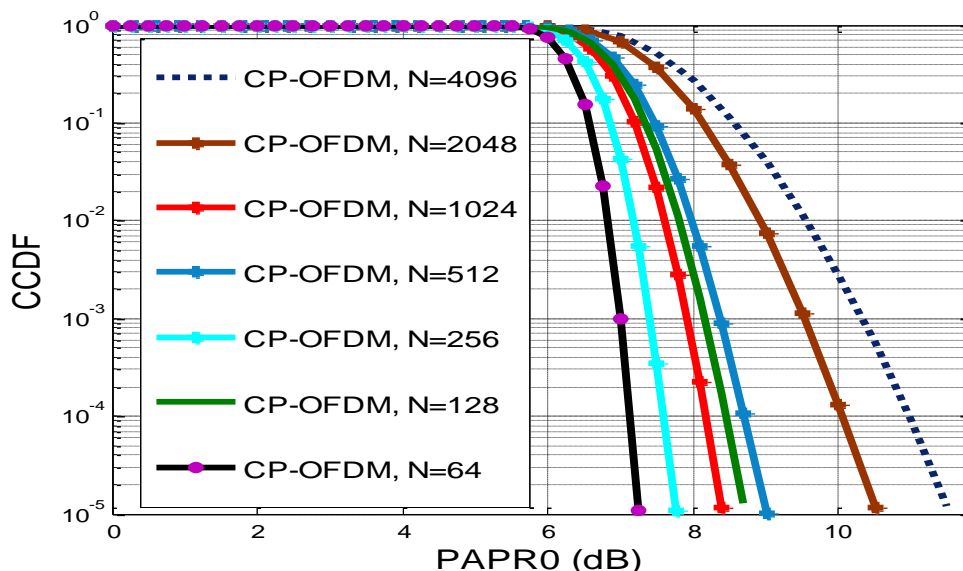
De la probabilité de synchronisation temporelle se présente quand les nombres des Antennes dans un système MIMO augmente.

Un préfixe périodique (CP) pour le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) plus court que l'étalement de retard de canal maximal provoque ISI et ICI. Cette sélectivité temporelle permet de supprimer asymptotiquement les signaux retardés indésirables, tandis que la sélectivité fréquentielle est conservée dans les codeurs primaires pour s'adapter à l'interface radio MIMO-OFDM conventionnelle où le pré-codage est appliqué au niveau de la sous-porteuse. L'analyse révèle un compromis optimal dans la conception de pré codage montrant que plus les encodeurs initiaux améliorés qui en résultent offrent des gains ultérieurs dans un taux asymptotiquement réalisable avec un nombre infini d'antennes, ainsi que dans les performances de taux d'erreur de symbole d'une antenne.

Plus la valeur est élevée MIMO Le taux d'erreur diminue.

#### 4.2.2.5 .Performance des méthodes pour la réduction du PAPR :

Le Figures 4.6 et. Montrez les courbes CCDF pour PAPR des tracés précédents pour  $N = 4096$  à  $N = 64$ , respectivement. Comme le montre la figure suivante, le PAPR du signal OFDM d'origine est de 12db.



**Figure 4.9.** CCDF VS PAPR0(dB) pour CP-OFDM,  $N=[4096;2048;1024;512; 256;128;64]$ .

D'après la figure 4.6, nous remarquons que la valeur de puissance était égale à 7,2512 par rapport à cp-ofdm ;  $N = 64$  et augmenté à une valeur de 11,7885 par rapport à la courbe cp-ofdm ;  $N=4096$

L'analyse de ces résultats montre qu'il y a une amélioration du PAPR à mesure que la taille de la FFT augmente.

Les valeurs PAPR de l'OFDM augmentent à mesure que les nombres  $N$  ; Nombre de sous-porteuses augmentent, ce qui entraîne une consommation d'énergie élevée et des distorsions non linéaires du signal au niveau de l'amplificateur de puissance.

#### 4.2.2.6. État de l'art des techniques de réduction du PAPR :

A partir de la figure suivante nous essayons de présenter un cas technique non exhaustif de techniques de réduction du PAPR, en particulier des techniques ; Réserve de tonalité (TR), écrêtage classique, planification sélective (SLM) et séquençage partiel de transmission (PTS). En fait, toutes les techniques de réduction PAPR nécessitent généralement des compromis soit en termes de dégradation du BER, de complexité numérique ou de contamination des canaux adjacents en raison de lobes de signal secondaires plus élevés après réduction PAPR pour certaines techniques ou en termes d'augmentation ou de diminution de la force moyenne du signal après réduction PAPR ou Productivité. C'est mieux que ces techniques

##### a) La méthode Tone Réserve (TR) :

Est une technique de la classe des méthodes ajout de signal. C'est une méthode qui a été essentiellement étudiée sur le signal OFDM d'une façon générale sans spécification d'une norme particulière et qui peut être généralisée à tout type de systèmes multi-porteuses. La méthode TR est donc une technique relativement récente.

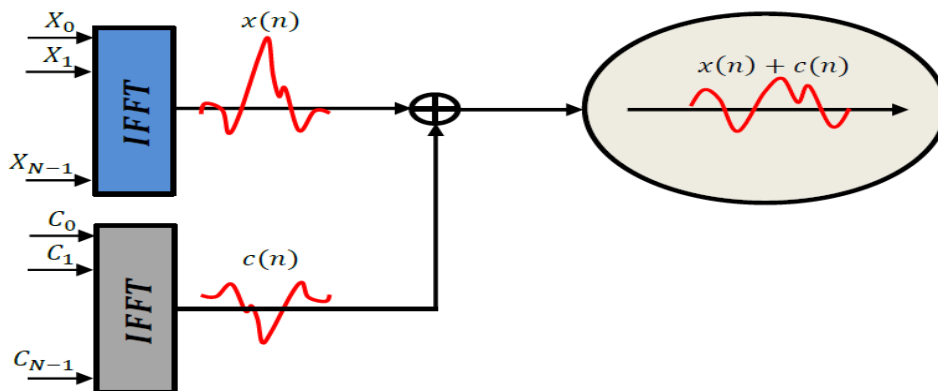


Figure 4.10 : Schéma de principe de la Tone Réserve.

### b) Method decretage ‘Clipping method’:

Intuitivement cette méthode est très simple à comprendre, car il s'agit, à l'aide d'un écrêtage de l'amplitude du signal à un seuil prédéterminé de diminuer l'amplitude maximale du signal au niveau de ce seuil. Ce procédé a donc pour effet de diminuer la variation de puissance du signal et par conséquent de diminuer la sensibilité du signal aux non-linéarités.

### c) La méthode de ‘Selective Mapping’:

L'idée est de multiplier la séquence de symboles complexes issus de la modulation numérique par une série de différents vecteurs de façon à ce que ne soit retenu que le produit au PAPR le plus faible (après IFFT)..

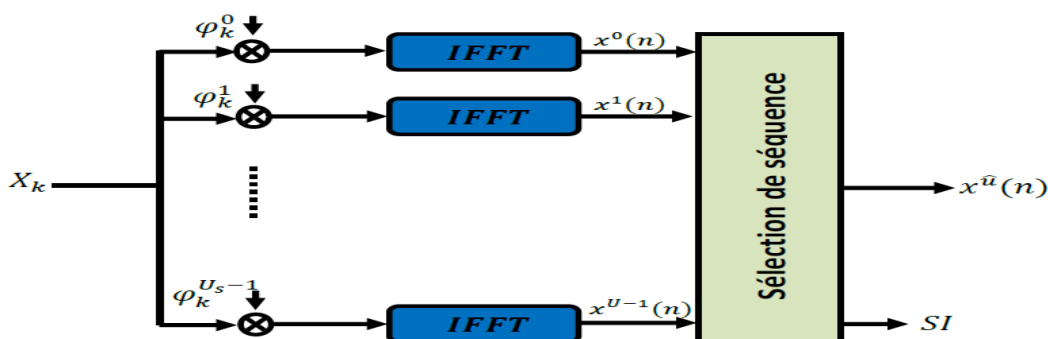


Figure 4.11 : Schéma de principe de la Sélective Mapping. [33]

### d) Méthode de Séquence de Transmission Partielle :

Parmi les techniques les plus étudiées pour la réduction du PAPR, on trouve la PTS, car tout cela offre une forte diminution du PAPR. De plus, la PTS permet l'utilisation de stratégies méta-heuristiques pour une efficacité de difficulté de calcul réduite. Concrètement, dans un PTS, la transmission de perspicacité est généralement divisée en sous-blocs disjoints. [33]

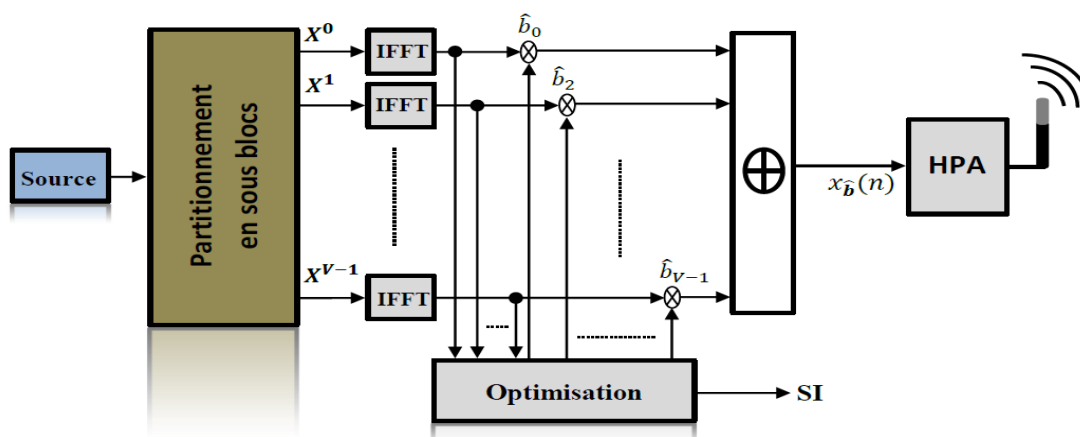
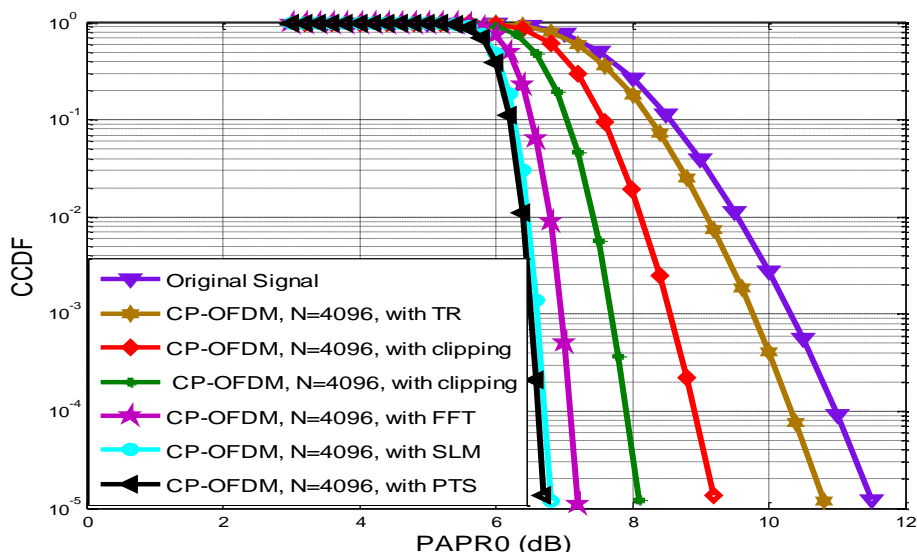


Figure 4.12 : Schéma de principe de la PTS. [33]

La technique de réduction PAPR est bien connue dans le domaine des signaux et des systèmes multi porteuses, en particulier la modulation OFDM.



**Figure 4.13:** Comparaison des performances de réduction du PAPR de la technique pour CP- OFDM POUR different valeurs des paramètres, N=4096, with [TR ; clipping ; FFT, SLM ; PTS].

D'après la figure, nous pouvons voir que les valeurs PAPR sont les suivantes [PAPR with (TR=10.95(db);clipping=9.2;8.1(db);FFT=7.25(db);SLM=6.99(db);PTS=6.85(db))] On remarque dans la figure évaluer PAPR (TR=10.95 ; clipping=9.2 :8.1) Ces deux procédés consomment beaucoup d'énergie par rapport aux autres. Pour les autres les Valeurs PAPR (FFT=7.25 ; SLM=6.99 ; PTS=6.9) Quant à ces procédés, on constate qu'ils consomment moins d'énergie, mais le meilleur d'entre eux et le moins énergivore est PAPR=6.85(db) Nous concluons que le meilleur processus pour réduire la consommation d'énergie : méthode PTS. Cette méthode a permis d'améliorer les performances de réduction du PAPR en augmentant le nombre de facteurs de phase prédéterminés.

### 4.3. Comparaison des formes d'ondes multi porteuses :

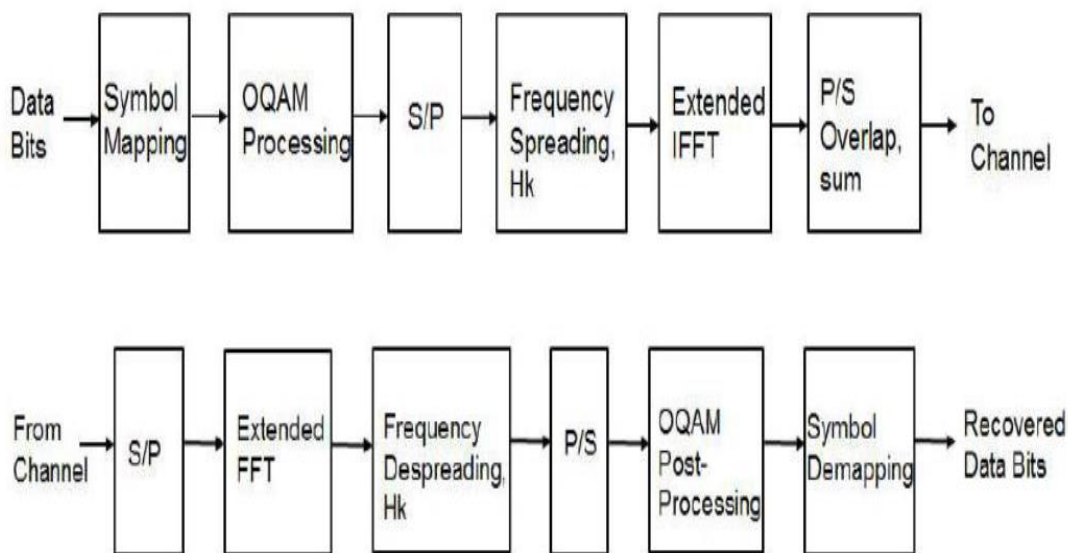
Dans cette partie, nous présentons une étude comparative de différentes formes d'ondes : CP-OFDM vs ZP -OFDM vs UFMC vs FBMC.

#### 4.3.1. Performances de la FBMC :

L'OFDM se caractérise par sa robustesse aux canaux sélectifs en fréquence et une simple égalisation, grâce à l'utilisation d'un préfixe cyclique. Cependant, l'utilisation de cet intervalle de garde réduit l'efficacité spectrale de l'OFDM, puisqu'on ne transmet pas de données utiles durant la période de transmission du CP. En plus, l'OFDM classique utilise le filtre rectangulaire et ne peut donc pas être localisé en temps et en fréquence, il

souffre ainsi des lobes secondaires qui génèrent des interférences. Les systèmes FBMC (filter Bank based multi carrier) ont été proposés afin d'augmenter l'efficacité spectrale de l'OFDM en n'utilisant pas d'intervalle de garde, et en filtrant séparément chaque porteuse par un filtre bien localisé en temps et en fréquence. Dans cette partie nous présentant

Les résultats des simulations réalisés pour l'évaluation des performances de la technique FBMC. La figure 4.14 représente le schémas blocs utiliser pour les simulations.



**Figure 4.14:** Schéma fonctionnel de l'émetteur-récepteur FBMC/QAM

### 4.3.2. Performances de la UFMC :

La modulation UFMC (Universal-Filtered-Multi-Carrier) a été introduite comme une généralisation des modulations FBMC et OFDM. Au lieu d'appliquer un filtre sur chaque porteuse comme c'est le cas pour la FBMC ou bien appliquer un filtre sur l'ensemble des porteuses comme c'est le cas pour l'OFDM, l'UFMC applique un filtrage par bloc de porteuses de telle sorte que chaque bloc ait des émissions hors bandes réduites. La modulation UFMC a la flexibilité du choix du filtre ainsi que le nombre des sous-blocs appelés souvent blocs de ressources (resource block).

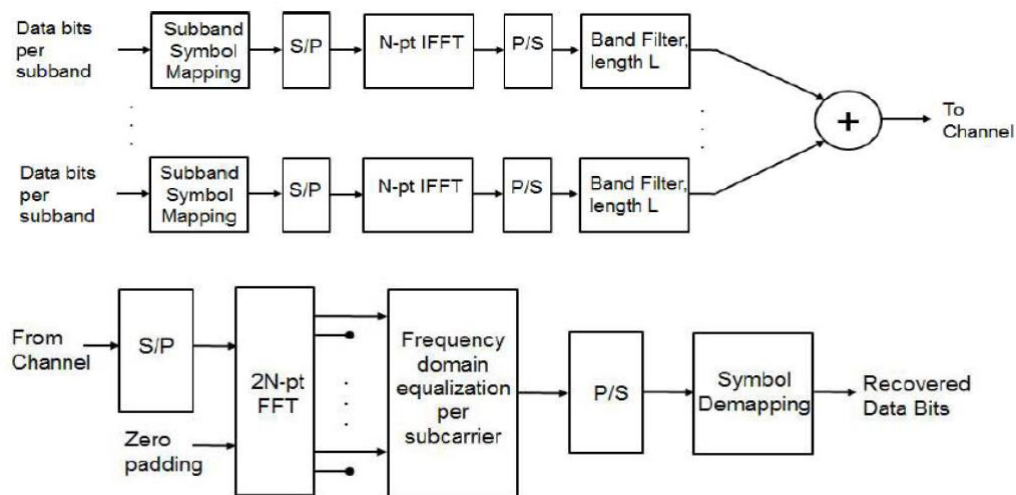


Figure 4.15 : Schéma fonctionnel de l'émetteur-récepteur UFCM.

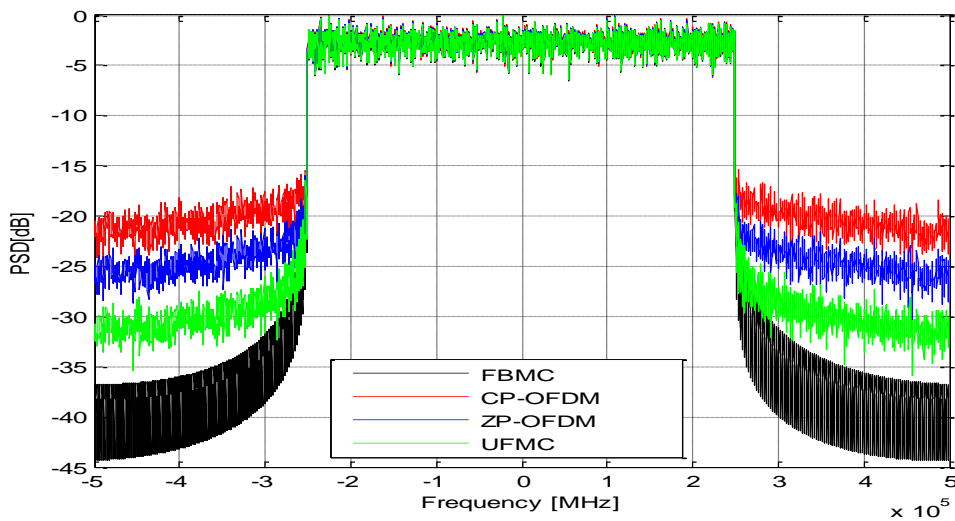
4.3.3. Paramètres de simulation :

Dans cette partie, nous présentons une étude comparative de la forme d'onde OFDM avec les différentes ondes précédemment introduites par l'UFCM et le FBMC. Les paramètres de simulation sont les mêmes que ceux utilisés dans la première partie de simulation : les tableaux (3.1) et (3.2) et (3.3).

4.3.4. Résultats des simulations :

4.3.4.1. Densité spectrale de puissance et OOB :

La figure (4.16) illustre la comparaison entre les DSP des trois formes d'onde OFDM, UFCM et FBMC.



Fig

ure 4. 16 : DSP [OFDM (cp-OFDM. ZP -OFDM) vs UFCM vs FBMC),

Enfin, la Figure (4.16) montre tous les spectres ensemble afin de les comparer facilement. Il on peut voir que les lobes latéraux CP-OFDM et UFMC sont plus grands que FBMC, par conséquent, ces formes d'onde ont une efficacité spectrale pire. De plus, UFMC et FBMC chutent initialement plus rapidement, ce qui signifie qu'ils ont une consommation d'énergie plus faible au-delà du bord de groupe.

Cette caractéristique est nécessaire pour prendre en charge les services IoT. Par conséquent, l'interférence entre bandes de fréquences voisines est réduite. En outre, ils atteignent des débits de données élevés dus à des performances d'efficacité spectrale élevées. Avec tout cela, il est facile de conclure que FBMC.la forme d'onde a le meilleur emplacement spectral CP-OFDM.

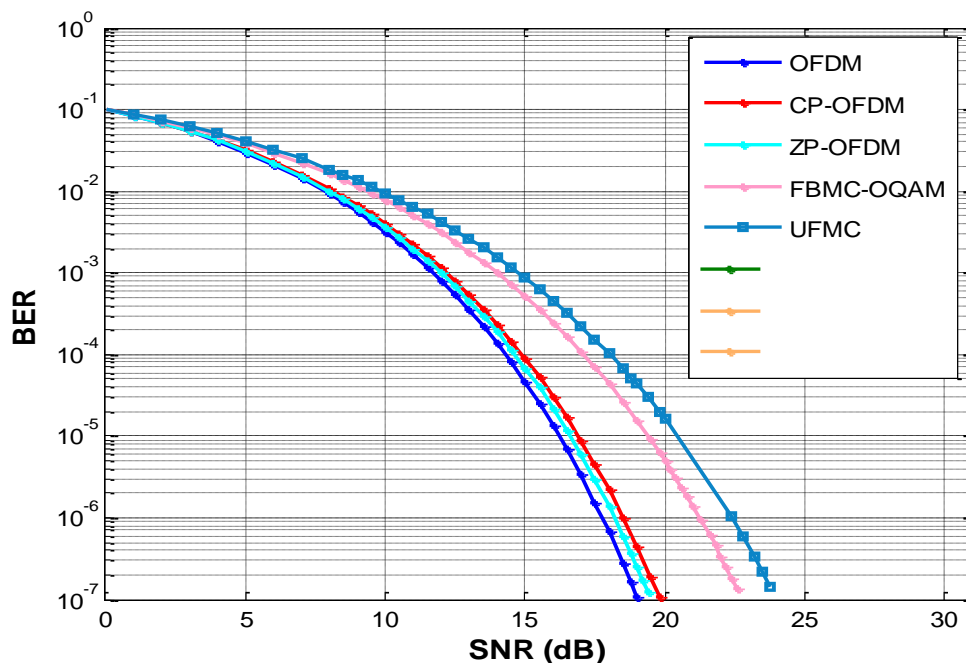
La DSP nous indique aussi le taux du rayonnement hors bande (OOB) qui est une caractéristique propre à chaque forme d'onde. Du côté du rayonnement hors bande (OOB), exprimé par l'équation (2.25), la FBMC présente les meilleurs résultats, tandis que pour l'OFDM ce paramètre reste un inconvénient majeur avec des valeurs très élevées. L'UFMC présente des valeurs OOB moyennes et acceptables.

Un autre paramètre aussi important que le OOB dans l'évaluation de la forme d'onde est le facteur de crête (PAPR). Ce paramètre, exprimé par l'équation (2.24), donne une idée sur les pics de puissance du signal et donc une idée sur la consommation énergétique de la forme d'onde.

DONC L'analyse de ces résultats montre que le FBMC présente les meilleurs résultats en termes de PAPR.

#### 4.3.4.2 Taux d'erreur binaire :

Dans cette section nous présentons la comparaison de l'évolution du taux d'erreur binaire (BER) en fonction du rapport signal sur bruit (SNR) pour les différentes formes d'ondes ; A travers les résultats montrés dans la figure suivante :



**Figure 4.17:** BER vs SNR pour l'OFDM, et cp-OFDM et zp- OFDM, l'UFMC et FBMC.

D'après la figure, nous remarquons que la valeur est égale pour toutes les courbes, car elle recommence à diminuer, augmente en conséquence la valeur de SNR la plus petite valeur la plus grande valeur

La variation du SNR affecte la qualité de la constellation. La simulation du BER vs SNR

De OFDM a été généré pour le SNR de zéro à 18,5 dB, nous avons BER = 0

ZP-OFDM a été généré pour le SNR de zéro à 19 dB, nous avons BER = 0

CP-OFDM a été généré pour le SNR de zéro à 19,5 dB, nous avons BER = 0

FBMC a été généré pour le SNR de zéro à 22.6 dB, nous avons BER = 0

UFMC a été généré pour le SNR de zéro à 13,8 dB, nous avons BER = 0

Donc ; OFDM a les meilleures performances par rapport à l'autre technique. Il est plus proche de zéro à partir de 18.5 dB nous avons BER=0.

#### 4.4. Conclusion :

Un certain nombre d'effets de l'amplification du signal d'enveloppe non constante ont été présentés. Par de simples exemples, il a été montré que les distorsions engendrées par une telle amplification ce qui nécessite, implicitement, de lutter contre ces effets. D'autre part, nous avons montré que plus l'IBO est grand, moins le signal est dégradé et qu'au retour l'efficacité énergétique de l'amplificateur est faible. Ces résultats montrent l'intérêt de faire un compromis entre l'efficacité énergétique et la dégradation du signal. En effet, nous avons montré que plus le PAPR est grand, plus il est difficile de concilier efficacité énergétique et dégradation du signal. Cette conclusion justifie l'intérêt de la réduction du PAPR avant l'amplification.

La seconde simulation que nous avons réalisée a permis de mettre en évidence un OFDM. CP-OFDM et zp-OFDM et UFMC ; FBMC

Nous avons également discuté des techniques non exhaustives pour les techniques de réduction du PAPR, en particulier les techniques ; Réserve de tonalité (TR), cisaillement classique, ordonnancement sélectif (SLM) et séquençage partiel de transmission (PTS) et nous avons conclu que la méthode en cascade est efficace parmi ces méthodes (méthode PTS).

Dans la deuxième partie du chapitre, nous avons fait une simple comparaison des formes d'onde et conclu que FBMC a apporté une diminution significative de PAPR par rapport à OFDM et UFMC qui ont des valeurs plus élevées. Côté hors bande (OOB), FBMC montre les meilleurs résultats, alors qu'en OFDM ce paramètre reste un inconvénient majeur avec des valeurs très élevées. L'UFMC a des valeurs OOB moyennes et acceptables.

Cette simulation nous a également permis de voir l'effet de l'estimation de canal en présence d'évanouissement par trajets multiples. La modulation et la démodulation d'un point de vue BER, ainsi que les paramètres de la chaîne de transmission (le choix de la constellation et du SNR). On peut donc conclure que la liaison OFDM, qui utilise la modulation QPSK, nous donne de meilleures performances de liaison en fonction BER par rapport à autres modulation.

### Conclusion Générale :

Le réseau 5G va arriver à l'horizon de 2022, et doit être capable de répondre à plusieurs exigences imposées par les différents services et l'augmentation exponentielle du nombre des équipements utilisateurs qui ne se limitent plus aux téléphones portables, mais il y a aussi les objets connectés, tels que les voitures, les maisons... Les services qui seront intégrés dans 5G peut-être regroupés en 3 grandes catégories de cas d'usage. Il y a le eMBB qui regroupe le cas d'utilisation requérant des débits élevés allant jusqu'à 10 Gbps, le uRLLC qui constitue les services très exigeants en termes de fiabilité et de latence, et mMTC qui regroupe les objets connectés.

Les normes pour la partie sans fil de la 5G appelée New Radio ou NR sont définies par le 3GPP. Avec l'adoption de nouveaux spectres dans la bande des ondes millimétriques, le défi a été d'apprendre ou de créer des technologies radio capables de répondre aux exigences des services 5G et ondes millimétriques. La forme d'onde est une grande partie de l'aspect radio du réseau mobile, donc choisir la bonne forme d'onde était un vrai problème. De nouvelles formes d'onde ont été envisagées ; Mais à la fin. Présentation des avantages et inconvénients, CP-OFDM ; ZP-OFDM et OFDM - HPA, UFMC.FBMC Appelé par 5G NR. Des techniques seront adoptées pour pallier aux inconvénients présentés par ces formes d'ondes basées sur OFDM. L'application d'une opération de filtrage ou de fenêtrage peuvent permettre de réduire le rayonnement hors bande, et des techniques de prétraitement du signal peut réduire le PAPR.

Dans ce travail nous avons étudié trois formes d'ondes candidates pour la couche physique des réseaux 5G. Dans la première partie de notre travail, nous avons réalisé une étude théorique sur les nouvelles technologies de 5ème génération. Par la suite, dans la deuxième partie nous avons présenté les trois formes d'ondes CP-OFDM, FBMC et UFMC. Dans la dernière partie nous avons mené une étude paramétrique de ces formes d'onde afin de juger leurs performances. Par la suite, dans la troisième partie Nous avons également fourni un bref aperçu des principales technologies habilitantes de la 5G NR, notamment mmWave, MIMO massif, formation de faisceau 3D / OFDM évolutif la Dimonssienement du system multi porteuse.

Dans le quatrième chapitre Nous avons fait la partie appliquée, qui est la simulation Matlab Les résultats de cette simulations obtenus :

À partir de la première partie de la simulation, nous avons conclu que l'OFDM présente certains inconvénients tels qu'un rapport de puissance crête sur moyenne (PAPR) élevé et un taux d'erreur binaire (BER) élevé. La sensibilité des dispositifs utilisés côté émetteur OFDM tels que les amplificateurs haute puissance (HPA) est très sévère sur la boucle de traitement du signal, ce qui affecte les performances du système. Lorsque nous travaillons avec des amplificateurs haute puissance, ils produisent des déplacements de signal dans la région non linéaire, Les résultats ont montré que le FBMC a les meilleurs résultats en termes de rayonnement hors bande et de facteur de crête. Pour le taux d'erreur sur les bits (BER), l'OFDM et l'UFMC continuent d'être plus performants. Le BER enregistré par FBMC peut être amélioré par une étude plus approfondie des techniques d'équation. Cependant, cette forme d'onde est la plus complexe en termes de mise en œuvre.

D'un autre côté, les performances enregistrées par l'UFMC sont aussi remarquables vu qu'elle dépasse les performances de l'OFDM en termes de OOB et de PAPR avec un BER acceptable. La simplicité relative de la mise en oeuvre de l'UFMC la place en bonne position pour une éventuelle normalisation de la couche physique de la 5G.

### Webography & bibliographies :

[1]: **Swati Yadav**, "Sugandha Singh Review paper on development of mobile wireless technologies," 1g to 5g ,International Journal of Computer Science and Mobile Computing, "A Monthly Journal of Computer Science and Information Technology," IJCSMC, Vol. 7, Issue. 5, May 2018, pg.94 – 100.

[2]: <https://routeur-4g.com/4g-h-4g-4g-5g-comprendre-les-reseaux-mobiles-et-leurs-normes/> 24-06-2019.

[3]: **Kelechi G. Eze, Matthew N. O. Sadiku, Sarhan, M. Musa**, "International Journal of Scientific Engineering and Technology" 1 July 2018 ,Page 62 , 5G Wireless Technology, A Primer , Roy G, Perry College of Engineering, Prairie View A&M University, Prairie View.

[4]: **Joe Barrett**, "5G Spectrum Bands (Global Mobile Suppliers Association," February 2017.

[5] : **O. Ezratty**, « *Les nombreux défis de la 5G* », Les Opinions Libre, Février 2019.

[6]: <https://www.digitalcorner-wavestone.com/2020/06/1a-5g-introduction-et-presentation-generale-des-concepts-techniques/>.

[7] : Les enjeux de la 5G », ARCEP, Mars 2017

[8]: « 5G; NR; Overall Description; Stage-2», 3GPP TS 38.300 version 15.3.1 Release 15, October 2018.

[9]: « 5G NR gNB Logical Architecture and It's Functional Split Options ». <https://www.techplayon.com/5g-nr-gnb-logical-architecture-functional-split-options>, October 2017

[10]: [://www.viavisolutions.com/fr-fr/architecture-5g](https://www.viavisolutions.com/fr-fr/architecture-5g)

[11] : « 5G Cell Phone Architecture », <http://www.techplayon.com/5g-cell-phone-architecture/>, Septembre 2018

[12] : « Groupe spécialisé sur les IMT 2020 », consulté en Avril 2019.

<https://www.itu.int/fr/ITU-T/focusgroups/imt-2020/Pages/default.aspx>

[13] : **Yang Yang, Jing Xu, Guang Shi, Cheng-Xiang Wang**, «5G Wireless System : Simulation and Evaluation Techniques », Springer, livre année 2017.

[14] : **Bendahmane Amira Meriem, Ghermoul Rania**, 'Etude de méthodes de beamforming à maximisation du rapport signal sur bruit pour des systèmes FBMC''Mémoire, Année universitaire 2017/2018.

[15] : **KERRICHE Noura**, « Comparaison de la modulation UPMC de la 5ème génération avec la modulation multi-porteuses OFDM », Mémoire de Master Mention Électronique ; Systèmes de Télécommunications (ST) ; Année Universitaire 2017-2018.

[16] : **Ali RACHINI**, « Etude de la synchronisation temporelle dans les systèmes MIMO –OFDM appliqués aux réseaux mobiles », thèse de doctorat de L'INSA DE RENNES, Page 2-12-13, 2014.

[17] : **Helmi BEN HNIA et all**, « Etude des performances de la modulation OFDM pour l'utilisation dans les systèmes de communication sans fils de la 4G », SETIT 2004 Conférence Internationale : Sciences Electronique, Technologies de l'Information et

[18] : **Hasnaoui Saida & Nouas Wissam**, « Allocation efficace des bits pour un système multi-porteuses OFDM », mémoire de master en réseaux & télécommunications, département d'électronique, université de blida1, Page 17- 27-30, 2013.

[19] : **EWODO ONOMO HERVE ROMUALD**, « Simulation d'un système de communication MISO avec le codage OFDM-CDMA », mémoire de Master Traitement de l'information et Systèmes électroniques, Page 10-30, 2015.

[20] : **BEKKAI Ryma & BENSALAH Amel** ; « Analyse du PAPR dans les systèmes SISO/MIMO OFDM », mémoire de Master en Électronique option théorie de l'information et système électronique, université de blida 1, Page 24-25, 2013.

[21] : **Tobias Hidalgo Stitz**, « Filter Bank Techniques for the Physical Layer in Wireless », thèse de Doctorat à l'université de Tampere, année 2010.

[https://tutcris.tut.fi/portal/files/5471559/hidalgo\\_stitz.pdf](https://tutcris.tut.fi/portal/files/5471559/hidalgo_stitz.pdf)

[22] : **DAOUD Khadîdja**, « SIMULATION COMPARATIVE DES TECHNIQUES FBMC ET OFDM POUR LES RESEAUX 5G », Mémoire pour l'obtention du Diplôme de master, Juin 2016.

[23] : **BTISAM MOURID**, « FILTRE À DÉCIMATION PARALLELISÉ », Mémoire de maîtrise électronique, UNIVERSITÉ DU QUÉBEC, 16 Octobre 2003.

## Webography & bibliographies

- [24] : **BENYAHIA Hafsa Imane** et **CHERIFI Wafa**, « Etude des techniques MIMO a base de FBMC pour la 5G », Mémoire pour l'obtention du Diplôme de master, 13 Juin 2017.
- [25] : **J. Prado**, « Banc de filtre », document, 8 Juin 2006, consulté le 20 Mai 2019.  
<https://docplayer.fr/30400172-Bancs-de-ltres-j-prado.html>
- [26]: Fa-Long Luo, PH.D., IEEE Fellow, **Charlie ( Jianzhong) Zhang**, Ph.D., IEEE Fellow, « SIGNAL PROCESSING FOR 5 G», ALGORITHMS AND IMPLEMENTATIONS, IEEE PRES, WILEY, Page 14, ISBN: 978-1-119-11646-2 Oct 2016, Wiley-IEEE Press
- [22] : **DAOUD Khadîdja**, « SIMULATION COMPARATIVE DES TECHNIQUES FBMC ET OFDM POUR LES RESEAUX 5G », mémoire de master, département de télécommunication, université de Tlemcen, Page 17-20, 2016.
- [27]: **Grigory Bochechka** et all, «Comparative analysis of UFMC technology in 5G networks», International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Moscow Technical University of Communications and Informatics, (2017).
- [28]: 5G Waveform Candidates «<http://www.rohde-schwarz.com/appnote/1MA271>»,
- [29] : **CHAFII, Marwa**. « Etude d'une nouvelle forme d'onde multi porteuses à PAPR réduit ». 2016. These de doctorate. Supélec
- [30]: Yahia Medjahdi, Sylvain Traverso. «Critical and comparative study of waveforms in C-MTC context». Document 2017. Délivrable D2.1, Project WONG5
- [31] : **Mr. BOUAZIZ Samir**, « Réduction du PAPR du système OFDM-MIMO en 4G », Mémoire pour l'obtention du Diplôme de MAGISTER, année 2015.<https://www.univ-setif.dz/MMAGISTER/images/facultes/TEC/2015/bouaziz%20samir.pdf>
- [32]: **A. Zaidi**, F. Athley, J. Medbo, U. Gustavsson, G. Durisi, X. Chen, « *5G Physical Layer* », ELSEVIER, 2018.
- [33] : **DR : MERAH Hocine** « Réduction du Facteur de Crête des Signaux Multi porteuses pour les Systèmes de Télécommunication de la Future Génération ». Présentée et soutenue publiquement Le : 04/06/2020 Université Amar Telidji – Laghouat.
- [34] : 5G New Radio NetworkPlanning WhitepaperFebruary 2019 web :  
[www.ranplanwireless.com](http://www.ranplanwireless.com)

## Webography & bibliographies

[35] : **D. Lopez-Perez**, I. Guvenc, G. de la Roche, M. Kountouris, T. Q. S. Quek and J. Zhang, "Enhanced intercell interference coordination challenges in heterogeneous networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 18, no. 3, pp. 22-30, June 2011.

[36] : <https://www.javatpoint.com/history-of-wireless-communication>