

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

Université Djilali Bounaama - Khemis Miliana



**Faculté des Sciences et de la Technologie**

**Département de la Technologie**

Mémoire du Projet de Fin d'Études Pour l'obtention de diplôme

**Master**

En

**Systems des Télécommunications**

Thème :

**Etude comparative et simulation des algorithmes  
conventionnels et adaptatifs appliqués à une chaine de  
communication 5G à base de Massive MIMO**

Réaliser par :

**MOSBAH Mohamed**

**BOUMELLAL Mohammed Seyf  
El Islam**

Soutenu en Juin 2023 devant le Jury :

Dr. BENYAROU Mourad

Encadreur

Dr. ROUIS Mohammed

Président

Dr. BENBAKHTI Fatiha

Examineur

Année Universitaire 2022/2023

## Résumé

La cinquième génération de la téléphonie mobile, la 5G, consomme de plus en plus d'infrastructure, comme les stations de base, les relais..., car plusieurs utilisateurs peuvent communiquer dans un espace très étroit qui peut être une petite cellule ou une microcellule. Pour cela les algorithmes adaptatifs sont un outil de précision pour la détection des utilisateurs en mouvement. Ces algorithmes créent des faisceaux très étroits qui sont dirigés vers un ou un groupe d'utilisateurs à la fois et sans interférences.

Le but de ce travail est d'étudier et simuler et voir les performances de quelques algorithmes conventionnels et adaptatifs appliqués à une chaîne de communication 5G à base de Massive MIMO et par suite faire une comparaison.

**Mots clés :** algorithmes conventionnels, algorithmes adaptatifs, 5G, Massive MIMO, comparaison.

---

## Abstract

The fifth generation of mobile telephony, 5G, consumes more and more infrastructure, such as base stations, relays..., because several users can communicate in a very narrow space that can be a small cell or a microcell. For this purpose, adaptive algorithms are a precision tool for the detection of users in movement. These algorithms create very narrow beams that are directed to one or a group of users at a time and without interference.

The purpose of this work is to study, simulate, and see the performance of some conventional and adaptive algorithms applied to a 5G communication chain based on Massive MIMO and then proceed to a comparison.

**Key words:** conventional algorithms, adaptive algorithms, 5G, Massive MIMO, comparison.

---

## ملخص

يستهلك الجيل الخامس من الهاتف المحمول المزيد من البنية التحتية، مثل المحطات والمرحلات...، بسبب تمكن العديد من المستخدمين من التواصل ضمن مجال ضيق جداً يمكن أن تكون خلية صغيرة أو ميكروخلية. لهذا الغرض، تعد الخوارزميات التكيفية أداة دقيقة لتحديد وتعقب المستخدمين في حالة حركة. تشكل هذه الخوارزميات حزمًا جد ضيقة موجهة إلى مستخدم واحد أو مجموعة من المستخدمين في نفس الوقت دون تداخل بينهم.

يتمثل الغرض من هذا العمل في دراسة ومحاكاة وملاحظة أداء بعض الخوارزميات التقليدية والتكيفية المطبقة على سلسلة اتصال الجيل الخامس مبنية على تقنية متعدد المداخل والمخارج الضخمة ثم إجراء مقارنة بينها.

**كلمات مفتاحية:** الخوارزميات التقليدية، الخوارزميات التكيفية، الجيل الخامس، تقنية متعدد المداخل والمخارج الضخمة، مقارنة.

## Remerciements

*Nous remercions tout d'abord le **grand Dieu** pour l'achèvement de ce mémoire.*

*Nous exprimons nos gratitude à Monsieur le **président de jury** d'avoir accepté examiné ce mémoire.*

*Nous remercions Messieurs les **membres de jury**, d'avoir accepté de prendre part à ce jury ainsi que pour l'intérêt qu'ils l'ont porté à ce travail.*

*Nous remercions Docteur **Benjarou Mourad** notre encadreur, pour ses conseils et suggestions avisés qui nous aidés à mener à bien ce travail, et d'avoir rapporté à ce mémoire ces remarques et conseils.*

**Dédicace**

*Je dédie ce mémoire à  
Mes très chers parents, pour leurs sacrifices,  
Et leurs encouragements que Dieu me les garde.  
A celui qui m'a soutenue tout au long de ce projet,  
A mon encadreur qui m'a formé  
Et accompagné avec beaucoup de patience.  
Mon très cher frère Yassine  
A mes chers amis : Chams Eddine, Mohamed, Wail, Moussa  
et Ali.  
A toute ma famille  
Et à tous ceux qui m'ont aidé à réaliser  
Ce travail je vous dis merci.*

*Mohamed.*

**Dédicace**

*Je dédie ce mémoire à  
Mes très chers parents, pour leurs sacrifices,  
Et leurs encouragements que Dieu me les garde.  
A celui qui m'a soutenue tout au long de ce projet,  
A mon encadreur qui m'a formé  
Et accompagné avec beaucoup de patience.  
Mes très chers frères  
A mes chers amis  
Toute ma famille  
Et à tous ceux qui m'ont aidé à réaliser  
Ce travail je vous dis merci.*

*Islam*

## Sommaire

<b>Résumé .....</b>	<b>II</b>
<b>Remerciements .....</b>	<b>III</b>
<b>Dédicace.....</b>	<b>IV</b>
<b>Sommaire .....</b>	<b>VI</b>
<b>Liste des figures .....</b>	<b>VIII</b>
<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>X</b>
<b>Abréviations.....</b>	<b>XI</b>
<b>Introduction générale.....</b>	<b>2</b>
<b>Chapitre 1: Algorithmes conventionnels et adaptatifs.....</b>	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Introduction : .....</b>	<b>4</b>
<b>1. Les algorithmes conventionnels : .....</b>	<b>4</b>
<b>2. Les algorithmes adaptatifs : .....</b>	<b>5</b>
2.1. Algorithmes adaptatifs aveugles : .....	6
2.2. Algorithmes adaptatifs non aveugle : .....	7
2.2.1. Algorithme LMS : .....	8
2.2.2. Algorithme RLS : .....	9
2.2.3. Algorithme MMSE : .....	10
<b>3. Les antennes intelligences : .....</b>	<b>11</b>
3.1. La différence entre les antennes traditionnelles et les antennes intelligentes .....	11
<b>Conclusion : .....</b>	<b>12</b>
<b>Chapitre 2: Principe de base d'une chaîne de communication 5G.....</b>	<b>13</b>
<b>Introduction : .....</b>	<b>14</b>
<b>1. Histoire et évolution des technologies antérieures de communications mobiles : .....</b>	<b>14</b>
<b>2. Rappel sur la chaîne de communication numérique sans fil : .....</b>	<b>16</b>
<b>3. Bandes de fréquences utilisées dans la 5G : .....</b>	<b>17</b>
3.1. Ondes centimétriques : .....	17
3.2. Ondes millimétriques : .....	18
<b>4. Techniques de modulation utilisées dans la 5G : .....</b>	<b>18</b>
<b>5. Formes d'ondes utilisées dans la 5G : .....</b>	<b>19</b>
5.1. OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing): .....	19
5.2. GFDM (Generalized Frequency Division Multiplexing): .....	21
5.3. FBMC (Filter Bank Multicarrier) : .....	22

5.4. UFMC (Universal Filtered Multi Carrier): .....	23
<b>6. Chaîne de communication à base de massive MIMO :.....</b>	<b>24</b>
6.1. MIMO et Massive MIMO :.....	25
6.2. Topologie du réseau d'antennes utilisées : .....	26
<b>Conclusion : .....</b>	<b>28</b>
<b>Chapitre 3: Association des algorithmes conventionnels et adaptatifs dans les massive MIMO</b> .....	<b>29</b>
<b>Introduction : .....</b>	<b>30</b>
<b>1. Modélisation du système massive MIMO associé aux algorithmes conventionnels et adaptatifs :.....</b>	<b>30</b>
1.1. La formation de faisceaux adaptatifs : .....	30
1.2. Le formateur de faisceaux conventionnel (commuté) :.....	31
<b>2. Association avec les algorithmes conventionnels : .....</b>	<b>31</b>
<b>3. En cas de l'algorithme « Retarder et Additionner » (DAS) :.....</b>	<b>32</b>
3.1. En cas de la liaison montante :.....	32
3.2. En cas de la liaison descendante : .....	34
<b>4. Association avec les algorithmes adaptatifs :.....</b>	<b>34</b>
4.1. En cas de la liaison montante :.....	35
4.2. En cas de la liaison descendante : .....	36
<b>5. En cas de l'algorithme LMS :.....</b>	<b>37</b>
<b>Conclusion : .....</b>	<b>38</b>
<b>Chapitre 4: Simulation des performances et comparaisons.....</b>	<b>39</b>
<b>Introduction : .....</b>	<b>40</b>
<b>1. Résultats de simulation de performances de l'algorithme LMS appliqué dans le massive MIMO :.....</b>	<b>40</b>
1.1. Avec différents nombres d'antennes au niveau de la réception ( $M=2,6,\dots,200$ ) : .....	40
1.2. Avec différents nombres de trajet ( $T_h=1, 2, \dots, 20$ ) :.....	43
1.3. Avec différentes pas d'adaptation ( $\mu=0.02, 0.001, \dots, 0.00002$ ) : .....	46
1.4. Avec différentes fréquences porteuses ( $F_c=5 \text{ GHz}, \dots, 60 \text{ GHz}$ ) : .....	47
<b>Conclusion : .....</b>	<b>49</b>
<b>Conclusion générale et perspectives .....</b>	<b>51</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>53</b>

## Liste des figures

Figure 1: Principe de fonctionnement d'un algorithme basé sur une méthode adaptative. (2) .....	5
Figure 2: Classification des algorithmes adaptatifs (1).....	6
Figure 3: Diagramme block filtrage adaptatif LMS (5) .....	8
Figure 4: Systeme de fitrage RIS adaptatif (6) .....	9
Figure 5: Critère de réseau adaptive MMSE (7) .....	10
Figure 6: Types d'antennes intelligentes (1). .....	11
Figure 7: La différence entre la technologie standard (traditionnelle) et la technologie antennes intelligentes (8).....	12
Figure 8: Schéma blocs d'une chaine de communication numérique sans fil (15).....	16
Figure 9: Répartition des ondes centimétriques et millimétriques sur le spectre électromagnétique (17) (16).....	17
Figure 10: Représentation temps-fréquence d'un signal OFDM (25) .....	19
Figure 11: Système émetteur-récepteur OFDM (27) .....	20
Figure 12: Principe d'évitement de l'interférence inter-symbole par préfixe cyclique (27).....	21
Figure 13: Système émetteur-récepteur GFDM (27) .....	22
Figure 14: Système émetteur-récepteur FBMC (30).....	23
Figure 15 : système émetteur-récepteur UFMC (26) (29).....	24
Figure 16: Schéma bloc d'une chaine de communication à base de massive MIMO (32).....	24
Figure 17: Schémas du MIMO et ses cas dégénérés (35) .....	26
Figure 18: Le réseau linéaire uniforme sélectionner (ULA) (36). .....	30
Figure 19: Les deux types de formation de faisceau : a) formation de faisceau adaptatif.....	31
Figure 20: L'algorithme de formation de faisceaux Delay and Sum (DAS) (40).....	32
Figure 21: Association d'un algorithme conventionnel dans le massive MIMO en cas de la liaison montante (41). .....	33
Figure 22: Association d'un algorithme conventionnel dans le massive MIMO en cas de la liaison descendante (41).....	34
Figure 23: Association d'un algorithme adaptatif dans le massive MIMO en cas de la liaison montante (41). .....	35
Figure 24: Association d'un algorithme adaptatif dans le massive MIMO en cas de la liaison descendante (41).....	37
Figure 25: Résultats avec M=3.....	40
Figure 26 : Résultats avec M=6.....	41
Figure 27: Résultats avec M=60.....	42
Figure 28: Résultats pour M=100.....	42
Figure 29: Résultats avec M= 200.....	43

---

Figure 30: Résultats avec $Th=1$ .....	44
Figure 31: Résultats avec $Th=2$ .....	44
Figure 32: Résultats avec $Th = 5, 10$ et $20$ .....	45
Figure 33: Résultats avec $\mu= 0.02$ .....	46
Figure 34: Résultats pour $\mu= 0.001$ .....	46
Figure 35 : Résultats pour $\mu = 0.0001$ .....	47
Figure 36: Résultats avec $\mu = 0.00002$ .....	47
Figure 37 : Résultats pour $F_c = 5 GHz, 30 GHz$ et $60 GHz$ .....	48

## Liste des tableaux

Tableau 1: Générations antérieures de la télécommunication sans fil [11] [10] [13]. .....	16
Tableau 2: Topologie 1D du réseau d'antennes utilisées [39] .....	26
Tableau 3: Topologies 2D du réseau d'antennes utilisées [40].....	27
Tableau 4: Topologie 3D du réseau d'antennes utilisées [40] .....	28

## **Abréviations**

<b>5G</b>	<b>5<sup>ème</sup> Génération</b>
<b>IFFT</b>	<b>Inverse Fast Fourier Transform</b>
<b>FFT</b>	<b>Fast Fourier Transform</b>
<b>ML</b>	<b>Maximum Likelihood</b>
<b>MMSE</b>	<b>Minimum Mean Square Error</b>
<b>OFDM</b>	<b>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</b>
<b>GFDM</b>	<b>Generalized Frequency Division Multiplexing</b>
<b>FBMC</b>	<b>Filter Bank Multicarrier</b>
<b>UFMC</b>	<b>Universal Filtered Multi Carrier</b>
<b>PSK</b>	<b>Phase Shift Keying</b>
<b>QAM</b>	<b>Quadrature Amplitude Modulation</b>
<b>RF</b>	<b>Radio Frequency</b>
<b>AMPS</b>	<b>Advanced Mobile Phone System</b>
<b>TACS</b>	<b>Total Access Communication System</b>
<b>EDGE</b>	<b>Enhanced Data rates for GSM Evolution</b>
<b>GPRS</b>	<b>General Packet Radio Service</b>
<b>UMTS</b>	<b>Universal Mobile Telecommunication System</b>
<b>LTE</b>	<b>Longue Term Evolution</b>
<b>LTE-A</b>	<b>Longue Term Evolution-Advanced</b>
<b>TDMA</b>	<b>Time Division Multiple Access</b>
<b>FDMA</b>	<b>Frequency Division Multiple Access</b>
<b>CDMA</b>	<b>Code Division Multiple Access</b>
<b>WIMAX</b>	<b>Worldwide Interoperability for Microwave Access</b>
<b>ISI</b>	<b>Interference Inter Symbol</b>
<b>ICI</b>	<b>Interference Inter-Carriers</b>
<b>OoB</b>	<b>Out-of-Band</b>
<b>LMS</b>	<b>Least Mean Square</b>
<b>RLS</b>	<b>Recursive Least Squares</b>
<b>SMI</b>	<b>Simple Matrix Inversion</b>
<b>DAS</b>	<b>Delay And Sum</b>
<b>MIMO</b>	<b>Multiple Input Multiple Output</b>
<b>MISO</b>	<b>Multiple Input Single Output</b>

<b>SIMO</b>	<b>S</b> ingle <b>I</b> nter <b>M</b> ultiple <b>O</b> utput
<b>SISO</b>	<b>S</b> ingle <b>I</b> nter <b>S</b> ingle <b>O</b> utput
<b>AWGN</b>	<b>A</b> dditive <b>W</b> hite <b>G</b> aussian <b>N</b> oise
<b>BS</b>	<b>B</b> ase <b>S</b> tation
<b>SNR</b>	<b>S</b> ignal <b>N</b> oise <b>R</b> apport
<b>CSI</b>	<b>C</b> anal <b>S</b> tate <b>I</b> nformation
<b>CAN</b>	<b>C</b> onversion <b>A</b> nalogique <b>N</b> umérique
<b>CP</b>	<b>C</b> yclique <b>P</b> réfixe
<b>DoA</b>	<b>D</b> irection of <b>A</b> rrival

---

# **Introduction Générale**

---

## **Introduction générale**

Au cours des dernières décennies, les réseaux de communications mobiles sont devenus un élément clé de l'avancement mondial des technologies de l'information. En effet, la notion de connectivité ainsi que nos méthodes de communication ont été complètement transformées grâce aux réseaux cellulaires. Le développement de ces réseaux s'effectue selon un rythme rapide d'innovation technologique et scientifique organisé en générations successives.

Parmi les objectifs les plus cruciaux de la 5G, sont de permettre le passage de l'industrie et des services à une économie numérique et de résoudre les problèmes de saturation de la 4G urbaine. Elle s'appuie sur plusieurs avancées technologiques importantes qui lui permettent d'augmenter les débits de transfert d'information, d'améliorer la connectivité et de réduire la latence (le retard dans la transmission des données) à des valeurs de l'ordre de millisecondes. Parmi ces avancées importantes, l'énorme système MIMO et la technologie de formation de faisceaux ont notre attention.

En contrepartie, la technologie des antennes intelligentes a permis d'améliorer considérablement les performances et l'économie du système sans fil, à travers la création d'un diagramme de rayonnement modifiable dynamiquement par des algorithmes sophistiqués de traitement numérique des signaux, dites algorithmes conventionnels et adaptatifs, afin d'orienter le lobe principal vers la direction du signal utile et l'annuler dans les autres directions considérées indésirables.

Dans ce projet de fin d'étude, nous nous intéressons à l'étude comparative de l'application des algorithmes conventionnels et adaptatifs à une chaîne de communication 5G à base de Massive MIMO, avec simulation démonstrative de cette opération sur Matlab.

Pour ce faire, notre mémoire est organisé en quatre (04) chapitres comme suit :

**Le chapitre 1 :** comprend l'étude des divers algorithmes conventionnels et adaptatifs, ainsi qu'une introduction aux concepts liés au système d'antennes intelligentes.

**Le chapitre 2 :** donne une brève histoire de l'évolution des technologies communications mobiles, explique les notions de base d'une chaîne de communications numériques sans fil, le principe de base d'une chaîne de communication 5G et ses caractéristiques, notamment celle à base de MIMO massive.

**Le chapitre 3 :** présente une étude théorique sur l'association des algorithmes conventionnels et adaptatifs dans les massives MIMO, suivie d'une modélisation du système massive MIMO basé sur les algorithmes conventionnels et adaptatifs.

**Le chapitre 4 :** présente les résultats et les conclusions tirées de la simulation, sur Matlab, de l'association d'algorithmes conventionnels et adaptatifs à une chaîne de communication à base de massive MIMO.

Enfin, une conclusion générale est tirée, mettant en exergue une synthèse des principaux résultats de l'étude réalisée et une liste de perspectives de recherche est dressée pour continuer ce travail.

# Chapitre 1

---

## Algorithmes conventionnels et adaptatifs

---

**Introduction :**

Les algorithmes sont généralement considérés comme un mécanisme nécessaire au fonctionnement de la technologie des télécommunications, en particulier la technologie massive MIMO. Cette technologie repose sur de Grand nombre antennes pour doubler la quantité et la capacité de données transmises et sa qualité.

Cependant, ce nombre d'antennes peut rendre la connectivité plus complexe et difficile. Donc, choisir les bons algorithmes est une étape importante et nécessaire du fait que la vitesse de convergence est liée à ce choix ainsi que l'intégration des appareils.

Par conséquent, des algorithmes sophistiqués sont nécessaires pour traiter les signaux reçus par l'antenne et extraire les informations utiles. Les algorithmes peuvent également aider à résoudre les problèmes de congestion et d'interférence du réseau. Par exemple, des algorithmes de détection précis peuvent être utilisés pour détecter des erreurs de signal dans des conditions de bruit élevé.

Les algorithmes de précodage peuvent également être utilisés pour résoudre les problèmes de congestion du réseau. Ces algorithmes optimisent la distribution spatiale des transmissions pour minimiser les interférences et améliorer le spectre de communication.

Lors de la réception d'un signal, la formation de faisceau est utilisée pour augmenter le gain dans la direction du signal utile et diminuer le gain dans la direction des interférences et du bruit. H. Recevoir des informations de différentes antennes et les combiner afin que le signal soit préférentiellement observé. (1)

**1. Les algorithmes conventionnels :**

Un algorithme conventionnel est un algorithme qui utilise une méthode définie pour résoudre un problème spécifique. Lorsqu'il s'agit de manipulation d'antenne, les algorithmes conventionnels sont des outils importants pour améliorer les performances de l'antenne.

Les algorithmes de formation de faisceaux d'antenne sont un exemple d'algorithmes conventionnels. Ces algorithmes sont utilisés pour diriger la puissance du signal radio de l'antenne vers un récepteur spécifique. Le placement de l'antenne peut être optimisé pour maximiser la qualité de transmission, réduire les interférences et étendre la couverture. Les algorithmes de traitement du signal sont également des algorithmes conventionnels importants utilisés pour améliorer le fonctionnement des antennes. Cela comprend le filtrage, la correction d'erreurs et les techniques de modulation pour améliorer la qualité de transmission. Ces techniques peuvent également être utilisées pour réduire la perte de signal et améliorer la stabilité des communications.

Des algorithmes conventionnels peuvent être utilisés dans le cadre du Massive MIMO pour obtenir la meilleure coopération possible entre les antennes. Des algorithmes de traitement du signal tels que la décomposition en valeurs singulières et le précodage peuvent être utilisés pour améliorer la qualité de transmission et minimiser les interférences entre les antennes.

## 2. Les algorithmes adaptatifs :

Les algorithmes adaptatifs sont des algorithmes qui peuvent s'adapter aux changements inattendus de l'environnement. En ce qui concerne les opérations d'antenne, les algorithmes adaptatifs sont des outils utiles pour obtenir des performances d'antenne optimales.

En particulier, les algorithmes adaptatifs aident à résoudre des problèmes tels que les interférences de canal et les interférences dans les environnements de communication sans fil. Des algorithmes adaptatifs peuvent également être utilisés pour optimiser la répartition spatiale des antennes et ajuster la puissance d'émission en fonction du signal reçu.

Ces algorithmes peuvent également être utilisés pour ajuster le retard du signal afin d'améliorer la qualité de transmission. Dans le cadre du Massive MIMO, les algorithmes adaptatifs sont indispensables pour gérer la complexité des communications multi-antennes, ces algorithmes aident à résoudre les problèmes d'interférence entre les antennes, à compenser la distorsion du canal et à ajuster le gain et la phase de l'antenne en temps réel.

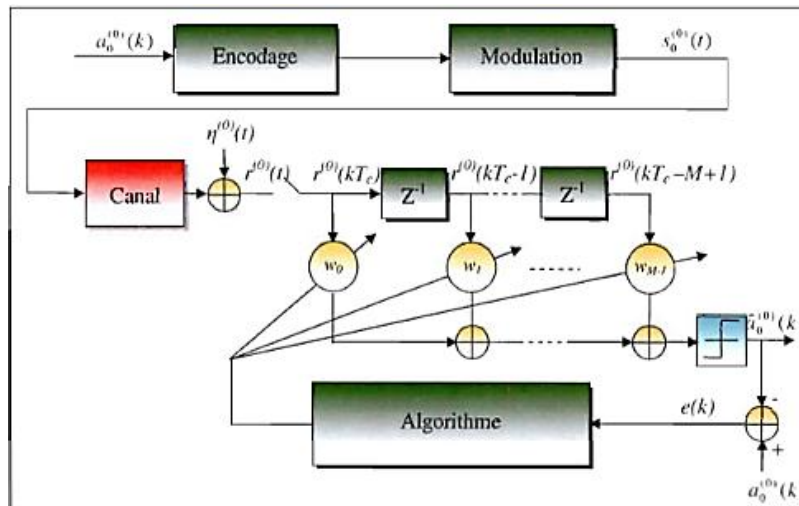


Figure 1: Principe de fonctionnement d'un algorithme basé sur une méthode adaptative. (2)

Nous utilisons dans ces systèmes deux types de base d'algorithmes adaptatifs que nous pouvons utiliser dans le MIMO massif système et les antennes en fonction des besoins spécifiques :

- Algorithmes adaptatifs aveugles ;
- Algorithmes adaptatifs non aveugles.

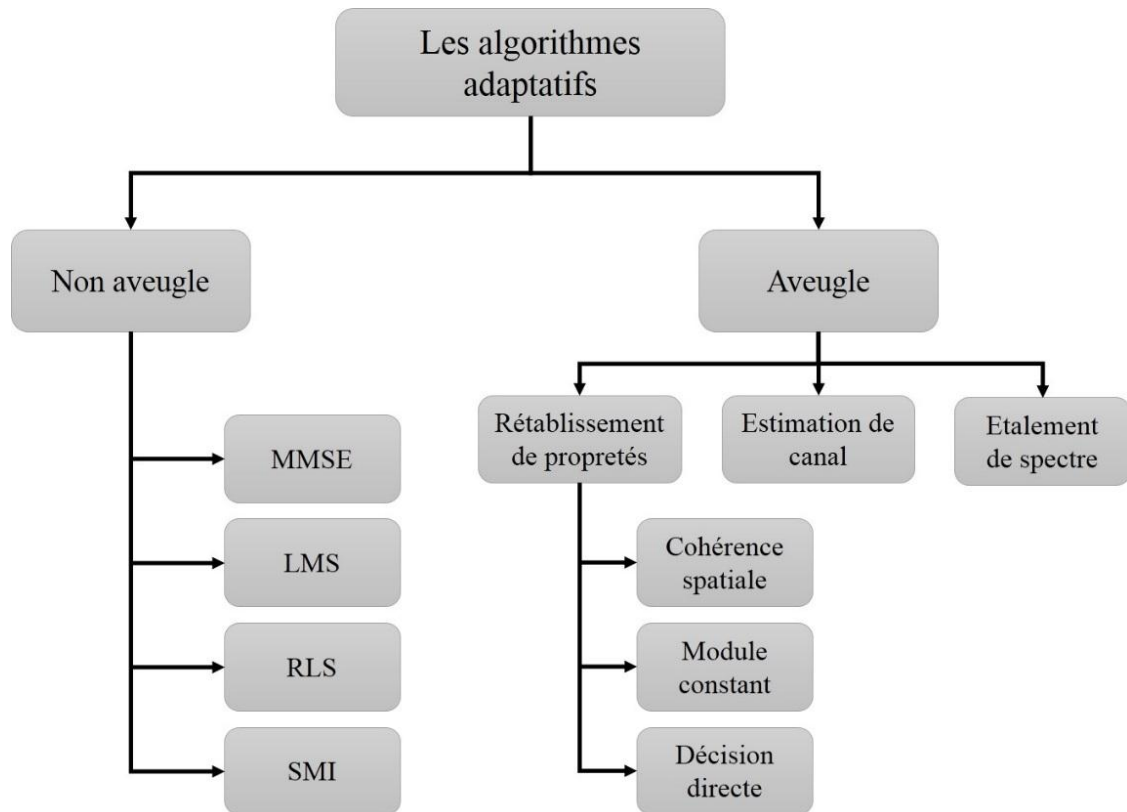


Figure 2: Classification des algorithmes adaptatifs (1).

### 2.1. Algorithmes adaptatifs aveugles :

Sont des techniques de traitement du signal utilisées dans les systèmes de communication sans fil avancés. Le MIMO massif est une technologie qui exploite un grand nombre d'antennes à la fois au niveau de la station de base (BS) et des terminaux utilisateurs (UE) pour améliorer les performances du réseau.

Nous les utilisons lorsqu'il n'y a pas d'information sur le canal de transmission ou lorsqu'il est impossible d'estimer (1), car ils n'exigent pas d'informations de canal précises pour effectuer le traitement du signal. Au lieu de cela, ils utilisent des techniques statistiques et des méthodes d'apprentissage automatique pour extraire des informations utiles à partir des signaux reçus.

Voici le rôle des algorithmes pour déterminer automatiquement le rôle du canal sans connaître la référence au signal original. Par exemple, des techniques d'adaptation à l'aveugle comme l'analyse d'association de canon (CCA) est utilisée pour compenser le dysfonctionnement dans le canal de diffusion. En général, il est divisé en 3 rôles :

- Rétablissement de propriétés ;
- Estimation de canal ;
- Étalement de spectre ;

Ces algorithmes permettent d'exploiter les avantages du MIMO massif en augmentant la capacité, la fiabilité et l'efficacité spectrale des systèmes de communication sans fil. Ils sont souvent combinés avec d'autres techniques de traitement du signal et de gestion des interférences pour obtenir de meilleures performances dans des environnements de communication complexes.

## 2.2. Algorithmes adaptatifs non aveugle :

Algorithmes d'adaptation non aveugle sont conçus pour exploiter les informations de canal et ajuster les paramètres de transmission en temps réel pour optimiser les performances du système de MIMO massif. Contrairement aux algorithmes aveugles, qui fonctionnent sans connaître les caractéristiques du canal, les algorithmes adaptatifs utilisent des techniques d'estimation de canal pour obtenir des informations précises sur l'état du canal, ils doivent donc avoir des détails sur le canal de transmission.

Vous pouvez obtenir ces détails en envoyant des signaux pilotes ou en utilisant la méthode de co-travail des techniques de faisceaux pour la détection des signaux (3). Dans ce cas, nous utilisons une référence pour adapter constamment les poids de gamme.

Par la suite, la réponse des poids à la fin de chaque itération est comparée au signal de référence, et le signal d'erreur produit est implémenté pour ajuster les poids dans les algorithmes. Le signal d'erreur est donné par :

$$e(t) = d(t) - w^H x(t) \quad (1)$$

Avec :

- $d(t)$  : est le signal de référence (souhaité).
- $w^H$  : est la matrice des poids transposé conjugué.
- $x(t)$  : est le signal reçu au niveau de l'antenne.

Les techniques d'adaptation non-aveugle incluent l'utilisation de filtres de Wiener, de l'algorithme QR-Décomposition ou de l'algorithme de maximum de vraisemblance pour l'estimation de canal. Ce processus est réalisé selon quatre étapes de base :

- a. L'estimation du canal :** est réalisée à l'aide d'estimation, pilote que a des signaux pilotes sont transmis pour caractériser le canal.
- b. Formation de faisceau :** La formation de faisceau est utilisée pour diriger le faisceau d'antenne vers le récepteur afin d'améliorer la qualité du signal reçu. L'algorithme de formation de faisceau vise à trouver les poids de faisceau optimaux qui maximisent la puissance du signal reçu.
- c. Algorithme de détection de signal :** Une fois que le faisceau est formé, l'algorithme de détection du signal extrait le signal utile des différentes antennes. Différentes techniques de détection, telles que la probabilité maximale de détection (ML) ou la détection linéaire peuvent être utilisées.

**d. Annulation des interférences :** Les systèmes MIMO massifs sont parfois interférés provenant par d'autres utilisateurs ou par les propres signaux de l'expéditeur.

### 2.2.1. Algorithme LMS :

Les algorithmes adaptatifs non aveugles basés sur LMS (*Least Mean Squares*) sont un type connu d'algorithme utilisé pour résoudre les problèmes de détection de canal dans MIMO massif.

Il est approche quadratique basée sur le gradient, le but des moins carrés est de trouver les poids du robinet du filtre optimal qui minimise la différence entre la sortie du système  $y(n)$  et la réponse souhaitée  $d(n)$  ou en d'autres termes pour minimiser la fonction de coût (4).

Ces algorithmes sont utilisés pour s'adapter rapidement aux changements de canaux dans les zones de communication sans fil. Ces algorithmes se composent généralement de deux processus de base :

- Un procédé de filtrage, qui implique : Calcul des rendements linéaires en réponse aux signaux d'entrée Et La comparaison de ce rendement à la réponse souhaitée produit une erreur d'estimation.
- Processus adaptatif, incluant l'ajustement automatique des paramètres du filtre en fonction de l'erreur d'évaluation.

La combinaison de ces deux processus forme une boucle de rétroaction comme suit :

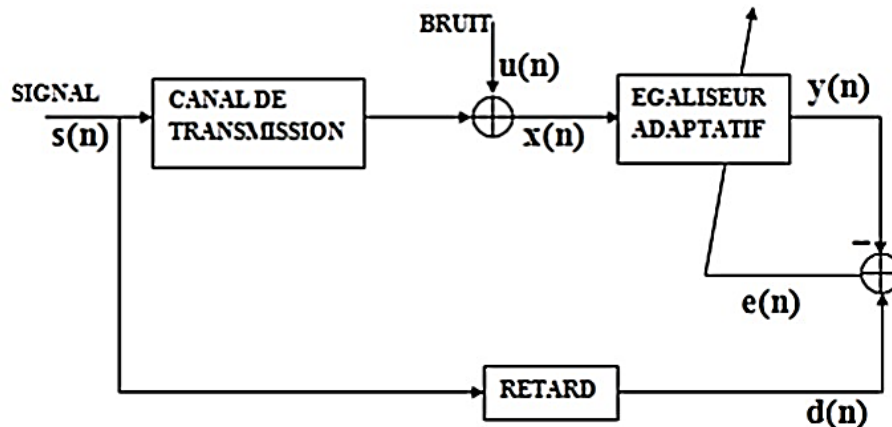


Figure 3: Diagramme block filtrage adaptatif LMS (5)

Calcul de sortie de filtre :

$$y(n) = h^H(n) \cdot x(n) \quad (2)$$

Calcul du signal d'erreur :

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (3)$$

Les deux principales caractéristiques des algorithmes LMS sont leur simplicité et leur manque de complexité en termes de calcul, de mémoire et de capacité à les implémenter en temps réel pour résoudre les problèmes de communication en temps réel.

Mais il est probable que les algorithmes LMS auront des problèmes de stabilisation en cas de mauvaise gestion du canal et de variables de convergence en fonction de l'étape de convergence.

En outre, la convergence peut être lente dans certains scénarios de communication, en particulier lorsque la taille de l'entrée du filtre est trop grande.

### 2.2.2. Algorithme RLS :

L'algorithme RLS (*Recursive Least Squares*) sont un type d'algorithme de traitement du signal numérique que nous trouvons dans les grands systèmes MIMO pour estimer les canaux de propagation et réduire les interférences entre les antennes. La méthode de travail des algorithmes RLS est la recherche de manière récursive les coefficients pour réduire l'erreur quadratique moyenne (EQM) entre le signal reçu et le signal d'entrée.

Il s'adapte aux différences temporelles et spatiales du canal de diffusion en même temps être en mesure de maintenir une haute précision afin d'apprécier le canal avec un petit nombre de répétitions.

Il est amélioré aussi la d'optimiser la formation du faisceau, qui est une étape nécessaire pour améliorer la qualité des performances du système pratiquement, la configuration du faisceau permet de concentrer l'énergie de transport dans le sens des utilisateurs, ce qui réduit l'effet d'interférence, mais c'est très difficile et complexité pour la modélisation informatique.

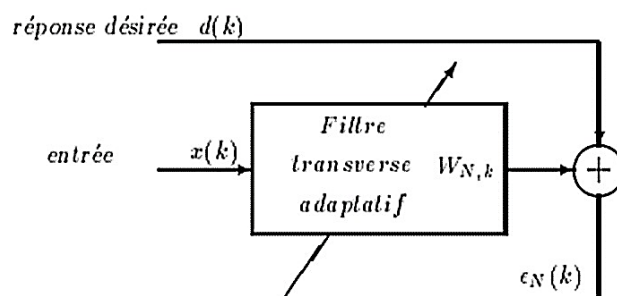


Figure 4: Systeme de filtrage RLS adaptatif (6)

Pour améliorer la qualité de la transmission du signal et réduire les erreurs de détection, le traitement adaptatif du signal est effectué à l'aide de Chacun des deux algorithmes RLS et LMS. Et voici Le problème qui se pose de déterminer quels algorithmes séparent une option à utiliser, cette décision sera influencée par :

- Taux de convergence de l'algorithme ;
- la longueur de la séquence d'apprentissage nécessaire pour obtenir un filtre ;
- le nombre d'opérations nécessaires pour mettre à jour les coefficients à chaque étape dans les opérations.

L'algorithme LMS sont plus simples que les algorithmes RLS et moins complexes et sont plus rapides à exécuter, Parce qu'elles nécessitent moins de calculs à chaque étape que les algorithmes RLS, Mais L'estimation précise des canaux de propagation peut nécessiter plus d'itérations et une convergence plus lente des algorithmes LMS que les techniques RLS, Cela pourrait avoir un effet sur le rendement en temps réel.

Le filtre RLS converge plus rapidement que le filtre LMS, mais à un coût plus élevé par opération. Mais Selon certaines études comparatives, nous avons constaté que l'algorithme RLS est supérieur à la méthode LMS en termes de précision de détection des signaux. Alors que l'algorithme LMS ne tient pas compte des changements de canal et d'interférence, bien que la méthode RLS utilise une matrice de corrélation actualisée en temps réel pour tenir compte des variations du canal.

Alors que les algorithmes LMS sont mieux adaptés aux paramètres avec des canaux de propagation relativement plus stables, les méthodes RLS fonctionnent mieux dans les paramètres avec des canaux de propagation variables. Bien qu'il y ait quelques changements mineurs entre les deux algorithmes, la plupart du temps les résultats des deux algorithmes pourraient être très similaires.

Ces deux algorithmes sont généralement utilisés dans d'énormes systèmes MIMO pour améliorer les estimations des canaux de propagation et réduire le brouillage entre antennes. Les algorithmes RLS sont utilisés pour augmenter la précision des estimations de canaux de propagation tandis que les algorithmes LMS sont fréquemment utilisés pour démarrer la création de faisceau dans les grands systèmes MIMO.

### 2.2.3. Algorithme MMSE :

Les algorithmes adaptatifs non aveugles basés sur MMSE (*Minimum Mean Square Error*) sont un type connu d'algorithme utilisé pour la détection de canal dans MIMO massive, dans le system de MIMO massif, les interférences sont un grand problème, elle peut nuire à la qualité du transfert de données négativement.

Les algorithmes MMSE Réduit cette chevauchements dans les réseaux de communication et améliore la qualité de transmission des données.

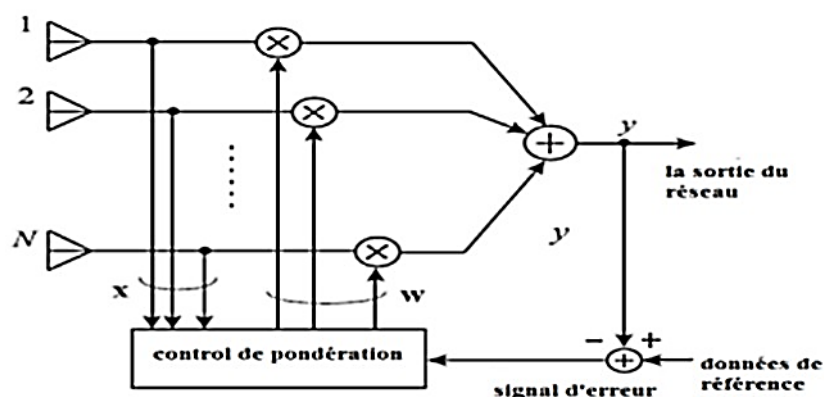


Figure 5: Critère de réseau adaptive MMSE (7)

Leur rôle principal est de réduire les erreurs de transmission de données par des filtres adaptatifs, En éliminant l'effet des signaux indésirables qui affectent les signaux utiles, améliorant ainsi la qualité de la transmission des données. Plus précisément, les algorithmes MMSE permettent de calculer les coefficients d'optimums optimaux pour plusieurs antennes de réception et émises, pour limiter l'erreur quadratique moyenne (MSE) de la transmission des données (2).

### 3. Les antennes intelligentes :

Comme l'utilisation des communications mobiles continue d'augmenter et la demande pour eux, il a été nécessaire de travailler à une meilleure couverture, haute capacité et transport de haute qualité. C'était une inclination que les antennes intelligentes étaient l'une des meilleures façons d'obtenir cela.

Ce système est basé sur un réseau d'antennes et de futurs processeurs adaptatifs qui fonctionne en temps réel et attribue des poids aux éléments pour améliorer le signal de sortie selon de nombreux algorithmes prédéfinis.

L'idée est d'utiliser un réseau d'antennes et de varier les conditions d'excitation pour chaque élément rayonnant en temps réel afin de changer le diagramme de rayonnement et de s'adapter à un environnement changeant (8).

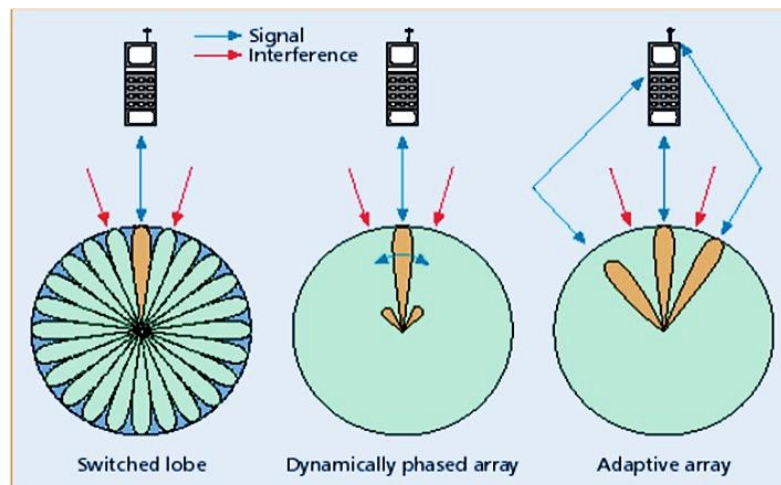


Figure 6: Types d'antennes intelligentes (1).

#### 3.1. La différence entre les antennes traditionnelles et les antennes intelligentes

Les antennes intelligentes peuvent localiser la cible avant d'envoyer le signal, par conséquent elles ne concentrent l'énergie que dans la direction souhaitée.

Cependant, les systèmes d'antennes traditionnels ne sont pas en mesure de localiser l'appareil mobile, ce qui entraîne une transmission de signal très large. En émettant de la puissance dans des directions inutiles, cette transmission augmente le niveau d'interférences.

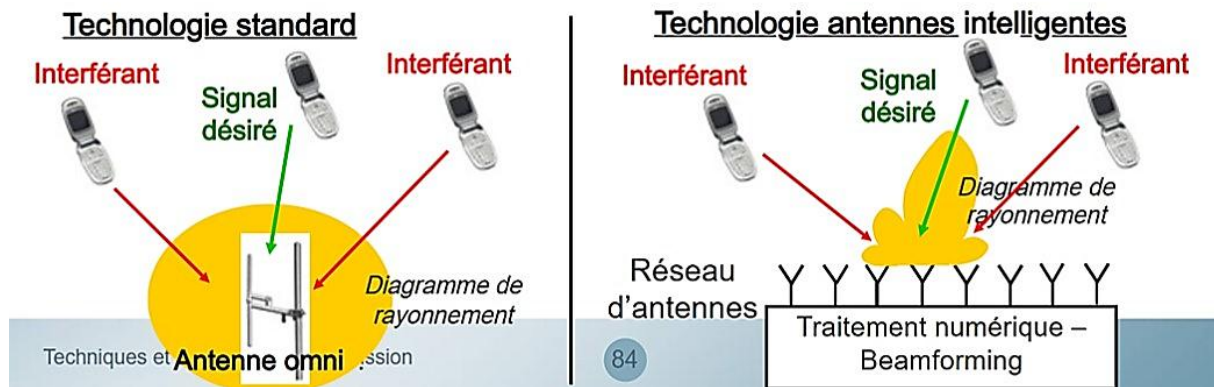


Figure 7: La différence entre la technologie standard (traditionnelle) et la technologie antennes intelligentes (8).

### Conclusion :

Nous utilisons plusieurs algorithmes dans le système massif MIMO pour alimenter des antennes intelligentes telles que : LMS, RLS, MMSE.

Puisque l'utilisation d'un seul type de ces algorithmes ne produira pas les meilleurs résultats, nous voulons comprendre quand utiliser chacun des algorithmes précédents. Et chaque algorithme a des qualités et des défauts uniques qui le distinguent des autres algorithmes, par exemple : L'algorithme MMSE est plus complexe mais peut offrir de meilleures performances en termes de qualité de signal et de débit de données, tandis que l'algorithme RLS est particulièrement adapté aux environnements de canaux à forte variation et à haute densité de données, bien qu'il puisse nécessiter davantage de ressources de calcul. L'algorithme LMS est simple à implémenter mais moins efficace que les autres algorithmes.

Pour résumer, le choix de l'algorithme reposera sur les exigences uniques de chaque système MIMO massif, et il sera important de comparer et de contraster plusieurs algorithmes pour déterminer le quel offre la plus grande performance globale

## **Chapitre 2**

---

# **Principe de base d'une chaîne de communication 5G**

---

**Introduction :**

L'augmentation énorme du nombre des terminaux connectés et l'accroissement considérable dans le volume et le type du trafic d'utilisateurs et de réseaux, ainsi que les limitations en performances des technologies de la 4<sup>ème</sup> Génération (4G), ont motivé les efforts industriels et d'investissement pour définir, développer et déployer des systèmes de 5<sup>ème</sup> génération (5G) pour les réseaux de la téléphonie.

On entend par la « 5G », la 5<sup>ème</sup> génération des technologies de télécommunication sans fils, après les quatre générations qui lui précèdent. La 5G n'a pas venu pour remplacer les technologies précédentes ; elle est plutôt le résultat d'une nouvelle base technologique développée dans le but de satisfaire aux demandes croissantes des clients et de répondre à une variété de besoins, à l'instar à l'augmentation des débits pour usage mobile et la réduction de la latence à des valeurs inférieures à une milliseconde.

A travers ce deuxième chapitre, nous allons rappeler une brève histoire de l'évolution des technologies communications mobiles, ainsi que les notions de base d'une chaîne de communications numériques sans fil, sur la base de laquelle, nous présenterons le principe de base d'une chaîne de communication 5G et ses caractéristiques, telles que les bandes de fréquences, les techniques de modulation et les formes d'ondes utilisées et nous finirons par un aperçu sur la chaîne de communications numériques 5G à base de MIMO massive.

**1. Histoire et évolution des technologies antérieures de communications mobiles :**

La production de la technologie par l'industrie de la téléphonie sans fils, sa révolution et son évolution ont déclenché depuis le début des années 1970. Durant les trois décades passées, les technologies de la téléphonie mobile sans fils ont vécu une succession croissante de cinq générations de technologie, à savoir de la 0G à la 5G.

Tandis que la génération 0 (0G) fait référence aux technologies de la téléphonie mobile qui ont précédé l'émergence de la technologie cellulaire. Ce concept désigne l'emploi d'une grille d'hexagones, appelés cellules, couvrant une région géographique bien spécifiée, dont chaque cellule contient un émetteur radio à basse énergie.

Il a été introduit dans la première génération (1G), lancée en 1980, qui a rendu possible la communication mobile sans fils à grande échelle, avec une vitesse limite n'excédant pas 2.4 Kbps (9) (10).

Au début des années 1990 et avec la deuxième génération (2G), la technologie analogique a été substituée par la communication numérique, ce qui a permis une amélioration significative de la qualité des communications (11) (9). Cela a permis d'offrir, outre les appels vocaux, des services de transfert de données, tels que l'échange des messages textuels (SMS), picturaux et multimédia (MMS), à une vitesse de 64 Kbps (11) (10).

S'agissant des technologies de la 2G, la GSM (*Global System for Mobile communication*) a été introduit pour la première fois en 1991, suivi respectivement par le GPRS (*General Packet Radio*

Service) « 2.5G » et le EDGE (*Enhanced Data rates for GSM Evolution*) « 2.75G » ultérieurement, distinguées par l'utilisation de la commutation des paquets (*packet switching*).

Outre la communication vocale, celle de données a principalement caractérisé la troisième génération (3G), lancée en 2004 sous le nom IMT-2000 (*International Mobile Communication*), en convergeant ainsi à un réseau qui prend en charge la voix et les données à la fois.

La technologie 3G est très flexible en termes de technologies radio du fait qu'elle puisse supporter cinq technologies radio majeures. Ces technologies opèrent sous les trois principaux techniques d'accès multiples à savoir CDMA, TDMA et FDMA, dont l'IMT-DS (direct spread) et l'IMT-MC (multi carrier) utilise CDMA, l'IMT-TC (time code) et IMT-SC (single carrier) opèrent sous TDMA et l'IMT-FC (frequency code) pour FDMA (11).

La 3.5G et la 3.75G sont apparues ultérieurement sous les appellations *High-Speed Downlink Packet Access* (HSDPA) et *High Speed Uplink Packet Access* (HSUPA) respectivement, considérées complémentaires l'un de l'autre. Elles ont permis une évolution des réseaux 3G en matière d'augmentation des vitesses de transfert de données jusqu'à 8 à 10 Mbps (20 Mbps pour certains systèmes) (12).

La quatrième génération (4G), qui a été envisagée par la DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*), ne s'agit qu'une extension de la 3G, avec plus de bande passante et de services offerts (11) (9).

En effet, la principale différence par rapport à la 3G n'est pas seulement l'utilisation de l'OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexed*), mais aussi celle de l'architecture à commutation de circuits, qui a été dépréciée et seul le réseau à commutation de paquets est utilisé. Contrairement à l'architecture 2.5G et 3G qui emploie à la fois de la commutation de circuits et de paquets pour les appels et les services de données respectivement (11) (10).

Ultérieurement, une version avancée de la 4G LTE standard appelée 4.5G (LTE-A) a été envisagée, en utilisant la technologie MIMO (Multi-Input Multi-Output) pour combiner plusieurs émetteurs et récepteurs, permettant ainsi aux plusieurs signaux et plusieurs antennes de fonctionner en même temps. La technologie LTE-A offre des vitesses de plus de 42 Mbps et jusqu'à 90 Mbps (13).

Pour chacune des évolutions susmentionnées, plusieurs défis ont été rencontrés et surmonter à dans la prochaine génération. L'objectif principal escompté derrière tout cela consiste aux exigences d'une bande passante élevée et d'une latence très faible (13).

Génération	1G	2G	3G	4G
période de temps	1970-1980	1990-2004	2004-2010	2010-2019
Techniques d'accès	AMPS, TACS, FDMA	GSM, TDMA, CDMA, GPRS, EDGE	WCDMA, UMTS, CDMA 2000, HSUPA/HSDPA	LTE et LTE-A, OFDMA, SCFDMA, WIMAX
techniques de transmission	commutation de circuit	commutation de circuit	Commutation de circuits/paquets	Commutation de paquets
débit de données	2.4 Kbps	10-384 Kbps	2-20 Mbps	20-100 Mbps
bande de fréquences	150-900 MHz	900-1900 MHz	900-2100 MHz	610-3600 MHz
largeur de bande	Télé analog (30KHz)	25 MHz	25 MHz	100 MHz
application	Utilisé uniquement pour les appels vocaux	les appels vocaux, SMS/MMS, et la Navigation sur le Web limité.	l'accès à la télévision, la vidéo-conférence, les appels vidéo, le service de messagerie multimédia (MMS),	Voix, Données, Appels vidéo HD Télévision, et les jeux en ligne.

Tableau 1: Générations antérieures de la télécommunication sans fil (11) (10) (13).

## 2. Rappel sur la chaîne de communication numérique sans fil :

Le but général du système de communication numérique est de transmettre les messages (ou les séquences de symboles) qui provient d'une source vers une destination à une vitesse et une précision aussi élevées que possible (14). La Figure montre les éléments fonctionnels d'un système de communication numérique sans fil.

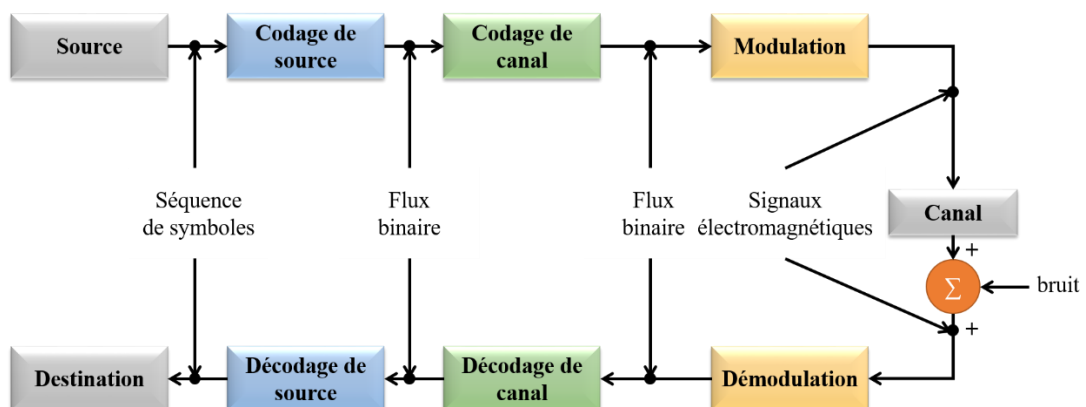


Figure 8: Schéma blocs d'une chaîne de communication numérique sans fil (15).

La source et la destination sont physiquement séparées dans l'espace, et reliées par un canal de communication qui est l'air libre dans le cas d'une communication sans fil. Le canal accepte les signaux, dans notre cas électromagnétiques, et la sortie du canal est généralement une version brouillée ou/et déformée de l'entrée en raison de la nature non idéale du canal de communication.

En plus de la distorsion, le signal porteur d'information est également altéré par des signaux électriques imprévisibles (bruit) à la fois de cause humaine et naturelle. La distorsion et le bruit introduisent des erreurs dans l'information transmise et limitent la vitesse à laquelle l'information peut être communiquée de la source à la destination. La probabilité de décoder incorrectement un symbole de message au récepteur est souvent utilisée comme mesure des performances des systèmes de communication numérique.

La fonction principale du codeur, du modulateur, du démodulateur et du décodeur est de combattre les effets dégradants du canal sur le signal et de maximiser la vitesse et la précision de l'information.

### 3. Bandes de fréquences utilisées dans la 5G :

D'une manière générale, la bande de fréquence utilisée dans le domaine de communication cellulaire est celle inférieure à 6 GHz, tandis que les fréquences supérieures sont exploitées dans d'autres applications.

A travers les générations successives, le trafic de données a vécu une augmentation massive de plus en plus, induisant ainsi à une congestion du spectre des fréquences radio. Le résultat de cette congestion est traduit, du point de vue utilisateur, à travers la limitation de la bande passante de communication, clairement manifestée par la lenteur et la non-fiabilité de connexion.

Pour résoudre ce problème, l'une des solutions est l'exploitation, non seulement, du spectre traditionnel inférieur à 6 GHz, mais aussi recourir à l'utilisation du spectre faiblement utilisé supérieur à 6 GHz, à l'instar des ondes centimétriques et millimétriques (16) (17).

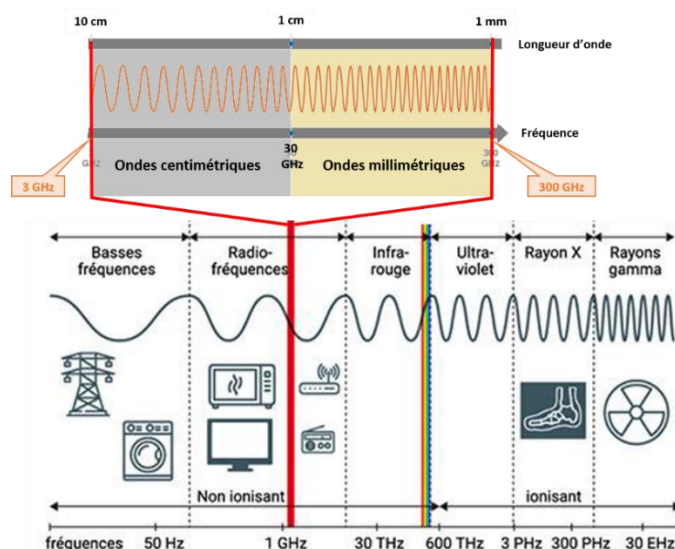


Figure 9: Répartition des ondes centimétriques et millimétriques sur le spectre électromagnétique (17) (16)

#### 3.1. Ondes centimétriques :

Comme leur désignation l'indique, elles consistent en les ondes électromagnétiques ayant une longueur d'onde de l'ordre de centimètre (1 cm à 10 cm). Autrement dit, c'est la bande de fréquence s'étendant de 3 GHz à 30 GHz (18).

La bande de fréquences des ondes centimétriques (connue également sous *Super High Frequency (SHF)* (19) ), offre la possibilité de construire des antennes très directionnelles à gain élevé, qui peuvent produire des faisceaux étroits, vu que les longueurs d'onde correspondantes sont assez petites par rapport aux dimensions de l'antenne, ce qui favorise la communication point-à-point (20).

Ces ondes présentent un compromis entre la directionnalité et la distance maximale de propagation, du fait qu'il s'agit d'une part, de la bande de fréquences la plus basse où les ondes radio peuvent être dirigées en faisceaux étroits par des antennes de taille appropriée, afin d'éviter l'interférence entre les émetteurs à proximité sur la même fréquence, et d'autre part, de celle des fréquences les plus élevées susceptibles d'être utilisées pour les communications terrestres à longue distance (20).

### **3.2. Ondes millimétriques :**

On désigne par les ondes millimétriques (*Milimeter Waves*) la bande de fréquence extrêmement élevée, comprise entre 30 et 300 GHz, se distinguant par une large bande passante. Elles sont appelées ainsi du fait que la longueur d'onde est de 1 à 10 mm. Par rapport aux autres techniques de communication sans fil existantes, les communications en ondes millimétriques présentent, outre une large bande passante, une multitude d'avantages, notamment un faisceau étroit, une qualité de transmission élevée et une forte capacité à la détection (21).

En dépit des potentialités dont disposent les ondes millimétriques, certains défis techniques se présentent pour son utilisation, à l'instar de l'affaiblissement de propagation important dû à sa longueur d'onde, les pertes lors de la pénétration des milieux et la consommation élevée d'énergie, ...etc (22) (16).

## **4. Techniques de modulation utilisées dans la 5G :**

La modulation numérique est l'une des composantes élémentaires de la chaîne de communication numérique. Ce module joue le rôle d'interface avec le canal de transmission, qui permet de conférer au signal une contenance physique susceptible d'être transmis via le canal. Cette opération consiste à associer à chaque élément ou groupe d'éléments une forme d'onde correspondant selon la loi de modulation utilisée (1).

En littérature, plusieurs classifications des techniques de modulation numérique ont été établies, parmi lesquelles, on note la catégorisation selon le nombre d'ondes porteuses, où ces techniques peuvent être classées en deux classes principales : mono-porteuses et multi-porteuses (23).

Bien entendu qu'il existe plusieurs techniques de modulation, en télécommunication cellulaire, les techniques de modulation PSK (*Phase Shift Keying*) et QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) ainsi que leurs variantes, sont considérées parmi les fameuses techniques utilisées y compris pour la 5G (24).

La modulation est dite M-aire, si les symboles prennent M valeurs possibles, qui est en transmission numérique, formés d'un vecteur de k bit, avec  $M = 2^k$ .

## 5. Formes d'ondes utilisées dans la 5G :

Pour chacune des générations des télécommunications sans fil, la forme d'onde utilisée a constitué toujours l'une des principaux paramètres à déterminer, afin d'optimiser de manière flexible l'utilisation des ressources spectrales existantes.

La 5G ne fait pas l'exception. Avec outre l'exploitation du spectre traditionnel, la tendance de l'utilisation de nouveau spectre sous-exploité, la symbiose de formes d'ondes devrait plus que nécessaire, pour garantir une coexistence sans interférence avec les transmissions existantes et de fournir un isolement spectral amélioré.

Dans cette section, nous allons présenter quatre principales formes d'ondes utilisées en 5G, à savoir l'OFDM, le GFDM, le FBMC et l'UFMC, avec l'explication de leurs principes respectifs.

### 5.1. OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing):

La technologie OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) est bien connue avant par rapport à la 5G. Elle s'agit d'une technique de communication multi-porteuse, qui a été largement adoptée dans nombreux systèmes de communication sans fil, dont le dernier était celui de la 4G LTE et LTE/A (25), grâce à son immunité au phénomène d'évanouissement sélectif et sa capacité pour résister à l'effet des trajets multiples.

Le principe de l'OFDM consiste à diviser la bande passante en un nombre important de transporteurs individuels étroits appelés sous-porteuses. Ces sous-porteuses sont orthogonales parce qu'un symbole transmis sur un sous-porteur peut être démodulé sans interférer avec les sous-porteurs voisins.

En effet, à travers l'OFDM, le canal est subdivisé en cellules selon les axes temporel et fréquentiel, où à chaque cellule on associe une sous-porteuse orthogonale à celle voisine.

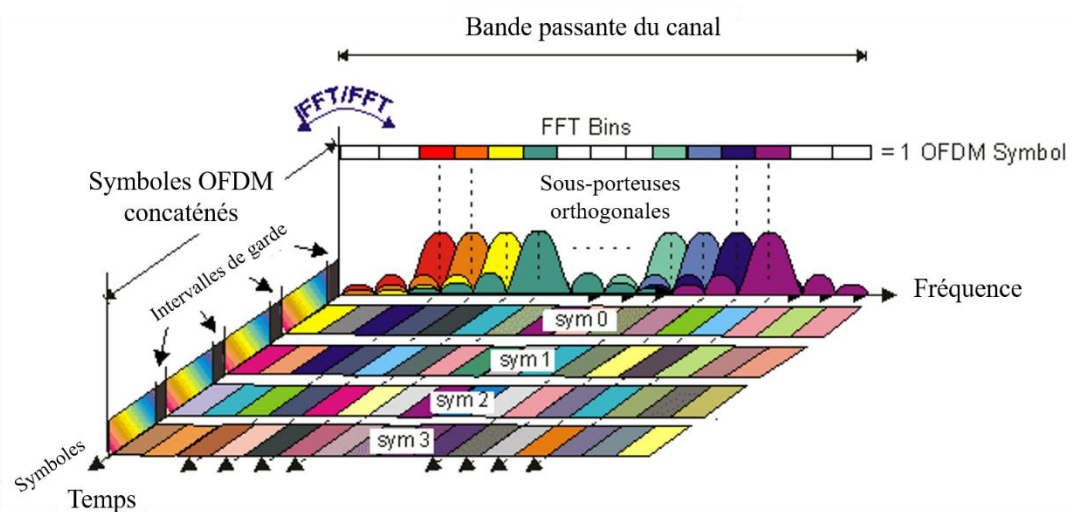


Figure 10: Représentation temps-fréquence d'un signal OFDM (25)

Dans un système émetteur-récepteur OFDM, les symboles en série subissent une modulation par certaine technique de modulation, à l'instar du technique QAM, et ensuite convertis en format parallèle par le module convertisseur Série/Parallèle (S/P), où les bits modulés seraient disposés d'une manière qu'ils seraient alimentés l'entrée du bloc IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*).

A la sortie du bloc IFFT, on obtiendra des signaux modulés et multiplexés en domaine temporel. Par la suite, entre tous deux symboles OFDM voisins, un intervalle de garde est introduit, à l'effet d'éviter carrément les interférences inter-symboles (ISI) et inter-porteuses (ICI). Finalement, la séquence résultante passera par un convertisseur Numérique/Analogique (N/A), en prévision de sa transmission via le canal.

Ainsi, l'opération de réception est l'opération complémentaire de celle d'émission. Le convertisseur Analogique/Numérique échantillonne le signal de sortie, après avoir subi une convolution avec la réponse impulsionnelle du canal et le bruit, avec la suppression des intervalles de gardes représentés par les premiers échantillons. Le reste des échantillons servira comme entré de la FFT (*Fast Fourier Transform*). En sortie, le flux de données est récupéré, après une conversion Parallèle/Série, pour une démodulation correspondante à celle de l'émission (26).

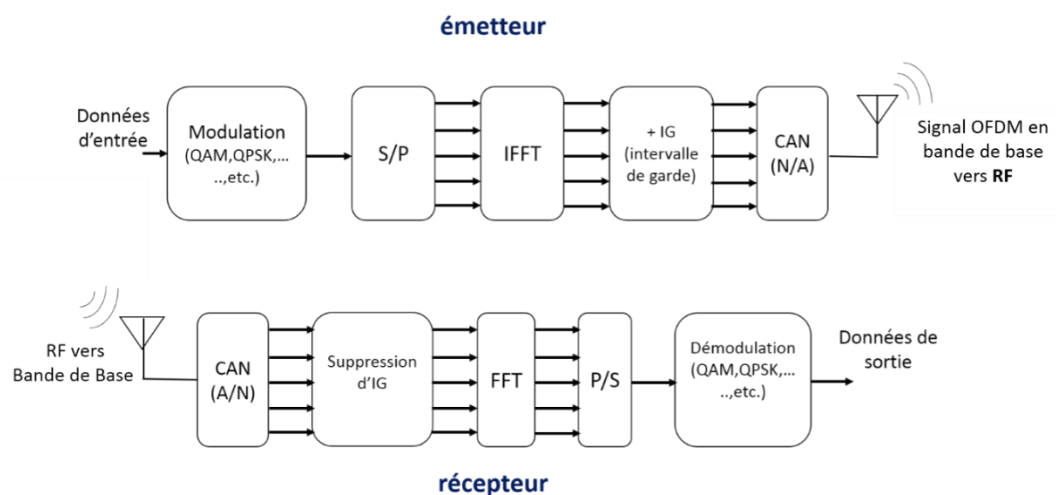


Figure 11: Système émetteur-récepteur OFDM (27)

Une autre façon pour éviter l'interférence inter-symboles a été mise en œuvre à l'aide du préfixe cyclique (CP). Cette technique est utilisée lorsqu'on ne peut pas estimer le retard d'arrivée des symboles, en copiant et collant la queue du signal en avant du signal du symbole. On parle alors au CP-OFDM. Cette opération peut être facilement intégrée dans le système émetteur-récepteur OFDM, par introduction des modules responsables à l'insertion et à l'enlèvement du préfixe cyclique après le bloc IFFT et avant celui du FFT respectivement.

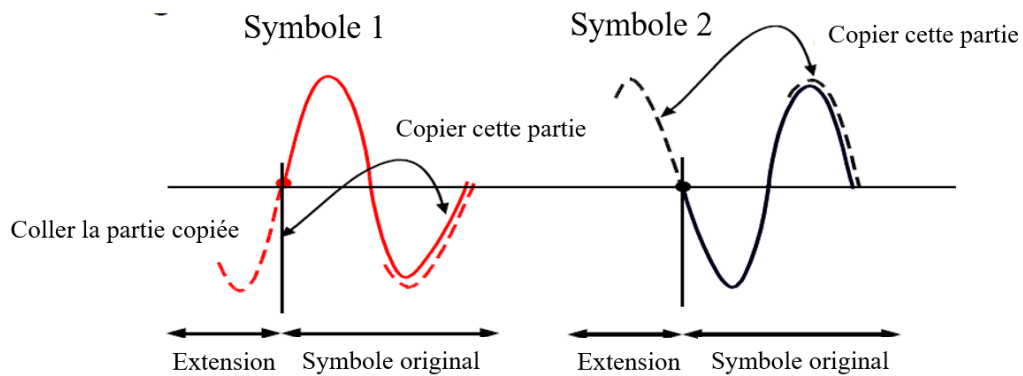


Figure 12: Principe d'évitement de l'interférence inter-symbole par préfixe cyclique (27)

## 5.2. GFDM (Generalized Frequency Division Multiplexing):

L'GFDM (*Generalized Frequency Division Multiplexing*) est une technique de communication multi-porteuse, pouvant générer une forme d'onde non-orthogonale, basée sur le filtrage temps-fréquence des blocs de données. Le bloc de données est composé de  $K$  porteuses et  $M$  intervalles de temps (*time slots*), qui transmettront  $N = KM$  données complexes modulées (27).

Le principe de fonctionnement consiste à moduler chaque sous-porteuses séparément avec certaine technique de modulation. Par la suite, un préfixe cyclique est inséré, dont la longueur est calculée en fonction des longueurs de chacun des filtres de la mise en forme d'impulsion numérique et du récepteur et, ainsi que de la longueur de la réponse impulsionnelle du canal.

Ensuite, pour chaque sous-porteuse, une opération de mise en forme d'impulsion numérique est opérée. Cette opération est la succession de deux sous-opérations, à savoir : le *upsampling* à un facteur  $N$  et le filtrage par un filtre de longueur  $L \leq M$ . Une opération de *upconversion* est appliquée ultérieurement sur chaque sous-porteuse. Toutes les sous-porteuses sont sommées par la suite pour être transmises (28).

La non-orthogonalité du GFDM provient de l'opération de mise en forme d'impulsion par filtre cyclique. Raison pour laquelle, des techniques d'annulation d'interférence inter-porteuses doivent être mise en œuvre (28).

En effet, le GFDM n'utilise qu'un seul préfixe cyclique par symbole, et c'est pourquoi il est plus efficace d'un point de vue spectral que l'OFDM. L'existence du préfixe cyclique (CP) rend possible l'égalisation dans le domaine des fréquences à faible complexité. La mise en forme circulaire des impulsions est utilisée pour chaque sous-porteuse dans le GFDM. Cela réduit considérablement les émissions OOB (Out of Band), ce qui permet d'utiliser le GFDM pour l'attribution fragmentée et opportuniste du spectre. De plus, comme nous le savons, GFDM est un système multi porteuse non orthogonal qui tolère les erreurs de synchronisation temporelle et fréquentielle (29).

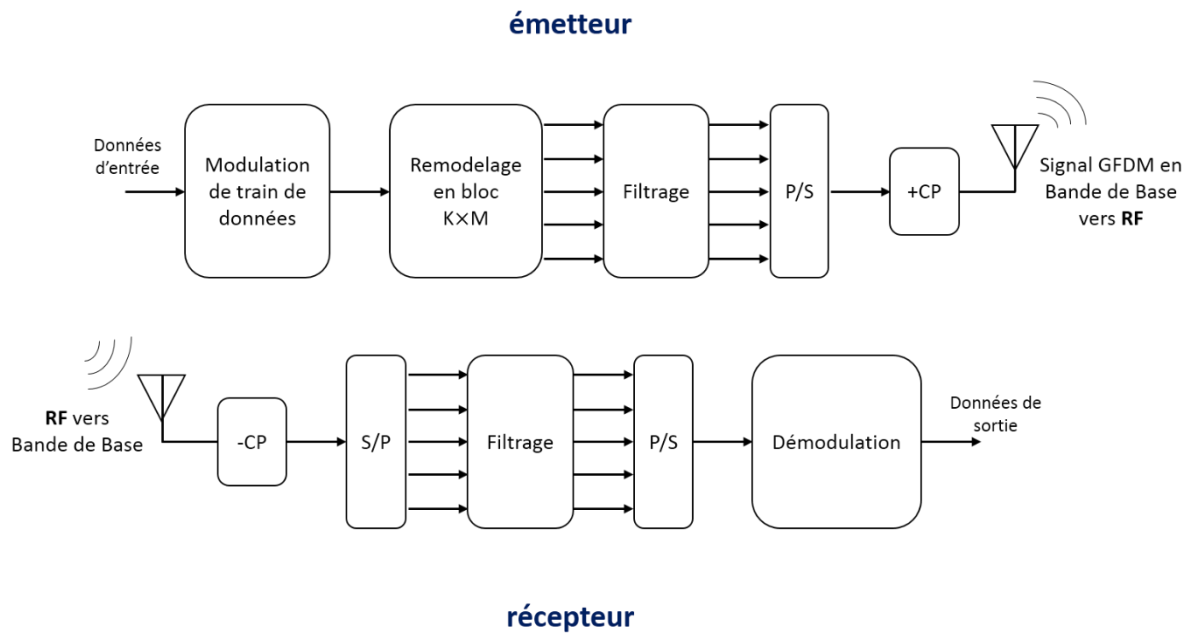


Figure 13: Système émetteur-récepteur GFDM (27)

### 5.3. FBMC (Filter Bank Multicarrier) :

La structure de la chaîne FBMC (*Filter Bank Multicarrier*) diffère de celle de l'OFDM en trois aspects (30). En premier lieu, le mappage OQAM (*Offset QAM*) est utilisé au lieu du QAM, où chaque symbole est divisé en composantes réelle et imaginaire, dont cette dernière est retardée ( $T/2$ ). Les signaux OQAM sont combinés et modulés sur une fréquence sous. Au niveau de la réception, la technique inverse est utilisée. En utilisant le bon filtre, le mappage OQAM servira à la réduction de l'interférence inter-porteuses (ICI).

Par ailleurs, le processus IFFT est suivi par l'application d'un filtre à l'effet d'augmenter la localisation en temps et/ou en fréquence selon la forme et la longueur du prototype du filtre. Cette technique réduira respectivement l'ISI et l'ICI.

Enfin, aucun préfixe cyclique ne sera nécessaire grâce à la localisation temporelle et fréquentielle optimales, assurées par le filtrage et le mappage OQAM.

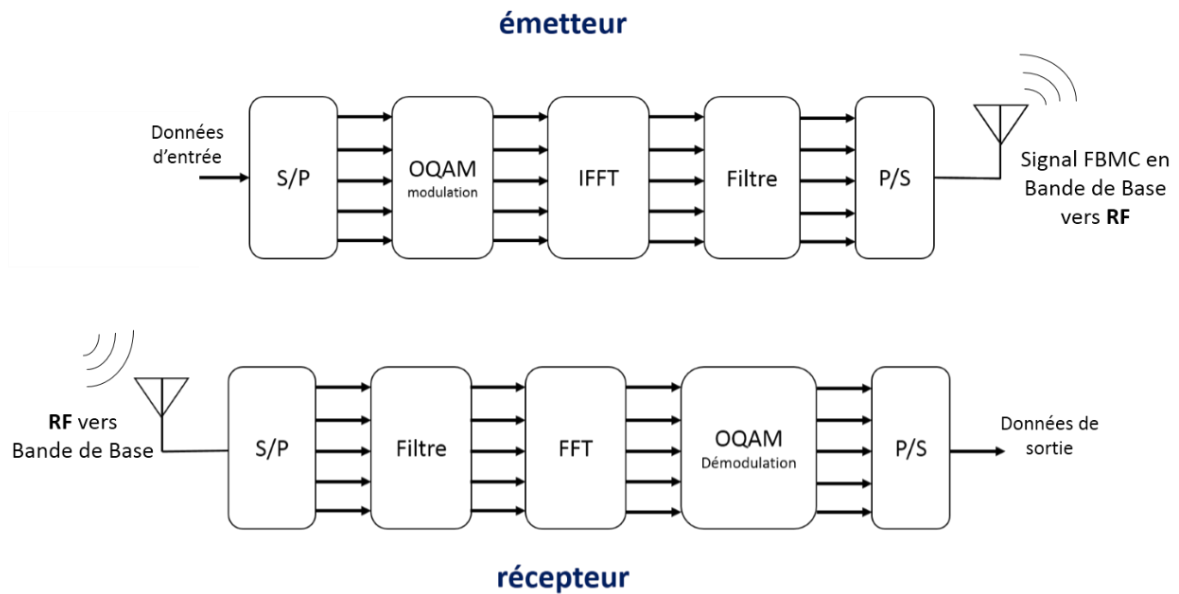


Figure 14: Système émetteur-récepteur FBMC (30)

#### 5.4. UFMC (Universal Filtered Multi Carrier):

La forme d'onde UFMC (*Universal Filtered Multi Carrier*) est un cas général de FBMC. Tandis qu'en FBMC chaque sous-porteuse est filtrée à part, les sous-porteuses sont groupées et ensuite filtrées en UFMC, ce qui permet de réduire la taille du filtre utilisé (31).

Les  $N$  sous-porteuses sont subdivisées en sous-bandes  $B$ , dont le nombre de sous-porteuses dans chaque sous-bande est fixe et ne peut pas être utilisé pour la transmission. Le remplissage zéro est utilisé pour calculer le  $N$ -point IFFT pour les porteuses non allouées. Les réponses des sous-bandes sont additionnées.

Le récepteur utilise une FFT de longueur  $2N$ . Pour démoduler le signal, le récepteur utilise une FFT de point  $2N$ . Une caractéristique clé de l'UFMC est l'utilisation d'une FFT  $2N$ -point dans le récepteur, ce qui permet de récupérer les symboles de données sans avoir besoin de CP (29).

Comme en OFDM, UFMC utilise également l'IFFT sur chaque  $N$ -Point suivie d'un post-filtrage, à l'effet de réduire au mieux les effets Out-of-Band (OoB).

Dans UFMC, le préfixe cyclique (CP) n'est pas requis car les régions de transition sont protégées par l'interférence inter symbole (ISI) (27). Les signaux sont transmis séquentiellement dans le domaine temporel pour produire une orthogonalité dans le domaine fréquentiel. De plus, l'utilisation de sous-groupes dans la forme d'onde UFMC permet une meilleure localisation temporelle.

Le schéma fonctionnel émetteur-récepteur UFMC diffère par rapport à ceux OFDM et FBMC d'une manière qu'elle comporte des filtres d'émission seulement, contrairement aux autres formes d'onde à base de filtres qui utilisent également des filtres de réception.

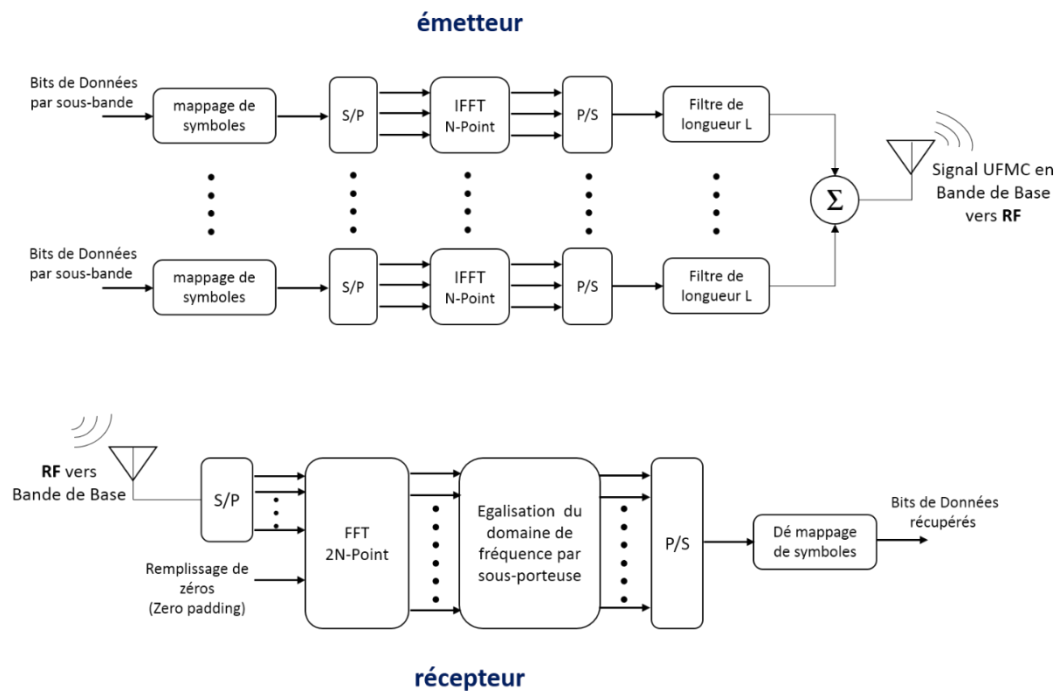


Figure 15 : système émetteur-récepteur UFMC (26) (29).

### 6. Chaîne de communication à base de massive MIMO :

La 5G n'est qu'une évolution des technologies cellulaires antérieures. Elle utilise la même chaîne de communication numérique que lesdites générations, telle que illustrée ci-dessus, avec l'intégration de nouvelles technologies et techniques pour améliorer la performance, la capacité et la flexibilité, à l'instar de la massive MIMO.

Ainsi et en combinant le schéma bloc d'une chaîne de communication numérique sans fils avec celui de la massive MIMO, on obtient le schéma bloc ci-dessous :

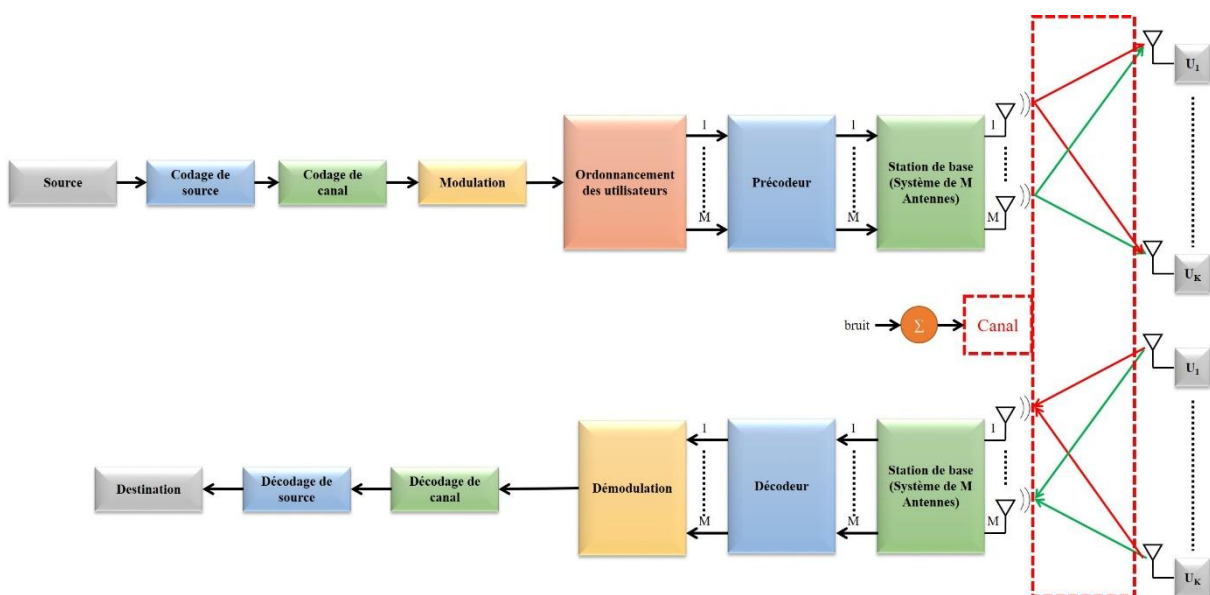


Figure 16: Schéma bloc d'une chaîne de communication à base de massive MIMO (32).

**Blocs intégrant au schéma général de la chaîne de communication numérique :**

- **Codage et Décodage de source :** Le rôle du codeur de source s'agit de compresser les données, avec l'élimination des bits inutiles. Le décodage est l'opération inverse de codage.
- **Codage et Décodage de canal :** le codage de canal a pour but d'introduire de la redondance dans la séquence d'information significative selon une loi de codage, à l'effet de la protéger contre les altérations dues aux interférences lors de l'émission. Pour détecter et corriger les données binaires erronées, le récepteur doit connaître la loi de codage utilisée.
- **Modulation et Démodulation :** à ce stade-là, où les éléments binaires acquièrent un sens matériel, à travers l'attribution d'une forme d'onde spécifique selon une loi bien déterminée. Cette forme matérielle acquise peut être transmise sur le canal de transmission.

**Blocs spécifiques à la technologie massive MIMO :**

- **Précodage et Décodage :** le précodage est une conception de *beamforming* où le système multi-antennes peut supporter la transmission multi-flux (33). Il permet d'effectuer un mappage des flux de données sur le réseau d'antennes selon une matrice de précodage et ce, en se basant sur les CSI (Channel State Information) transmises par les utilisateurs en liaison montante (*Up-Link*).

Il existe plusieurs algorithmes de précodage, à l'instar des précodeurs linéaires (*Zero-Forcing* par exemple) et non-linéaires (*Dirty-Paper-Coding*), le précodage basé sur le rapport de puissance de crête/puissance moyenne (*Peak-to-Average Power Ratio* « PAPR ») et le précodage basé sur l'Apprentissage Automatique (Machine Learning).

L'opération de décodage est presque l'opération inverse de celle de précodage. La seule chose qui s'ajoute est la détection du signal, dont plusieurs algorithmes sont introduits dans ce domaine.

- **Ordonnement des utilisateurs :** Ce bloc fonctionnera lorsque le nombre des utilisateurs soit supérieur à celui des antennes. Il permet d'organiser l'émission du signal qui convient à son utilisateur approprié.

**6.1. MIMO et Massive MIMO :**

La technologie MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) dite « traditionnel » n'est pas nouvelle dans le domaine des télécommunications. Elle a été déjà étudiée en profondeur dans les systèmes 3G et 4G. L'appellation MIMO fait référence à l'utilisation de multiples antennes au niveau de l'émetteur et du récepteur (34). Il est tout à fait naturel de considérer que la capacité augmenterait linéairement avec l'échelle de réseau d'antennes. Cependant, en raison de la complexité et de la taille des antennes, le nombre pratique d'antennes n'a pas dépassé 8, même dans la dernière norme 4G « LTE-A » (35).

Pour mémoire, il existe trois cas dégénérés du MIMO, à savoir *Single-In-Single-Out* (SISO), *Single-In-Multiple-Out* (SIMO) et *Multiple-In-Single-Out* (MISO), qui dépendent de la configuration d'antennes (Figure 17).

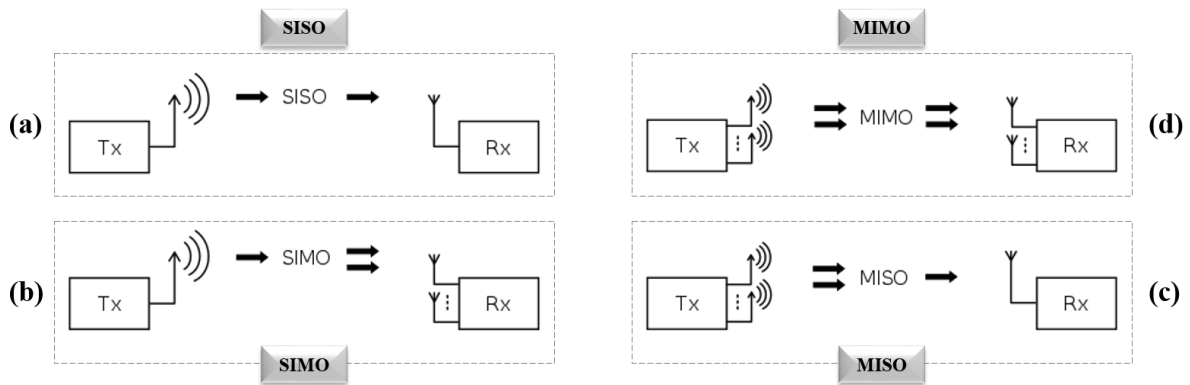


Figure 17: Schémas du MIMO et ses cas dégénérés (35)

En effet, le MIMO est principalement utilisé pour atteindre une efficacité spectrale et énergétique élevée, mais il n'était pas à la hauteur, à cause d'un faible débit et d'une connectivité peu fiable. Pour surmonter ces obstacles, nombreuses technologies MIMO ont été mises en œuvre, comme MIMO Utilisateur Unique (SU-MIMO), MIMO multi-utilisateur (MU-MIMO) et le réseau MIMO. Toutefois, ces nouveaux MIMO ne répondaient toujours pas à la demande des utilisateurs (13).

Avec l'émergence de la 5G, cette technologie a beaucoup évolué, jusqu'à arriver à la technologie MIMO massive. *Massive Multiple-Input Multiple-Output* (Massive MIMO) est la technologie d'accès sans fil la plus passionnante pour répondre aux besoins de la 5G et au-delà. Il s'agit d'un développement de la technologie MIMO, qui utilise des centaines, voire des milliers d'antennes au niveau de la station de base (16).

### 6.2. Topologie du réseau d'antennes utilisées :

Différentes dispositions géométriques du réseau d'antennes ont été proposées pour le massive MIMO, dans le but de réduire l'effet du couplage mutuel entre les éléments du réseau. On peut les catégoriser en unidimensionnelles (1D), bidimensionnelles (2D) et tridimensionnelles (3D).

**Pour la première catégorie**, on trouve le réseau linéaire uniforme (ULA), qui s'agit d'une configuration rectiligne de  $M$  antennes, distant de  $d$  l'une de l'autre. Le tableau ci-dessous illustre la topologie supra-citée avec son vecteur d'orientation :

Topologie 1D	Vecteur d'orientation	Illustration
Réseau linéaire uniforme (ULA)	$\alpha(\theta) = [1 \quad \dots \quad e^{-jk d \sin \theta}]^T$	

Tableau 2: Topologie 1D du réseau d'antennes utilisées (36)

Avec :

- $\theta$  est l'angle d'arrivé (*Angle of Arrival*) ;
- $k = 2\frac{\pi}{\lambda}$  est le numéro d'onde.

S'agissant de la seconde catégorie, plusieurs dispositions existent, dont on cite le réseau rectangulaire uniforme (URA), le réseau circulaire uniforme (UCA) et le réseau étoile (Star). Le tableau ci-dessous illustre certaines topologies parmi celles supra-citées avec leurs vecteurs d'orientation :

Topologie 2D	Vecteur d'orientation	Illustration
réseau rectangulaire uniforme (URA)	$\alpha(\theta, \varphi) = \begin{bmatrix} 1 & \dots & e^{-jkd[(m-1)\sin\theta\cos\varphi+(n-1)\sin\theta\sin\varphi]} \\ \dots & \dots & e^{-jkd[(m-1)\sin\theta\cos\varphi+(n-1)\sin\theta\sin\varphi]} \end{bmatrix}^T$	
réseau circulaire uniforme (UCA)	$\alpha(\theta, \varphi) = \begin{bmatrix} e^{jkR[\sin\theta\sin(\theta-\frac{2\pi}{M})]} & \dots & e^{jkR[\sin\theta\sin(\theta-\theta_m)]} \\ \dots & \dots & e^{jkR[\sin\theta\sin(\theta-2\pi)]} \end{bmatrix}^T$	

Tableau 3: Topologies 2D du réseau d'antennes utilisées (37)

Avec :

- $m$  et  $n$  sont respectivement l'ordre de l'antenne sur les axes  $x$  et  $y$ , dont  $1 \leq m \leq M$  et  $1 \leq n \leq N$ .
- $R$  est le rayon du cercle, sur lequel les antennes sont érigées ;
- $k = 2\frac{\pi}{\lambda}$  est le numéro d'onde ;
- $M$  est le nombre total d'antennes.

En ce qui concerne la dernière catégorie, elle concerne la répartition des antennes sur les trois dimensions de l'espace sous une multitude de manière, à l'instar du réseau conforme (CfA) et le réseau conique (CoA). Le tableau ci-dessous illustre une des topologies supra-citées avec son vecteur d'orientation :



## **Chapitre 3**

---

# **Association des algorithmes conventionnels et adaptatifs dans les massives MIMO**

---

## Introduction :

La formation de faisceau est l'une des pierres angulaires de la mise en œuvre de la 5G à base des systèmes massive MIMO, grâce à son apport considérable pour l'identification et la poursuite de la direction du signal de l'utilisateur ou des utilisateurs. C'est dans cette optique que nous allons mettre en exergue dans ce chapitre, à travers l'association des concepts ayant été abordé aux termes des deux chapitres précédents.

Ainsi, dans ce chapitre nous allons appliquer cette association sur les deux types d'algorithmes conventionnels et adaptatifs, dont un exemple de chaque type a été donné, en faisant une modélisation des systèmes massive MIMO à employer vis-à-vis les caractéristiques des algorithmes utilisés

## 1. Modélisation du système massive MIMO associé aux algorithmes conventionnels et adaptatifs :

Dans notre étude, nous allons opter pour une configuration du réseau d'antennes linéaire uniforme, tel qu'illustré dans la figure ci-dessous, et l'OFDM comme une forme d'onde requise.

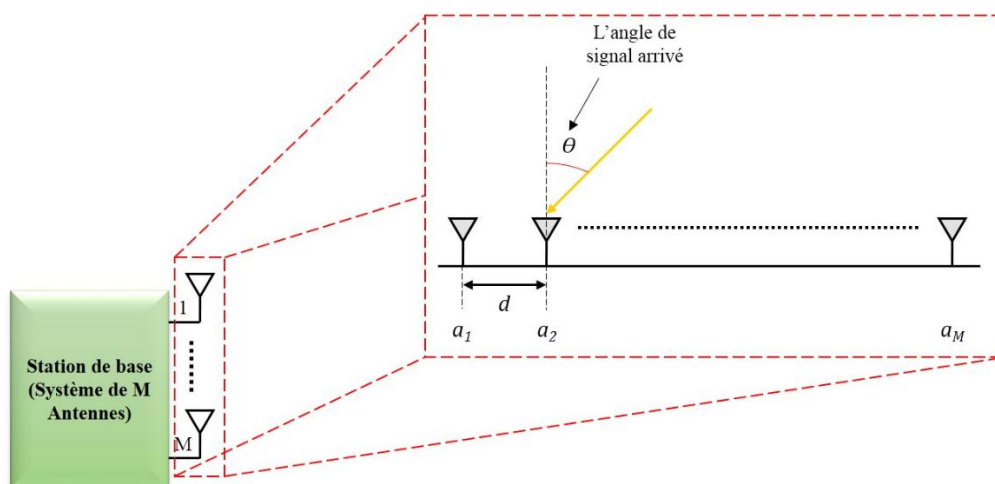


Figure 18: Le réseau linéaire uniforme sélectionner (ULA) (36).

Pour faire un bon usage de la technologie massive MIMO, nous nous appuyons sur une autre technologie 5G, la technologie de formation de faisceaux, qui peut être divisée en deux catégories :

### 1.1. La formation de faisceaux adaptatifs :

Elle est une technique utilisée pour traiter les signaux et les systèmes de communication afin d'améliorer la réception et la transmission des signaux en présence d'interférences, de bruit ou de propagation à voies multiples. Ajuster les caractéristiques de la matrice d'antenne pour concentrer l'énergie transmise ou reçue dans la direction souhaitée tout en supprimant les signaux indésirables provenant d'autres directions. Les points les plus importants qui peuvent être mentionnés au sujet de cette technique comprennent :

- **Réseau d'antennes :** La formation adaptative dépend d'une gamme d'éléments d'antennes. Ces éléments sont généralement rapprochés et fonctionnent de manière cohérente pour former un faisceau comme nous le voyons dans l'énorme MIMO.
- **Poids de formation de faisceaux :** Le poids complexe de chaque élément d'antenne est défini, ce qui détermine sa contribution à la configuration globale du paquet. Les poids sont ajustés dynamiquement en fonction des caractéristiques du signal reçu.
- **Traitement des signaux :** Les signaux des éléments d'antenne sont combinés à l'aide de faisceaux formant des poids pour créer un faisceau composite. Ce traitement peut être effectué en mode analogique ou numérique.
- **Algorithme adaptatif :** Un algorithme adaptatif est utilisé pour ajuster les poids de formation des paquets en fonction des signaux reçus. L'algorithme estime la direction de l'arrivée et du brouillage du signal requis, en mettant à jour les poids pour diriger le faisceau principal vers le signal désiré et atterrir vers les sources qui se chevauchent.

### 1.2. Le formateur de faisceaux conventionnel (commuté) :

Comme la méthode du délai et de la somme, est utilisé. Contrairement à la méthode de formation de faisceau adaptative, ils utilisent un ensemble fixe de poids et de délais (ou gradients) pour intégrer les signaux de la matrice d'antenne. Après le processus d'intégration des signaux de réception, l'angle de réception est déterminé, sur la base duquel un paquet est formé orienté vers l'utilisateur cible.

La différence entre la formation de faisceaux adaptatifs et la formation de faisceaux conventionnelle (commuté) est illustrée à la figure ci-dessous, où l'antenne à faisceau converti fournit de nombreux faisceaux étroits prédéfinis et active immédiatement un ou plusieurs faisceaux tandis que la matrice d'antenne adaptative fournit le faisceau en fonction de la cible de l'utilisateur et des emplacements qui se chevauchent (38).

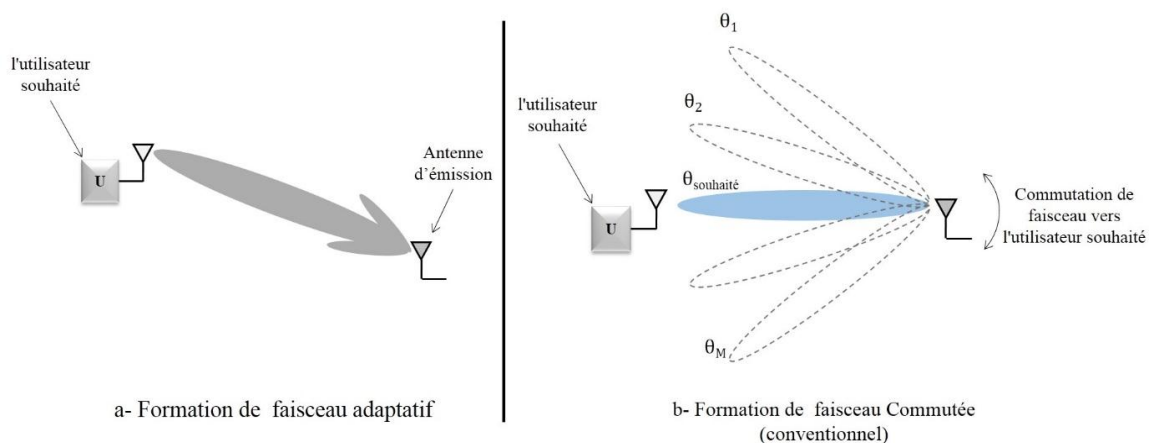


Figure 19: Les deux types de formation de faisceau : a) formation de faisceau adaptatif

b) formation de faisceau commuté (39).

## 2. Association avec les algorithmes conventionnels :

On considérant que :

- Le système massif MIMO, composé de  $M$  antennes disposées linéairement (ULA) ;
- $K$  utilisateurs avec ( $K \leq N$ ), et où chaque utilisateur dispose d'une seule antenne.

### 3. En cas de l'algorithme « Retarder et Additionner » (DAS) :

L'algorithme de formation de faisceaux Retarder et Additionner (*Delay And Sum*) est utilisé dans les systèmes 5G dans le cadre de la technologie MIMO massive pour améliorer la capacité et la couverture des systèmes de communication sans fil.

En 5G, la formation de DAS est utilisée pour envoyer et recevoir sélectivement des signaux dans une direction spécifique, et cet algorithme est utilisé pour calculer le poids des antennes trouvées dans la matrice. Qui contrôle la capacité de phase et de signal reçu par chaque antenne, permettant au système de diriger le faisceau de l'antenne dans la direction souhaitée tout en atténuant les signaux provenant d'autres directions. Cela permet d'améliorer le rapport signal-bruit (SNR) du signal reçu, améliorant les performances du système. Dans les systèmes d'antennes intelligentes.

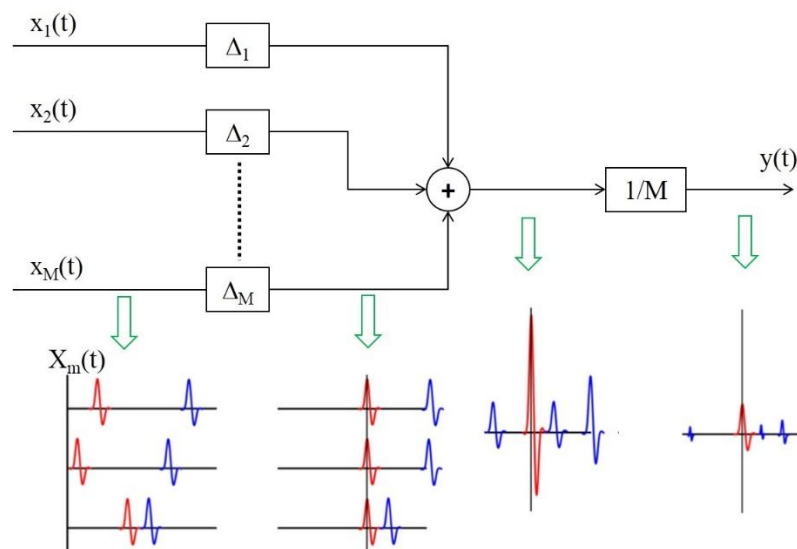


Figure 20: L'algorithme de formation de faisceaux Delay and Sum (DAS) (40)

#### 3.1. En cas de la liaison montante :

Dans ce cas, chaque utilisateur  $k$  émet un signal vers les  $M$  antennes de la station de base, en tenant compte que lesdits signaux sont orthogonaux entre eux. La mise à jour des poids eu lieu uniquement dans la phase de la liaison montante.

Soient :

- $s_k(t)$  est le signal émis par l'utilisateur  $U_k$  ;
- $x_m(t)$  est le signal reçu au niveau de l'antenne  $a_m$  ;
- $y_m(t)$  est le signal résultant du bloc  $m$  ;

- $\Delta_m$  : est le délai ;
- $W = \frac{1}{M}$  : est le poids du bloc  $m$ .

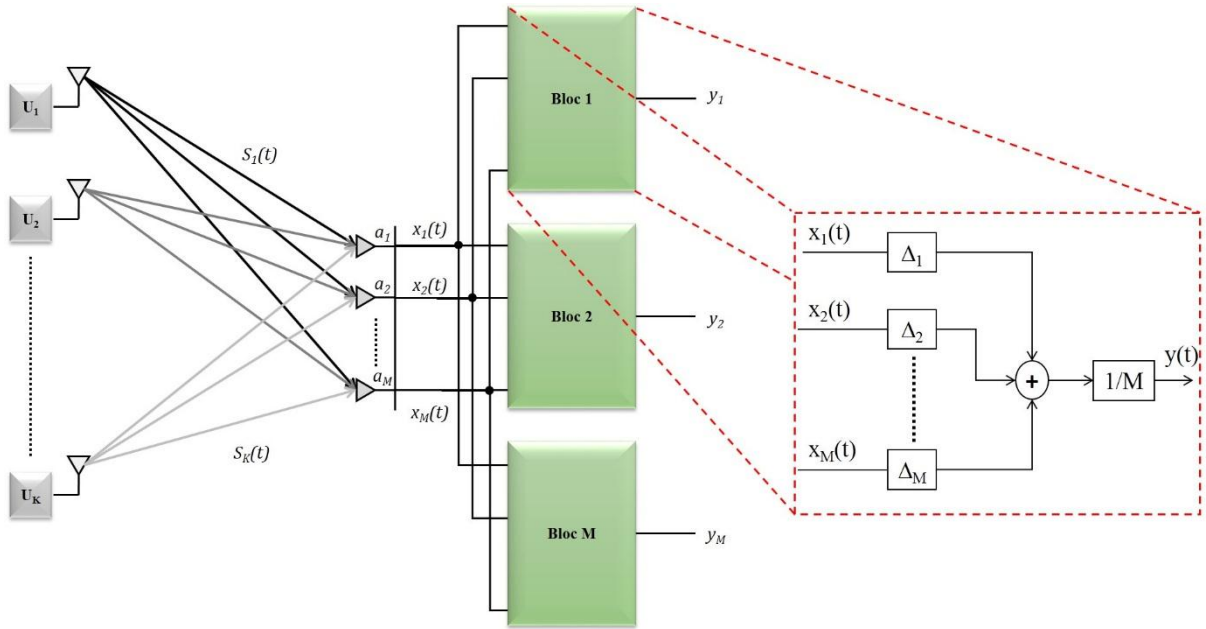


Figure 21: Association d'un algorithme conventionnel dans le massive MIMO en cas de la liaison montante (41).

$$y(t) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M X_i(t - \Delta_i) \tag{4}$$

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & \dots & h_{1K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M1} & \dots & h_{MK} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_K \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_M \end{pmatrix} \tag{5}$$

$$X = HS + N \tag{6}$$

Où :

- $H$  : est la matrice du canal ;
- $N$  : est le vecteur du bruit gaussien (AWGN).

### 3.2. En cas de la liaison descendante :

Dans ce cas, chaque  $M$  antenne de la station de base émet un signal vers les  $k$  utilisateurs, formant des faisceaux, en tenant compte que lesdits signaux sont orthogonaux entre eux. Les signaux à transmettre sont multipliés par les poids générés à l'issue de l'étape précédente.

Soient :

- $s_m(t)$  est le signal qui alimente le bloc  $m$  ;
- $x_m(t)$  est le signal qui sera émis depuis l'antenne  $m$  ;
- $y_k(t)$  est le signal reçu au niveau de l'utilisateur  $U_k$  ;

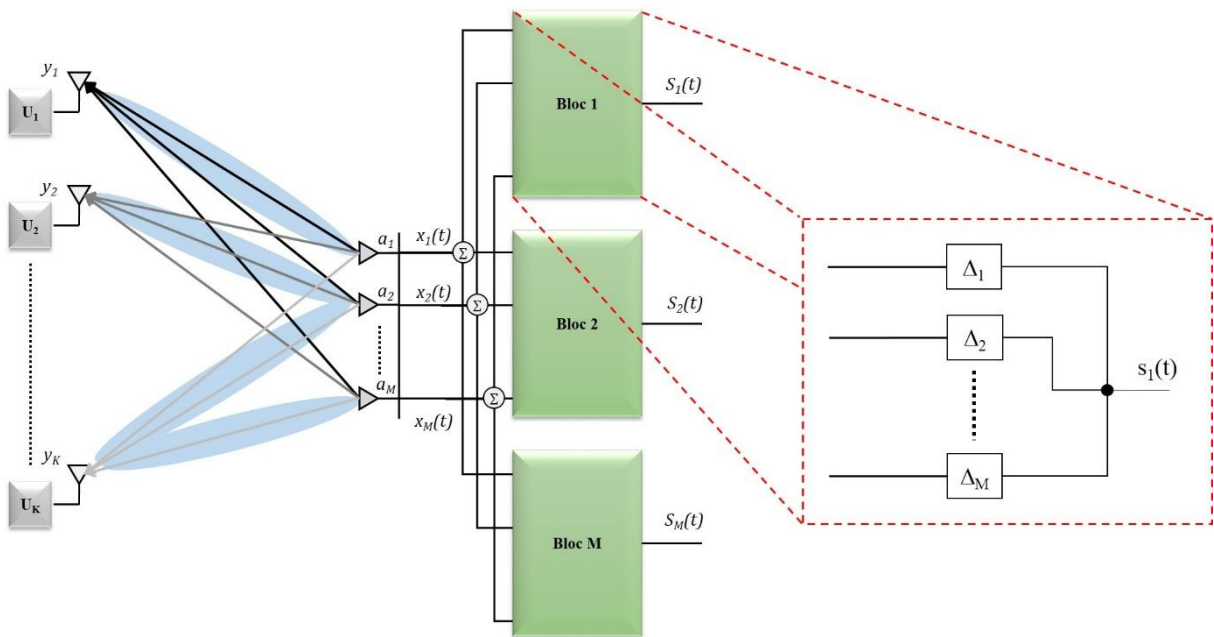


Figure 22: Association d'un algorithme conventionnel dans le massive MIMO en cas de la liaison descendante (41).

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_K \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{K1} & \cdots & h_{KM} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_M \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_K \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$Y = HX + N \quad (8)$$

### 4. Association avec les algorithmes adaptatifs :

Dans cette section, considérant un système massive MIMO, composé de  $M$  antennes disposées linéairement (ULA) et  $K$  utilisateurs ( $K \leq N$ ), où chaque utilisateur dispose d'une seule antenne.

#### 4.1. En cas de la liaison montante :

Dans ce cas, chaque utilisateur  $k$  émet un signal vers les  $M$  antennes de la station de base, en tenant compte que lesdits signaux sont orthogonaux entre eux. La mise à jour des poids eu lieu uniquement dans la phase de la liaison montante.

Soient :

- $s_k(t)$  est le signal émis par l'utilisateur  $U_k$  ;
- $x_m(t)$  est le signal reçu au niveau de l'antenne  $a_m$  ;
- $y_m(t)$  est le signal résultant du bloc  $m$  ;
- $W_m$  est la matrice des poids du bloc  $m$ .

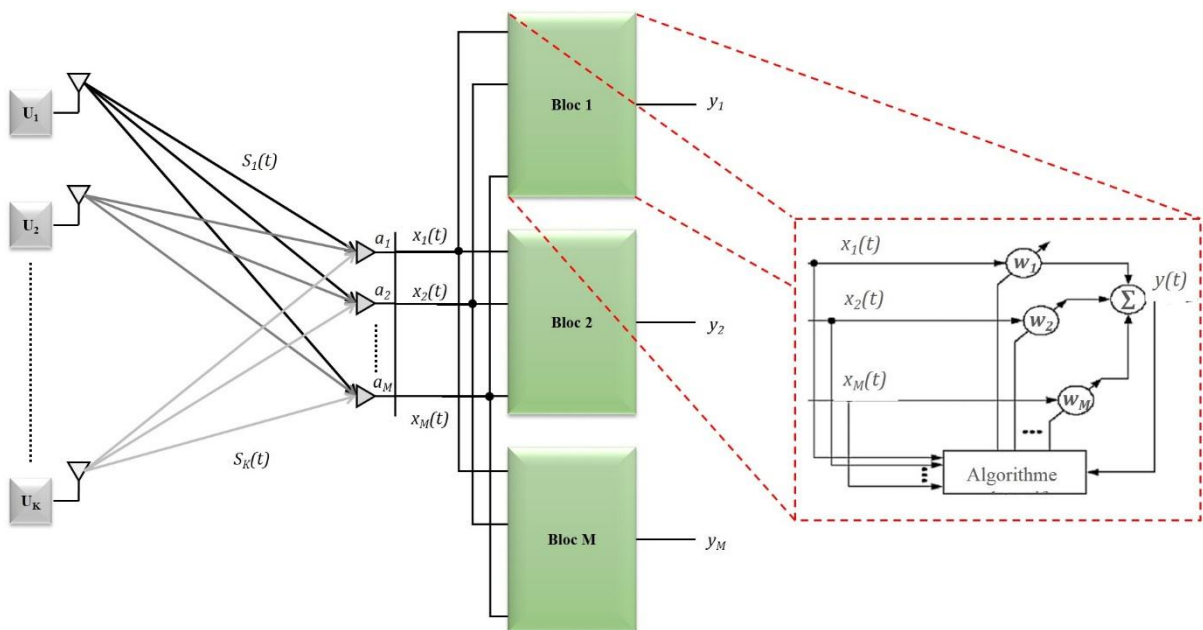


Figure 23: Association d'un algorithme adaptatif dans le massive MIMO en cas de la liaison montante (41).

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_{11} & \dots & w_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{M1} & \dots & w_{MM} \end{pmatrix}^* \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_M \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$Y = W^H X \quad (10)$$

Avec :

$W^H$  : est la matrice des poids transposé conjugué.

Et :

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & \dots & h_{1K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M1} & \dots & h_{MK} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_K \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_M \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$X = HS + N \quad (12)$$

Où :

- $H$  : est la matrice du canal ;
- $N$  : est le vecteur du bruit gaussien (AWGN).

Et :

$$W = \begin{pmatrix} W_1 \\ \vdots \\ W_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_{11} & \dots & w_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{M1} & \dots & w_{MM} \end{pmatrix} \quad (13)$$

Où les  $W_m$  sont les matrices des poids correspondants à chaque bloc.

#### 4.2. En cas de la liaison descendante :

Dans ce cas, chaque  $M$  antenne de la station de base émet un signal vers les  $k$  utilisateurs, formant des faisceaux, en tenant compte que lesdits signaux sont orthogonaux entre eux. Les signaux à transmettre sont multipliés par les poids générés à l'issue de l'étape précédente.

Soient :

- $s_m(t)$  est le signal qui alimente le bloc  $m$  ;
- $x_m(t)$  est le signal qui sera émis depuis l'antenne  $m$  ;
- $y_k(t)$  est le signal reçu au niveau de l'utilisateur  $U_k$  ;
- $W_m$  est la matrice des poids du bloc  $m$ .

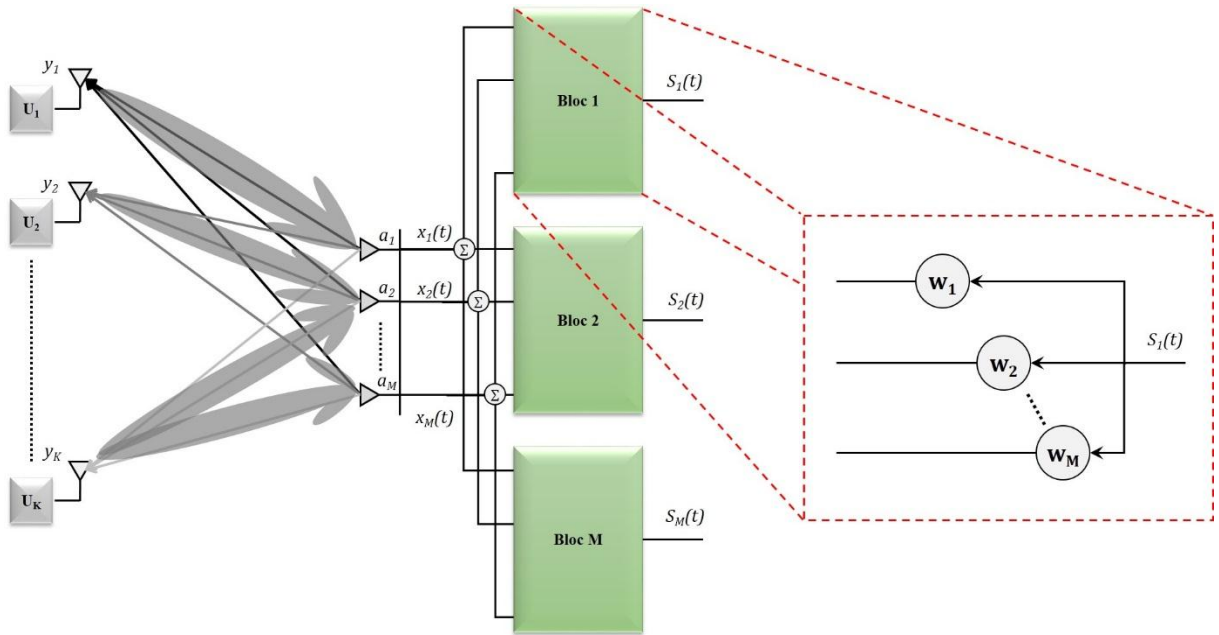


Figure 24: Association d'un algorithme adaptatif dans le massive MIMO en cas de la liaison descendante (41).

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_K \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & \dots & h_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{K1} & \dots & h_{KM} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_M \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_K \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$Y = HX + N \quad (15)$$

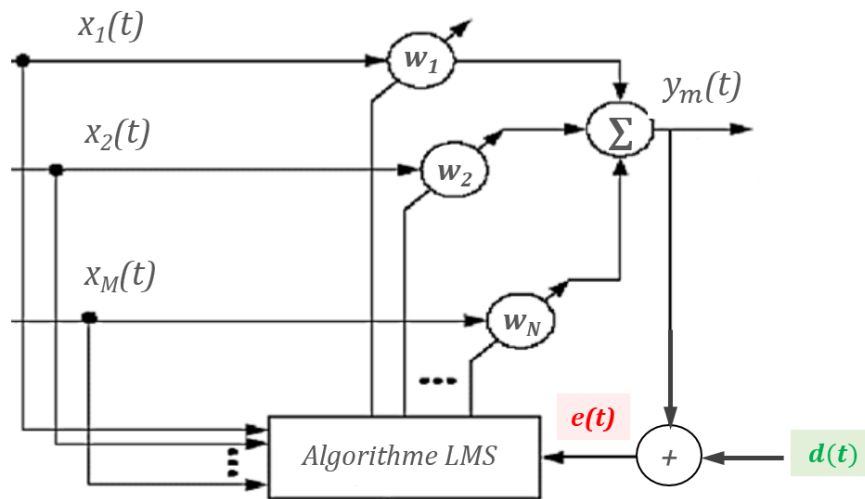
Tel que :

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_{11} & \dots & w_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{M1} & \dots & w_{MM} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_M \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$X = WS \quad (17)$$

### 5. En cas de l'algorithme LMS :

Pour l'algorithme LMS, chaque bloc  $m$  devient comme suit :



Ainsi, l'algorithme LMS (*Least Mean Square*) est décrit pour chaque bloc par :

Algorithme 1 : Algorithme LMS

Données :  $d(t)$  : signal désiré à l'instant  $t$

Pour chaque réception à l'instant  $t$  :

$$y_m(t) = X(t)W_m^T(t)$$

$$e(t) = d(t) - y_m(t)$$

$$W_m(t+1) = W_m(t) + \mu X(t)e^*(t)$$

$t=t+1$

Répéter.

Cet algorithme sera exécuté par chacun des  $M$  bloc au même instant  $t$ , générant ainsi, la matrice des poids  $W$ . le signal  $d(t)$  est le résultat de l'estimation du DOA.

### Conclusion :

En conclusion, ce troisième chapitre a constitué une association des concepts ayant été abordé aux termes des deux chapitres précédents. Nous avons établi une modélisation des systèmes massive MIMO à employer vis-à-vis les caractéristiques des algorithmes utilisés. Cela a été mis en exergue par l'application de cette association sur les deux types d'algorithmes conventionnels et adaptatifs, dont un exemple de chaque type a été donné. Dans le prochain chapitre, nous allons passer à la partie pratique de notre mémoire, en se basant sur les résultats des trois chapitres déjà obtenus.

## Chapitre 4

---

# Simulation des performances et comparaisons

---

## Introduction :

Aux termes de ce dernier chapitre, nous allons proposer une étude pratique, via l'environnement MATLAB, d'une chaîne de communication à base de massive MIMO associé à des algorithmes adaptatif, pour la détection de multi-utilisateurs.

### 1. Résultats de simulation de performances de l'algorithme LMS appliqué dans le massive MIMO :

Dans cette partie de simulation, nous simulerons l'application de l'algorithme LMS (*Least Mean Square*), qui appartient aux algorithmes adaptatifs, sur une chaîne de communication 5G, à base de massive MIMO, tout en variant les caractéristiques du système, à l'instar du nombre d'antennes au niveau de la station de base, du nombre de trajets, du pas d'adaptation ... etc.

#### 1.1. Avec différents nombres d'antennes au niveau de la réception ( $M=2,6,\dots,200$ ) :

Pour nos simulations, on considère le scénario de trois stations mobiles (MS) simulant 3 utilisateurs, d'angle d'arrivées  $\theta = -40^\circ, 10^\circ, \text{et } 30^\circ$ , émettant des signaux, modulés en BPSK, avec la même fréquence porteuse  $F_c = 30 \text{ GHz}$ , et communiquent avec une station de base (BS), équipée d'un réseau d'antennes ayant une disposition ULA, avec un nombre de trajets  $T_h$  fixé à 4.

En outre, on suppose l'existence de 3 dispositifs d'interférence, transmettant sur la même fréquence porteuse que celle des stations mobiles  $F_c$ . On simule avec différents nombres des antennes au niveau de la station de base,  $M = (2, 6, 60, 100, 200)$  et on commente sur les résultats obtenus.

Pour les paramètres de l'algorithme LMS, le pas d'adaptation  $\mu$  est fixé à **0.02**.

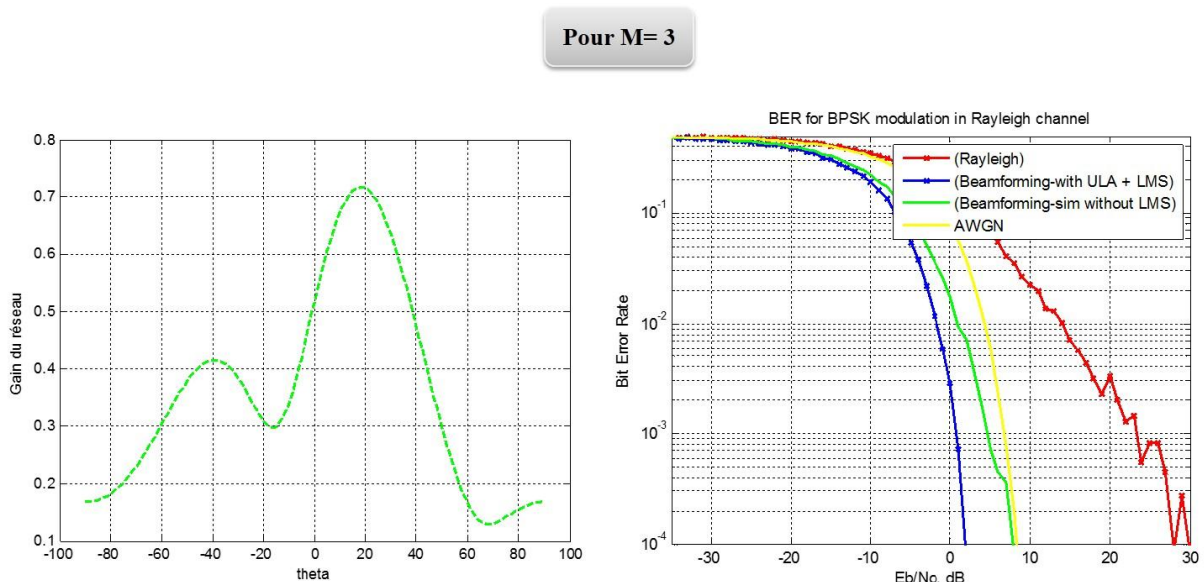


Figure 25: Résultats avec  $M=3$

Lorsque le nombre d'antennes de la station de base  $M=3$ , inférieur au nombre de signaux reçus (6 signaux), on obtient la Figure 25: Résultats avec  $M=3$ . Le graphique de gauche s'agit de la courbe du gain de réseau en fonction de l'angle  $\theta$ . On constate qu'elle contient deux lobes seulement, un lobe principale relativement large à l'angle  $\theta = 20^\circ$ , avec un gain de réseau de 0.72 dB, un lobe secondaire à l'angle de  $-40^\circ$ , avec un gain de réseau de 0.41 dB.

Le graphique de droite représente l'évolution du Taux d'Erreur Binaire (BER) en fonction du rapport Signal sur Bruit (SNR), pour différentes configurations de système simulées. L'observation de cette figure nous a permis de noter que la courbe « Rayleigh » présente la plus mauvaise performance, du fait qu'elle ne bénéficie d'aucune amélioration du signal.

Les courbes « *Beamforming-with ULA + LMS* » et « *Beamforming-sim without LMS* » montrent une amélioration significative grâce à la formation de faisceau, avec la courbe « *Beamforming-with ULA + LMS* » étant généralement meilleures en raison de l'adaptation des poids des antennes pour réduire l'interférence. La courbe « AWGN » représente la limite théorique de performance du système.

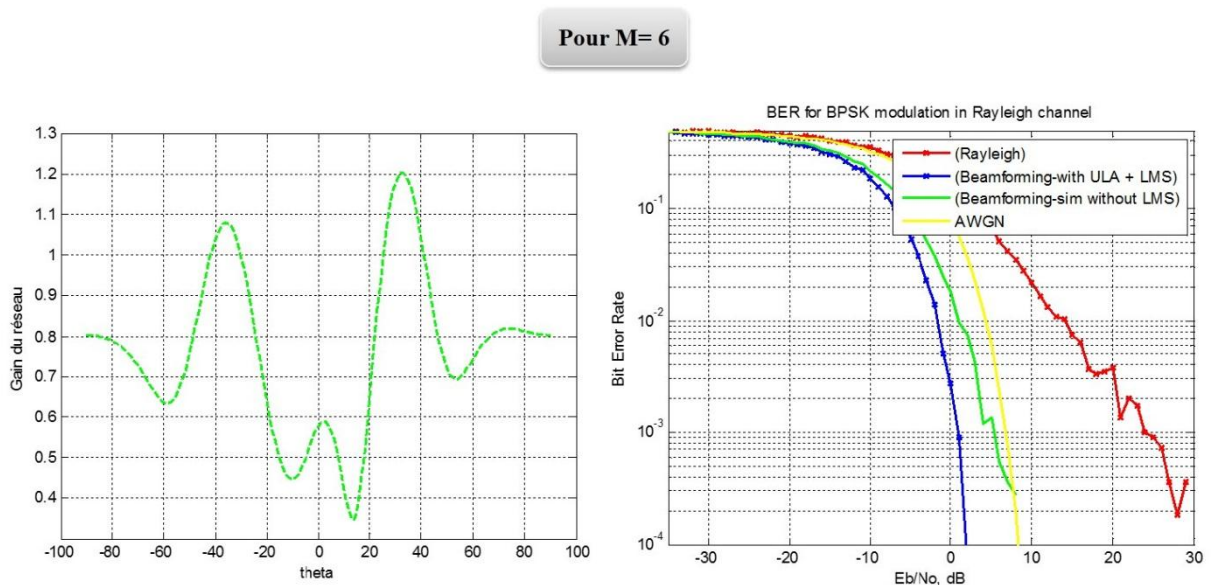


Figure 26 : Résultats avec  $M=6$ .

Avec  $M=6$  (Figure 26), on enregistre une amélioration significative dans la directivité du faisceau, dont les lobes principaux deviennent plus étroits et focalisés sur les angles reçus et dirigés dans les directions souhaitées aux angles de  $\theta = -40^\circ$  et  $30^\circ$ , avec des valeurs de gain convergentes de 1,1 et 1,2 dB, respectivement, tandis que le lobe secondaire à  $0^\circ$  est dirigé aléatoirement, avec un gain très faible de 0,6dB.

Pour la courbe du Taux d'Erreur Binaire (BER) en fonction du rapport Signal sur Bruit (SNR), nous n'avons noté aucun changement par rapport à celle du cas de  $M=3$ .

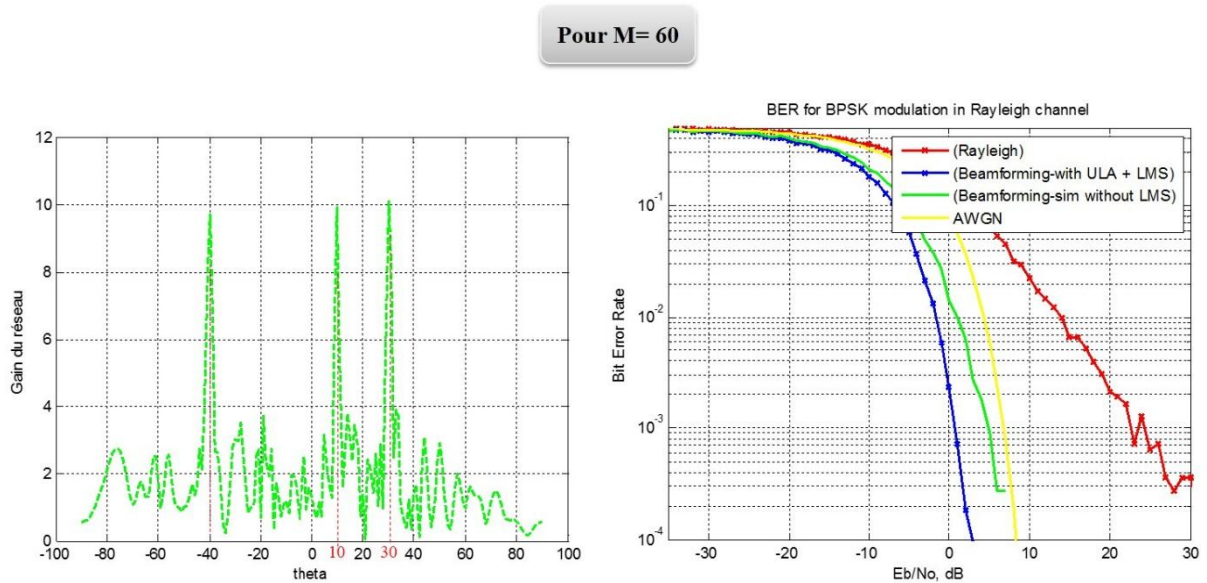


Figure 27: Résultats avec M=60.

En cas du nombre des antennes  $M=60$  (Figure 27), la courbe de gain de réseau en fonction de l'angle  $\theta$  présente une nette amélioration de la directivité des faisceaux. Les trois lobes principaux deviennent encore plus étroits et plus précisément orientés vers les directions ou bien les angles souhaités (qui déterminent la direction de la présence des utilisateurs ciblés, à savoir  $-40^\circ$ ,  $10^\circ$  et  $30^\circ$ ), avec des valeurs de gains très proches 9.8, 9.9 et 10 dB respectivement. D'autre part, cette courbe montre également plusieurs lobes secondaires dédiés à l'élimination d'interférences.

Idem pour le  $M=3$  et  $M=6$ , la courbe du Taux d'Erreur Binaire (BER) en fonction du rapport Signal sur Bruit (SNR) ne présente aucun changement significatif.

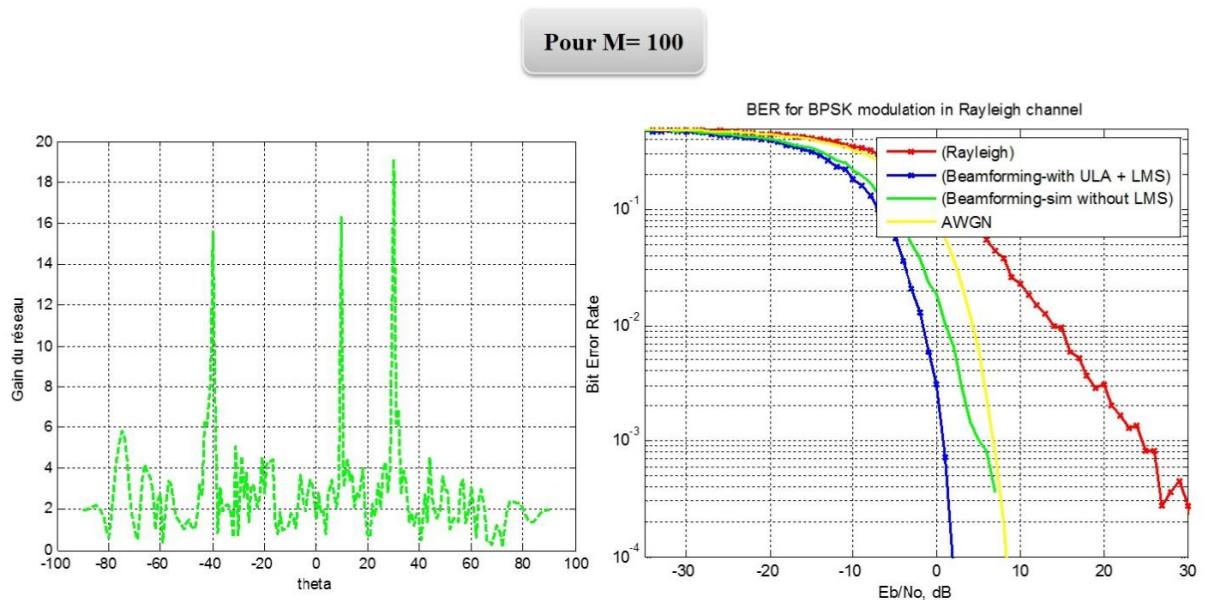


Figure 28: Résultats pour M=100.

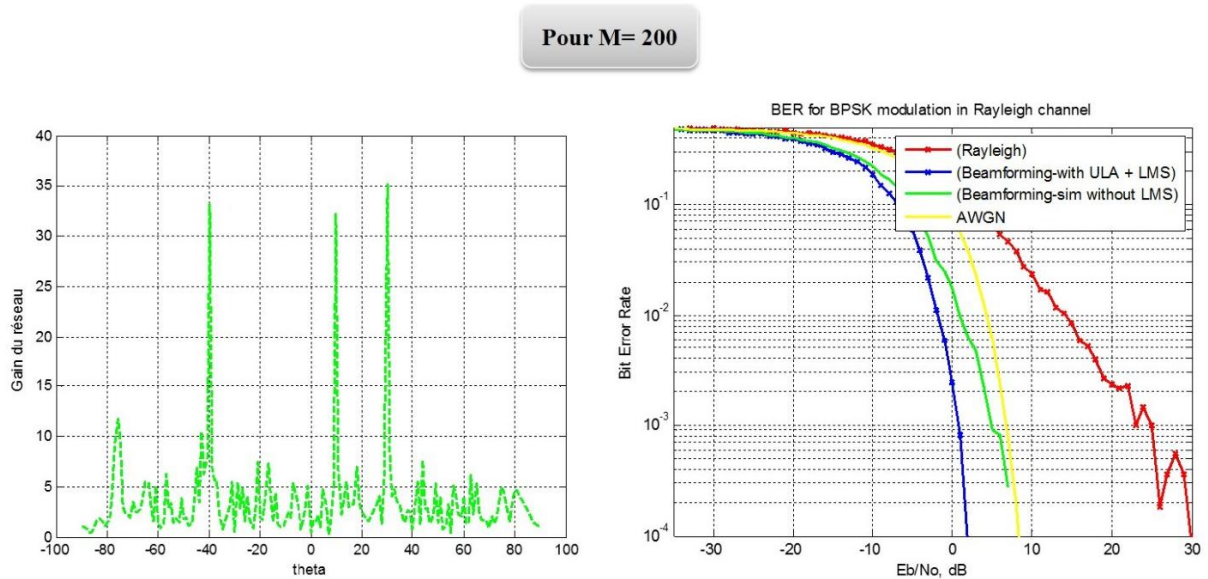


Figure 29: Résultats avec M= 200.

En augmentant le nombre d'antennes de la station de base à  $M=100$  et à  $M=200$  (Figure 29 et Figure 29), l'analyse des deux courbes de gain de réseau en fonction de l'angle  $\theta$  a fait ressortir que les trois lobes principaux deviennent extrêmement étroits et orientés vers les directions souhaitées, avec des valeurs de gain variant entre 16 et 19 dB, dans le cas de  $M=100$  et entre 32 et 35dB, dans le cas de  $M=200$ . Par ailleurs, cette courbe présente également plusieurs lobes secondaires, qui sont dédiés à l'élimination d'interférences.

La courbe du Taux d'Erreur Binaire (BER) en fonction du rapport Signal sur Bruit (SNR) demeure sans changement.

### 1.2. Avec différents nombres de trajet ( $Th=1, 2, \dots, 20$ ) :

Dans cette partie de simulation, nous allons considérer le même scénario précédent, mais on fait varier le nombre de trajets ( $Th = 1, 2, 5, 10, 20$ ), avec les paramètres fixes suivants :

- Nombre d'antennes au niveau de la station de base ( $M= 60$ ) ;
- Pas d'adaptation ( $\mu=0.02$ ) ;
- Fréquence porteuse  $F_c=30$  GHz.

Pour Th= 1

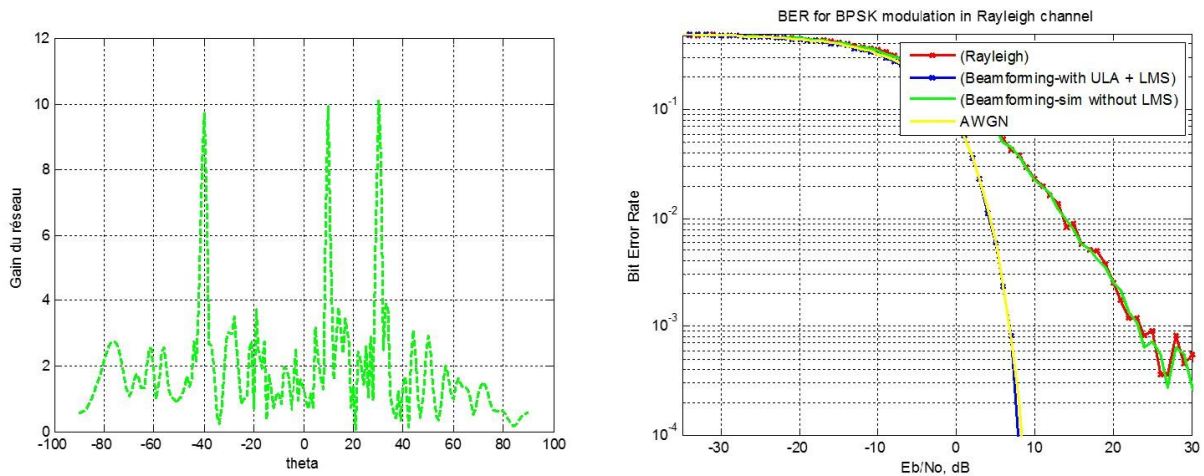


Figure 30: Résultats avec Th=1.

Si on simule avec nombre de trajets ( $Th=1$ ), on remarque dans le graphique droit de la Figure 30, représentant la courbe du Taux d'Erreur Binaire (BER) en fonction du rapport Signal sur Bruit (SNR) que la courbe « *Beamforming-sim without LMS* » se confond avec celle de « *Rayleigh* », qui représente la plus mauvaise performance, car elle ne bénéficie d'aucune amélioration du signal, or que la courbe « *Beamforming-with ULA + LMS* » suit la même allure de la courbe « *AWGN* », qui détermine limite théorique de performance du système.

Pour Th= 2

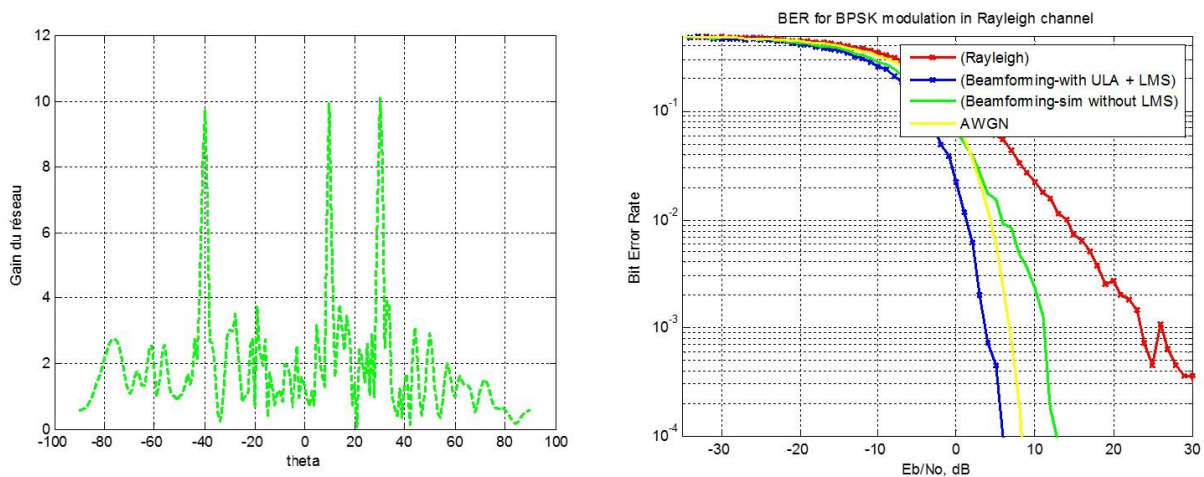
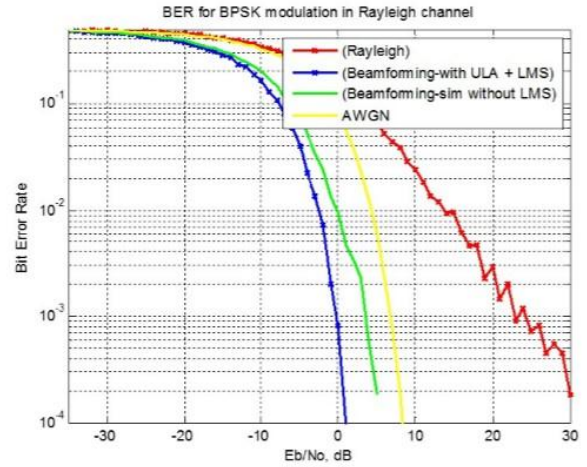
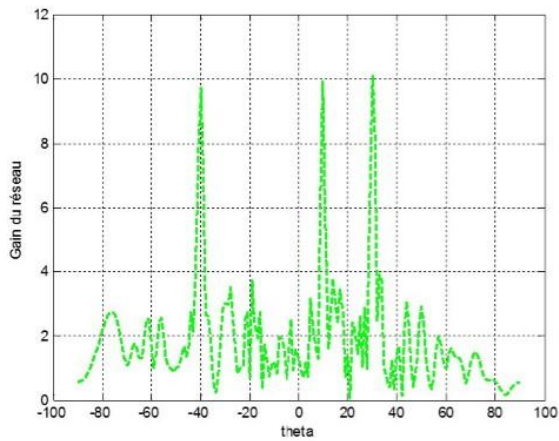


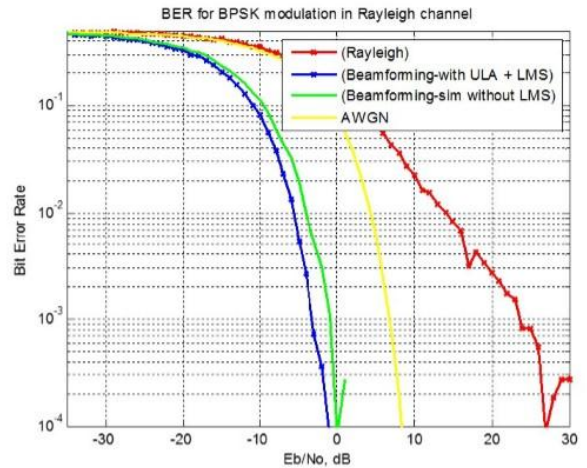
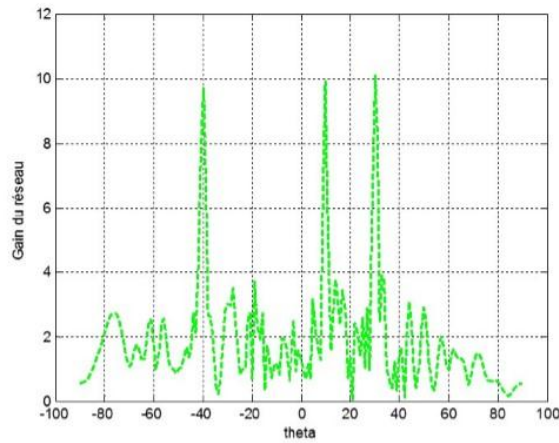
Figure 31: Résultats avec Th=2.

En cas du nombre de trajet ( $Th=2$ ) (Figure 31), on remarque que les courbes qui ont été déjà confondues, s'éloignent l'une de l'autre. Egalement, les courbes « *Beamforming-sim without LMS* » et *Beamforming-with ULA + LMS* atteints la valeur  $10^{-4}$  du BER, en valeurs de SNR 12 et 6 dB.

Pour Th= 5



Pour Th= 10



Pour Th= 20

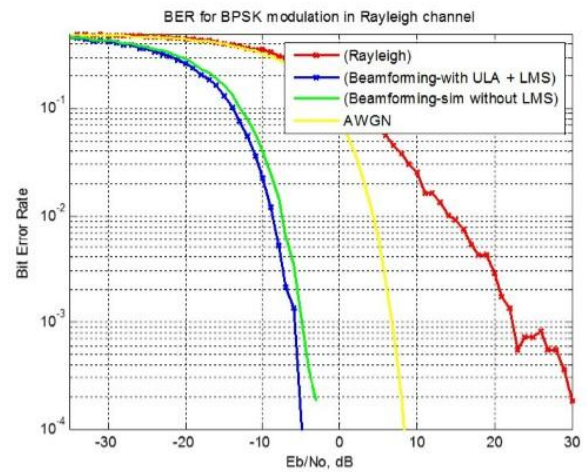
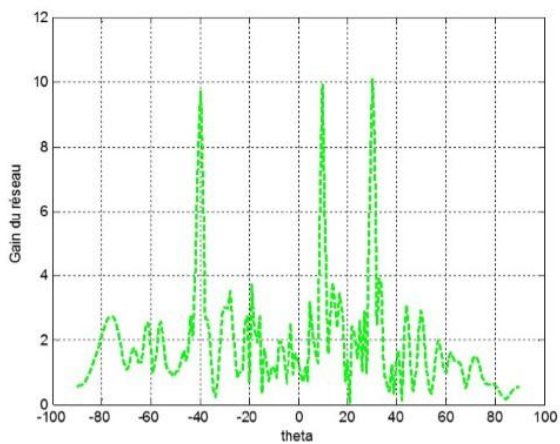


Figure 32: Résultats avec Th = 5, 10 et 20.

Pour les valeurs du nombre de trajet de 5, 10 et 20 (Figure 32), le graphe du gain de réseau en fonction d'angle  $\theta$  reste sans changement et donne la même allure.

En faisant augmenter le nombre de trajets, on remarque que les courbes les courbes « *Beamforming-sim without LMS* » et « *Beamforming-with ULA + LMS* » tendent de converger. Cela signifie que les performances des deux systèmes sont quasi-identiques lorsque le nombre de trajet devient plus important.

### 1.3. Avec différentes pas d'adaptation ( $\mu=0.02, 0.001, \dots, 0.00002$ ) :

Considérant le même scénario, dans ce qui suit, on va varier le pas d'adaptation caractérisant l'algorithme LMS, ( $\mu= 0.02, 0.001, 0.0001, 0.00001$ ), avec fixation des paramètres suivant :

- Nombre d'antennes au niveau de la station de base ( $M= 60$ ) ;
- Nombre de trajet ( $Th = 5$ ) ;
- Fréquence porteuse  $F_c=30$  GHz.

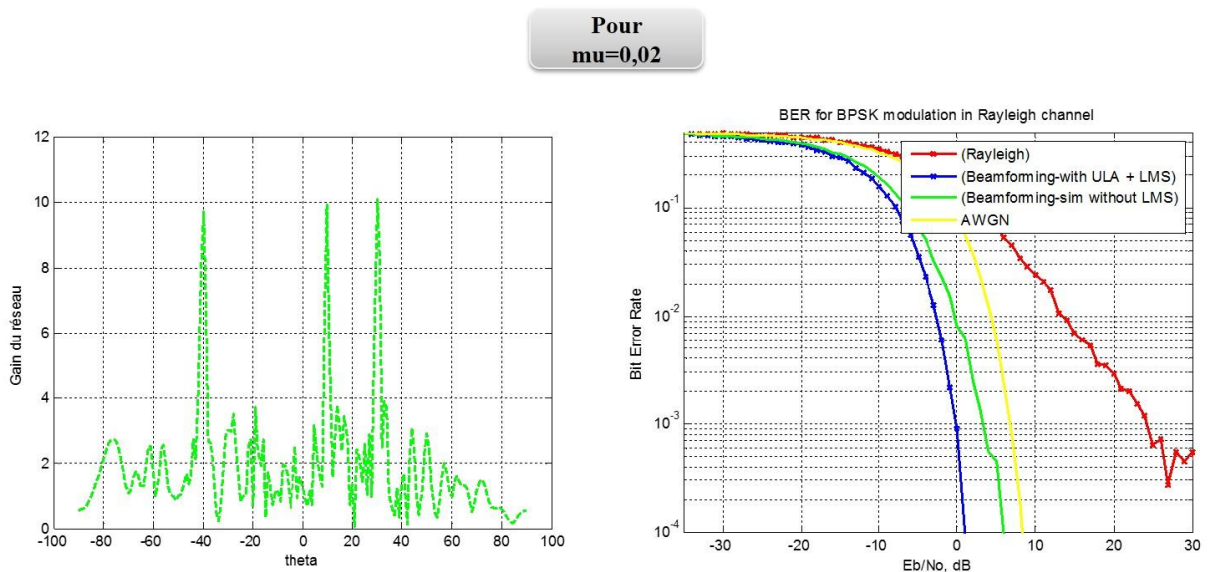


Figure 33: Résultats avec  $\mu= 0.02$

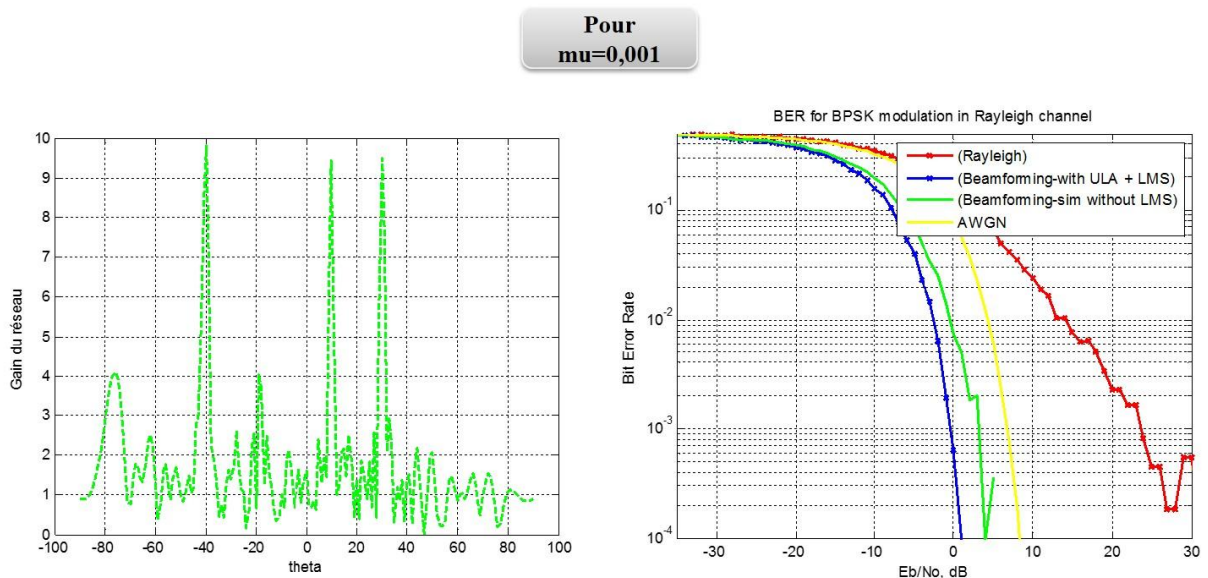
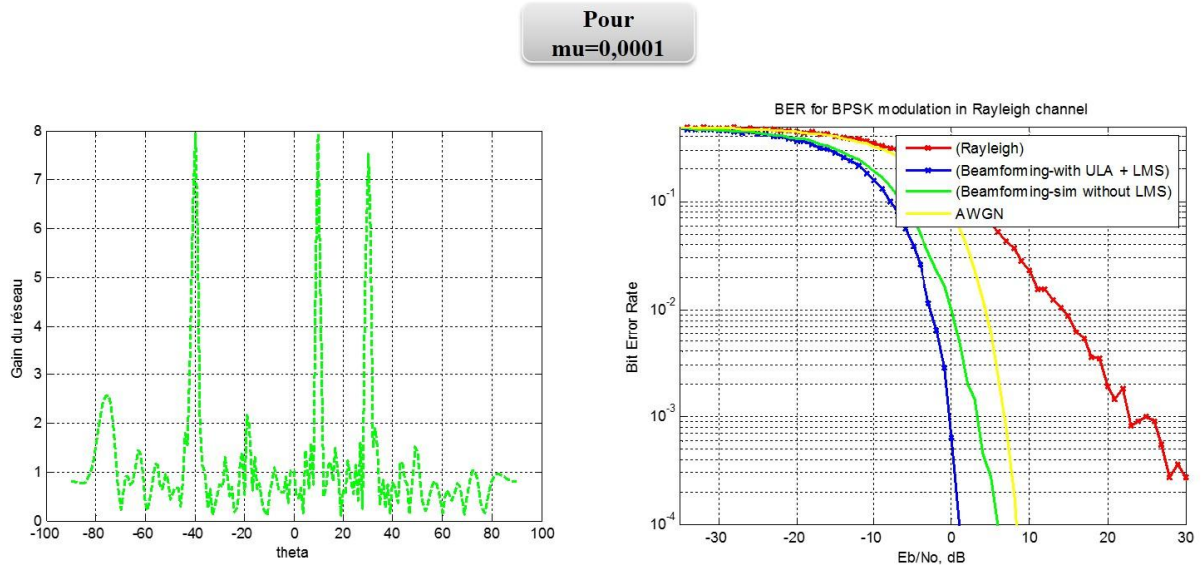
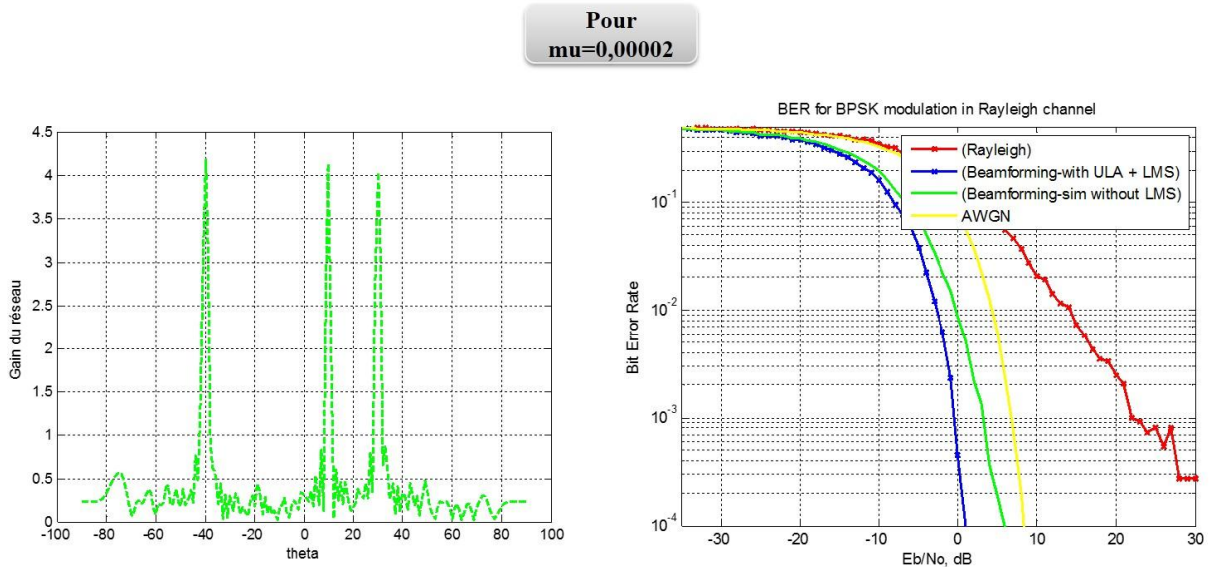


Figure 34: Résultats pour  $\mu= 0.001$ .

Figure 35 : Résultats pour  $\mu = 0.0001$ .Figure 36: Résultats avec  $\mu = 0.00002$ .

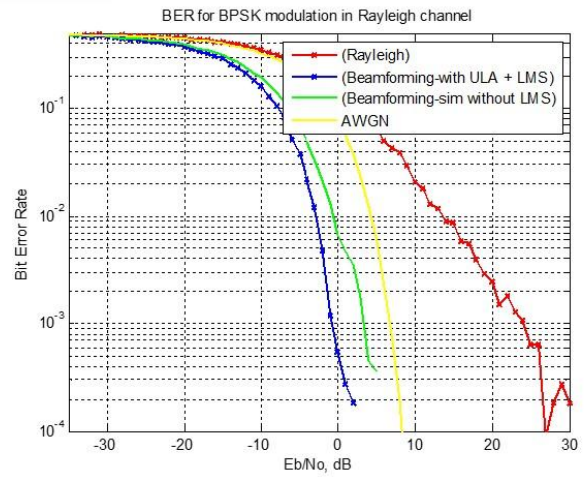
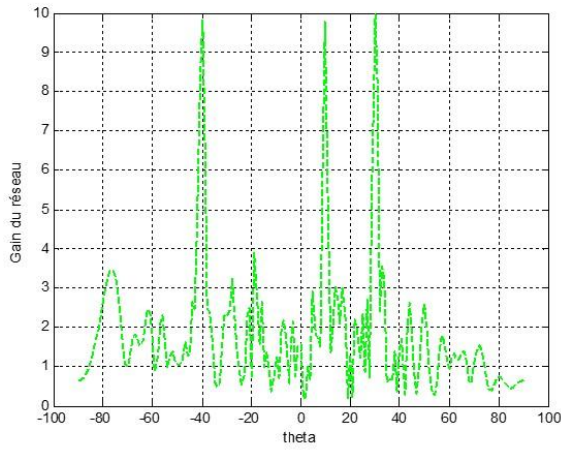
En comparant les Figure 33, Figure 34, Figure 35 et Figure 36, on peut clairement noter que plus  $\mu$  devient petit, plus le gain diminue, que ce soit pour les lobes principaux ou bien secondaires. Pour ce qui est des courbes du Taux d'Erreur Binaire (BER) en fonction du rapport Signal sur Bruit (SNR), elles ne sont pas affectées.

#### 1.4. Avec différentes fréquences porteuses ( $F_c=5 \text{ GHz}, \dots, 60 \text{ GHz}$ ) :

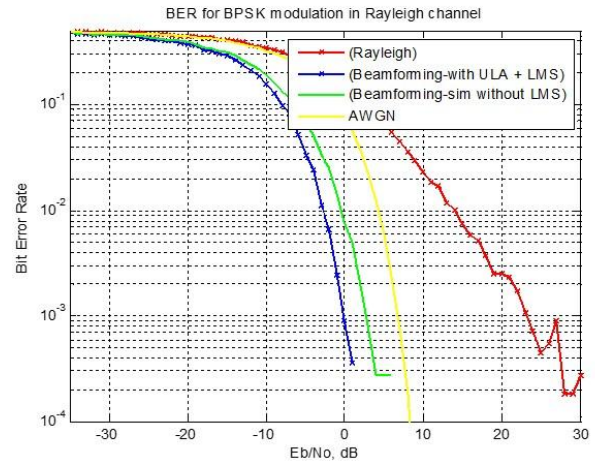
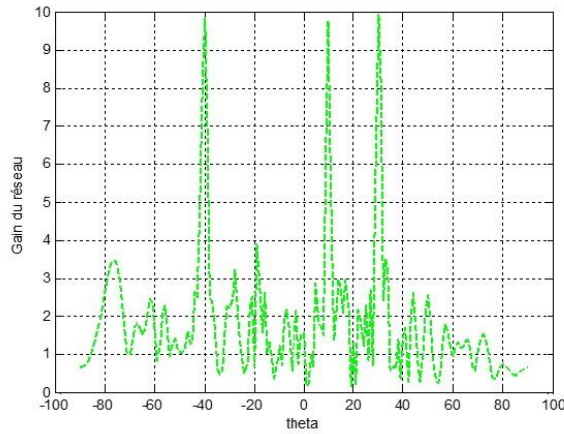
Dans ce qui suit, on s'intéresse au comportement du système vis-à-vis la variation de la fréquence porteuse ( $F_c = 5 \text{ GHz}, 30 \text{ GHz}$  et  $60 \text{ GHz}$ ), tout en fixant les paramètres suivant :

- Nombre d'antennes au niveau de la station de base ( $M= 60$ ) ;
- Nombre de trajet ( $T_h = 5$ ) ;
- Pas d'adaptation ( $\mu= 0.02$ ).

**Fc= 5 GHz**



**Fc= 30 GHz**



**Fc= 60 GHz**

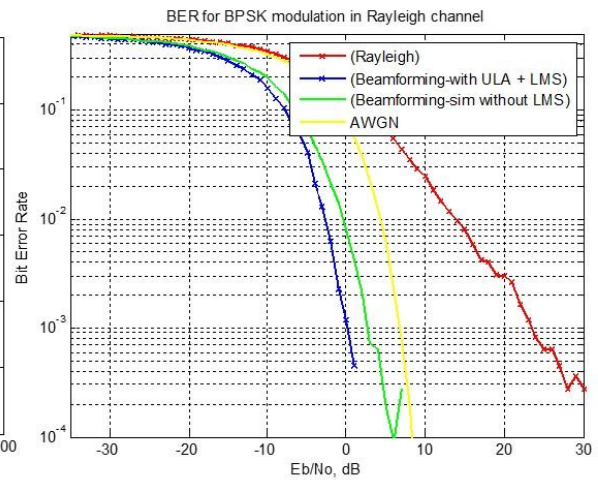
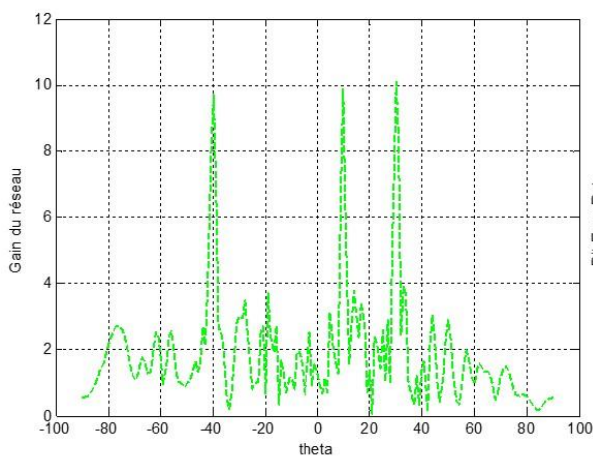


Figure 37 : Résultats pour  $F_c = 5 \text{ GHz}$ ,  $30 \text{ GHz}$  et  $60 \text{ GHz}$

Depuis les graphes de Figure 37, et lorsque on modifie la valeur de la fréquence porteuse dans la simulation, on remarque que les courbes de BER suivent des allures quasi-similaires et presque indiscernables, ce qui indique que la fréquence porteuse n'a aucun impact significatif sur les performances de l'algorithme LMS.

### **Conclusion :**

Pour conclure, ce dernier chapitre a été consacré à la partie pratique de notre projet de fin d'étude, où on a pu concrétiser les notions théoriques abordées dans les trois premiers chapitres par simulation, via l'environnement MATLAB.

Ainsi, nous avons étudié l'effet de variation des différents paramètres de la chaîne de communication 5G à base de massive MIMO, associé à un algorithme adaptatif, qui est en l'occurrence LMS.

---

## **Conclusion Générale et Perspectives**

---

## **Conclusion générale et perspectives**

Les systèmes de communication sans fil de nouvelle génération, notamment la 5G, sont assistés par des technologies qui apportent des améliorations significatives du débit cellulaire. Parmi lesquelles, la technologie massive MIMO a joué un rôle important pour aboutir à ces améliorations, dont le principe repose sur l'utilisation d'un nombre important d'antennes dans les stations de base, répartis selon une topologie bien déterminée, fonctionnant d'une façon cohérente sans fil pour servir un grand nombre d'utilisateurs en même temps et sans interférences.

Par ailleurs et tirant profit des algorithmes de formation de faisceaux, les performances d'une chaîne de communication 5G à base de massive MIMO, pourra être amélioré, et ce, via l'utilisation du bon algorithme combinée au choix des meilleurs paramètres adaptés au système.

A la lumière de ce qui précède, dans ce mémoire, nous avons mis en évidence l'application des algorithmes conventionnels et adaptatifs à une chaîne de communication 5G à base de Massive MIMO, avec simulation démonstrative de cette opération sur Matlab.

D'abord, dans le chapitre 1, nous avons établi une étude sur les divers algorithmes conventionnels et adaptatifs, ainsi qu'une introduction aux concepts liés au système d'antennes intelligents.

Ensuite, à travers le chapitre 2, nous avons rappelé une brève histoire de l'évolution des technologies communications mobiles, ainsi que les notions de base d'une chaîne de communications numériques sans fil, sur la base de laquelle, nous avons présenté le principe de base d'une chaîne de communication 5G et ses caractéristiques, telles que les bandes de fréquences, les techniques de modulation et les formes d'ondes utilisées et un aperçu sur la chaîne de communications numériques 5G à base de MIMO massive.

Le chapitre 3 a été consacré à l'étude théorique de l'association des algorithmes conventionnels et adaptatifs dans les massives MIMO, suivie d'une modélisation du système massive MIMO basé sur les algorithmes conventionnels et adaptatifs.

Le dernier chapitre, chapitre 4, a illustré les résultats et les conclusions tirées de la simulation, sur Matlab, de l'association d'algorithmes adaptatifs à une chaîne de communication à base de massive MIMO.

En conclusion, à travers ce travail, nous avons parvenu au fait que les performances d'une chaîne de communication à base de massive MIMO, pourront être amélioré significativement par l'association d'algorithmes adaptatifs.

A l'issue de ce travail, certains axes d'étude pourraient conduire à des perspectives de recherche futures, entre autres :

- L'étude de d'autres algorithmes plus performants que ceux abordé dans ce mémoire ;
- La conception d'un algorithme hybride qui permet de combiner les avantages des différents algorithmes et de réduire leurs inconvénients.

---

## **Bibliographie**

---

## Bibliographie

1. BENYAROU Mourad. Optimisation des systèmes multi-antennes appliqués aux systèmes MC-CDMA . *Université de Tlemcen*. 2012-2013.
2. DESAULNIERS Yannick. Étude comparative des méthodes de détection à usagers multiples dans les systèmes de communications sans fil MIMO ultra-large bande. *Université du Québec*. mai 2009.
3. ARIOUA Sara et MESSAOUDI Karima. Contribution à l'optimisation du canal dans les systèmes de télécommunications des réseaux mobiles. *Université Badji Mokhtar - Annaba*. 2019-2020.
4. JABER Marwan. The Ultra High Speed LMS Algorithm Implemented on Parallel. 2011.
5. ALI ISMAIL Youcef et DOUICI Djamel. Application de l'algorithme LMS pour l'amélioration des performance de la modulatior, ofdm dans uner canal mimo multi trajets. *aculté de technologie-université Djilali Bounaama-khemis miliana*. 2016.
6. MAOUCHE Karim et SLOCK DIRK T M. Une algorithme de moindres carrés récursif rapide : le fsu RLS. 1993.
7. DEHEMCHI Marwa, BOUHAFER Asma. Etude et Analyse de Méthodes de Beamforming pour des Systèmes Multi-utilisateurs Pour la 5G. *Université 8 Mai 1945 – Guelma*. 2019.
8. BOYER Alexandre. <https://docplayer.fr/24212034-Antennes-outils-et-modeles-pour-la-transmission.html>. *docplayer*. [En ligne] octobre 2014.
9. HAARD Mehta, DARPIT Patel, BHAUMIK Joshi, HARDIK Modi. 0G to 5G Mobile Technology: A Survey. October, 2014, Vol. 1, 6, pp. pp. 56-60.
10. MANAM S., YASHWANTH P.V., TELLURI, P. Comparative analysis of digital wireless mobile technology. 2019, Vol. vol.8, ISSN: 2278-3075.
11. BHALLA Mudit Ratana et BHALLA Anand Vardhan. Generations of Mobile Wireless Technology: A Survey. August 2010, Vol. Volume 5, No.4.
12. CHAUHAN Dharmendra, HADIA S K, DESAI Devanshi, PAREKH Dhimant, PATEL Krina. Evolution of mobile communication network: From 0G to 5G. 2019, Vol. 6.
13. RAMRAJ Dangi, PRAVEEN Lalwani, GAURAV Choudhary, ILSUN You, GIOVANNI Pau. Study and Investigation on 5G Technology: A Systematic Review. 2022, 22,26.
14. SHANMUGAM K. Sam. *Digital and analog communication systems*. New York I Chichester I Brisbane / Toronto : John Wiley & Sons, 1979.
15. XIONG Fuqin. *Digital Modulation Techniques*. Boston. London : Artech House telecommunications library, 2000.

16. CHATAUT Robin et AKL Robert. Massive MIMO Systems for 5G and beyond Networks—Overview, Recent Trends, Challenges, and Future Research Direction. *Sensors* 2020. 2020, 10.
17. BARRETO Andre Noll, FARIA Bruno, ALMEIDA Erika, RODRIGUEZ Ignacio, LAURIDSEN Mads, AMORIM Rafael, VIEIRA Robson. 5G – Wireless Communications for 2020. 2016, Vol. 31, 1, pp. 146-163.
18. MOGENSEN Preben and Pajukoski, Kari and Tirola, Esa and Vihriala, Jaakko and Lahetkangas, Eeva and Berardinelli, Gilberto and Tavares, Fernando M. L. and Mahmood, Nurul H. and Lauridsen, Mads and Catania, Davide and Cattoni, Andrea F. Centimeter-Wave Concept for 5G Ultra-Dense Small Cells. 2014, pp. 1-6.
19. STIMAC Tomislav. VLF. [En ligne] 5 avril 2023. <http://www.vlf.it/frequency/bands.html>.
20. MECHKHAR Hakima, TARAOUI Djamila. Etude et simulation des principaux canaux pour la 5<sup>e</sup> génération de la téléphonie mobile. 2019/2020.
21. WANG Xiong, KONG Linghe, KONG Fanxin, QIU Fudong, XIA Mingyu, ARNON Shlomi, CHEN Guihai. Millimeter Wave Communication: A Comprehensive Survey. 2018, Vol. 20, 3, pp. 1616-1653.
22. XIAO Ming and Mumtaz, Shahid and Huang, Yongming and Dai, Linglong and Li, Yonghui and Matthaiou, Michail and Karagiannidis, George K. and Björnson, Emil and Yang, Kai and I, Chih-Lin and Ghosh, Amitabha. Millimeter Wave Communications for Future Mobile Networks. 2017, Vol. 35, 9, pp. 1909-1935.
23. ROHM Semiconductors. *ROHM* . [En ligne] [Citation : 9 avril 2023.] <https://www.rohm.com/electronics-basics/wireless/modulation-methods>.
24. REIS Kyle. Waveform. [En ligne] 3 janvier 2023. [Citation : 9 avril 2023.] <https://www.waveform.com/a/b/guides/modulation-coding-speeds>.
25. GERZAGUET Robin, BARTZOUDIS Nikolaos, BALTAR Leonardo Gomes, BERG Vincent, DORE Jean-Baptiste, KTENAS Dimitri, FONT-BACH Oriol, MESTRE Xavier, PAYARO Miquel, FÄRBER Michael, ROTH Kilian. The 5G candidate waveform race: a comparison of complexity and performance. 2016.
26. SADOU Bachir et Alqudami, DHEYA Alhaq. Etude des techniques de modulation pour les réseaux mobiles 5G et 6G de nouvelle génération. 2019-2020.
27. *The 5G candidate waveform race: a comparison of complexity and performance*. Gerzaguet, Robin, et al. 2017, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking.
28. FETTWEIS Gerhard, KRONDORF Marco et BITTNER Steffen. GFDM - Generalized Frequency Division Multiplexing. 2009.
29. KEBEDE Tewelgn and Wondie, Yihenew and Steinbrunn, Johannes and Kassa, Hailu Belay and Kornegay, Kevin T. Multi-Carrier Waveforms and Multiple Access Strategies in Wireless Networks: Performance, Applications, and Challenges. *IEEE Access*. 2022.

30. KHAN Bahram et VELEZ Fernando J. Multicarrier Waveform Candidates for Beyond 5G. *International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing*. 2020.
31. TEJA Ravi et CHOPRA Shakti Raj. Review of UFMC Technique in 5G. 2018, pp. 115-120.
32. HERMANN Sohtsinda. Approche conjointe canal et amplificateur d'émission pour l'allocation dynamique de puissance dans les systèmes MIMO-OFDM. *Electronique. Université de Poitiers-Français*. 2017.
33. M.A ALBREEM, HABBASH A.H., ABU-HUDROUSS A.M., Ikki S.S. Overview of Precoding Techniques for Massive MIMO. 2021, Vol. 9, pp. 60764-60801.
34. MOLISCH Andreas F, RATNAM Vishnu V, HAN Shengqian, LI Zheda, NGUYEN Sinh Le Hong, Li Linsheng, HANEDA Katsuyuki. Hybrid Beamforming for Massive MIMO: A survey. Sept. 2017, Vol. 55, 9, pp. 134-141.
35. Ma ZHENG, ZHANG Zhengquan, DING Zhiguo, FAN Pingzhi, LI HengChao. Key techniques for 5G wireless communications: Network architecture, physical layer, and MAC layer perspectives. 2015, Vol. 58, pp. 1-20.
36. GHAYOULA Ridha, GHARSALLAH Ali, FADLALLAH Najib, RAMMAL Mohamed. Synthèse de diagramme de rayonnement d'un réseau d'antennes linéaires par la méthode Dolph-Tchebycheff. *4th International Conference: Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications – TUNISIA*. 25-29 march 2007.
37. TONYE Emmanuel et KEPCHABE Simon. Simulation des performances des antennes intelligentes par approches analytiques. *ResearchGate*. september 2015.
38. RAHIM MKA et MASRI Thelaha. Beam-forming network using switch-line phase shifter. *ResearchGate*. may 2008.
39. ALI Ehab, ISMAIL Mahamod, ROSDIADEE nordin, FADZILAH Abdulah Nor. Beamforming techniques for massive MIMO systems in 5G: overview, classification, and trends for future research. *Department of Electrical, Electronic and System Engineering, Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM), Bangi 43600, Malaysia*. 2017.
40. MEYER Andy, DÖBLER Dirk, HAMBRECHT Jan, MATERN Manuel. Acoustic Mapping on three-dimensional models. *International Conference on Computer Systems and Technologies - CompSysTech*. 16-17 june 2011.
41. LADHEM Bouchra et MAHDAD Latifa. Etude l'association des antennes MIMO à Maximisation du rapport signal sur bruit avec la technique Multi-porteuses OFDM. *FACULTÉ DE TECHNOLOGIE-DÉPARTEMENT DE TELECOMMUNICATION-UNIVERSITÉ DE TLEMCEN*. june 2015.