

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

LA REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Saad Dahlab Blida 1

Institut d'Aéronautique et des Études Spatiales



Département Études Spatiales

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de

Master en Aéronautique

Option : Télécommunications Spatiales

THÈME

Etude des performances de la technique NOMA et de ses schémas SCMA, MUSA et PDMA pour les réseaux 5G

Proposé et dirigé par :

Dr. KRIM

Réalisé par :

M^{lle} : NOUI Chahrazed

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. Othmane

MCA

Président

Dr. Krim

MCB

Encadreur

Dr. Dahouche

MCB

Examineur

Promotion : 2022 / 2023

Remerciements

Avant Tout, je remercie ALLAH de m'avoir donné la volonté et le courage au long de mon parcours d'études

Merci Dieu de m'avoir donné le désir d'avancer et de surmonter tout obstacle

Je voudrais dans un premier temps remercier ma très chère famille , ma mère ,ma tante et ma grande mère , qui ont toujours été là pour moi. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon encadreur de mémoire Mr. KRIM pour sa disponibilité

J'adresse mes sincères remerciements à toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions au long de mon parcours universitaire À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude

Dédicaces

*Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce
modeste travail*

À ma chère mère

À ma chère tante

À ma chère grande mère

*Qui n'ont jamais cessé de formuler des prières à mon
égard, de me soutenir et de m'épauler pour que je
puisse atteindre mes objectifs.*

Résumé :

Ces dernières années, les schémas d'accès multiple non orthogonal (NOMA) ont fait l'objet d'une attention particulière pour les réseaux cellulaires de cinquième génération (5G). La principale raison de l'adoption de l'accès multiple non orthogonal dans la 5G est sa capacité à desservir plusieurs utilisateurs en utilisant les mêmes ressources temporelles et fréquentielles en introduisant certaines interférences contrôlables au prix d'une légère augmentation de la complexité du récepteur. particulièrement certains schémas d'accès multiple non orthogonal (NOMA) ont récemment fait l'objet de recherches actives à savoir l'accès multiple à code clairsemé (SCMA), l'accès partagé multiutilisateur (MUSA) et l'accès multiple par répartition des motifs (PDMA). Dans ce mémoire, nous comparerons le taux réalisable offert par les schémas NOMA et OMA. Les résultats montrent que NOMA permet d'obtenir une capacité de canal meilleur que l'accès multiple orthogonal OMA . Nous présentons également une simulation de la performance du BER pour un système NOMA à trois utilisateurs, à partir des courbes obtenus, nous pouvons conclure que La performance du BER est affectée par le schéma d'allocation de puissance utilisé et aussi par l'état du canal .En outre, nous examinerons les principales caractéristiques des trois schémas NOMA typiques, à savoir SCMA, MUSA et PDMA. Et, nous comparons leurs performances en termes de taux d'erreur binaire (BER) sur la liaison montante. Les résultats de la simulation montrent que dans les canaux à évanouissement de Rayleigh typiques, le SCMA a les meilleures performances, tandis que les performances du MUSA et du PDMA sont très proches l'une de l'autre.

Mots clés : 5G, NOMA, Efficacité spectrale, SCMA,PDMA ,MUSA, SIC, BER, domaine de code , MATLAB Simulink

Abstract :

In recent years, non-orthogonal multiple access (NOMA) schemes have received a lot of attention for fifth generation (5G) cellular networks. The main reason for the adoption of non-orthogonal multiple access in 5G is its ability to serve multiple users using the same time and frequency resources by introducing some controllable interference at the cost of a slight increase in receiver complexity. In particular, some non-orthogonal multiple access (NOMA) schemes have recently been the subject of active research, namely sparse code multiple access (SCMA), multi-user shared access (MUSA), and pattern-division multiple access (PDMA). In this dissertation, we will compare the achievable rate offered by NOMA and OMA schemes. The results show that NOMA achieves better channel capacity than OMA orthogonal multiple access, we also present a simulation of the BER performance for a three-user NOMA system, based on the obtained curves, we can conclude that BER performance is affected by the power allocation scheme used and also by the transmission channel state. In addition, we will examine the main characteristics of the three typical NOMA schemes, namely SCMA, MUSA and PDMA. And, we compare their performance in terms of bit error rate (BER) on the uplink. The simulation results show that in typical Rayleigh fading channels, SCMA has the best performance, while the BER performance of MUSA and PDMA are very close to each other.

Keywords : 5G, NOMA, Spectral efficiency, SCMA,PDMA ,MUSA, SIC, BER, code domain , MATLAB Simulink

الملخص:

في السنوات الأخيرة حظيت مخططات الوصول المتعدد غير المتعامد باهتمام خاص لنشر الشبكات الخلوية من الجيل الخامس. والسبب الرئيسي لاعتماده هو قدرته على خدمة مستخدمي متعددين باستغلال نفس الوقت وموارد التردد من خلال إدخال بعض التداخل الذي يمكن التحكم فيه على حساب زيادة طفيفة في تعقيد جهاز الاستقبال وقد تم مؤخرا البحث في بعض مخططات الوصول المتعدد غير المتعامد بنشاط، بما في ذلك الوصول المتعدد بالرموز المتناثرة، الوصول المشترك متعدد المستخدمين والوصول المتعدد بتقسيم الأنماط. في هذه المذكرة، سنقارن السعة القابلة للتحقيق التي تقدمها مخططات الوصول المتعدد المتعامد والغير المتعامد، تظهر النتائج أن مخطط الوصول المتعدد غير المتعامد يحقق سعة قناة أفضل من مخطط الوصول المتعدد المتعامد، سنقدم أيضا تحليلا لمعدل خطأ البت بدلالة الطاقة المرسله لنظام الوصول المتعدد غير المتعامد لثلاثة مستخدمين، من الرسوم البيانية التي تم الحصول عليها، يمكننا أن نستنتج أن أداءه يتأثر بمخطط تخصيص الطاقة للمستخدم وأيضا بحالة قناة الإرسال. بالإضافة إلى ذلك سنلقي نظرة على السمات الرئيسية للمخططات النموذجية الثلاثة المذكورة سابقا، ونقارن أدائها من حيث معدل خطأ البت على الوصلة الصاعدة، حيث أظهرت نتائج المحاكاة أنه في قنوات رايلي النموذجية، يتمتع مخطط الوصول المتعدد بالرموز المتناثرة بأداء أفضل، في حين أن أداء مخططات الوصول المشترك متعدد المستخدمين والوصول المتعدد بتقسيم الأنماط قريب جدا من بعضهما البعض

الكلمات المفتاحية:

مجال الكود, الكفاءة الطيفية, 5G, NOMA, SCMA, PDMA, MUSA, SIC, BER, MATLAB Simulink

Liste des figures

Figure I.1: Le processus de la transmission et la réception

Figure I.2: Processus d'une chaîne de transmission numérique

Figure I.3: L'évolution des réseaux mobiles.

Figure I.4: Calendrier de l'ITU en parallèle avec le 3GPP

Figure I.5: L'évolution continue de la famille des télécommunications mobiles internationales (IMT)

Figure I.6: Les indicateurs de performance KPI

Figure I.7: Les déclinaisons des indicateurs clés de performance

Figure I.8: Les fréquences utilisés en 5G

Figure I.9 : Les modes de déploiement de la 5G

Figure I.10 : la formation de faisceaux de la 5G.

Figure II.I : chaîne de transmission pour un système sans fil

Figure II.2:La classification des schémas d'accès multiple

Figure II.3: les différents schémas d'accès multiple orthogonal

Figure II.4: l'accès multiple non orthogonal

Figure II.5: l'accès à ressource pour les deux systèmes OMA et NOMA

Figure II.6: Un exemple de codage SC ; (a) Constellation du signal de l'utilisateur 1

(b) Constellation du signal de l'utilisateur 2 ; (c) Constellation du signal superposé

Figure II.7: Exemple de décodage SC ; (a) décodage du signal de l'utilisateur1 (b) décodage du signal de l'utilisateur 2

Figure II.8: Deux émetteurs partageant un récepteur commun .

Figure II.9:Transmission OMA à deux utilisateurs sur la liaison montante

Figure II.10: Transmission NOMA à deux utilisateurs sur la liaison montante

Figure II.11: Transmission OMA à deux utilisateurs sur la liaison descendante

Figure II.12: Transmission NOMA à deux utilisateurs sur la liaison descendante

Figure II.13 : Régions de capacité en liaison descendante pour deux utilisateurs

Figure III.1 : Principes de base de la MUSA

Figure III.2: schéma d'un émetteur MUSA pour $j=6$ et $K=4$

Figure III.3 : Récepteur SIC basé sur MMSE

Figure III.4: Processus de transmission PDMA en liaison descendante

Figure III.5: Graphique du facteur MPA pour le schéma PDMA avec $J = 6$ et $K = 4$

Figure III.6: Multiplexage de code SCMA

Figure III.7 : Représentation de MPA sous forme de graphe factoriel.

Figure III.8 : Représentation du capacité de NOMA et OMA

Figure III.9 : Le processus du SIC des trois utilisateurs

Figure III.10: Représentation du BER de NOMA à 3 utilisateurs en fonction du puissance transmise

Figure III.11 : Représentation du BER de MUSA en fonction du SNR

Figure III.12: Représentation du BER de PDMA en fonction du SNR

Figure III.13: Représentation du BER de SCMA en fonction du SNR

Figure III.14 : Représentation du BER des trois schémas NOMA

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Les nouveaux usagers de chaque génération

Tableau I.2: La classification des différents indicateurs KPI

Tableau III.1:Principales caractéristiques des différents systèmes NOMA

Tableau III.2:Les récepteurs applicables aux schémas NOMA étudiés

Tableau III.3:Complexité de décodage des récepteurs NOMA typiques

Tableau III.4:Comparaison des performances des schémas NOMA

Tableau III.5:Caractéristiques des différents schémas NOMA.

Tableau III.6: Les distances des utilisateurs utilisés dans la simulation de la capacité

Tableau III.7 : les distances et les coefficients d'allocation de puissance utilisés dans la simulation du système NOMA à trois utilisateurs

Tableau III.8: Les paramètres de simulation des schémas typiques de NOMA

Liste des Acronymes

1G: First Generation

2G: Second Generation

3G: Third Generation

3GPP: 3rd Generation Partnership Project

4G: Fourth Generation

5G: Fifth Generation

ASK :Amplitude shift keying

BER: Bit Error Rate

CDMA: Code Division Multiple Access

CSI: Channel State Information

eMBB: Enhanced Mobile BroadBand

FSK : Frequency shift keying

FEC : Forward Error Correction

FDMA: Frequency Division Multiple Access

IMT-2020 : International Mobile Telecommunications-2020

IoT: Internet of Things

ITU: International Telecommunication Union

GPRS: General Packet Radio Service

GSM: Global System for Mobile Communications

LDS-OFDM: Low Density Spreading Orthogonal Frequency Division Multiplexing

LDS-CDMA: Low Density Spreading Code Division Multiple Access

LTE: Long Term Evolution

mMTC: massive Machine Type Communication

MIMO: Multiple Input Multiple Output

MMSE: Minimum Mean Square Error

MPA: Message Passing Algorithm

MU-MIMO: Multi-User Multiple Input Multiple Output

MUSA: Multi User Shared Access

NOMA: Non Orthogonal Multiple Access

NR: New Radio

OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access

OMA: Orthogonal Multiple Access

PSK : phase shift keying

PDMA: Pattern Division Multiple Access

PD-NOMA: Power Domain NOMA

QAM: Quadrature Amplitude Modulation

QPSK: Quadrature Phase Shift Keying

RACH: Random Access Channel

SCMA: Sparse Code Multiple Access

SINR: Signal to Interference plus Noise Ratio

SNR: Signal to Noise Ratio

TDMA: Time Division Multiple Access

UE: User Equipment

URLLC: Ultra Reliable and Low Latency Communications

Table des matières

Résumé	4
Liste des figures	6
Liste des tableaux	8
Liste des acronymes	9
Introduction générale	14
Chapitre I : Un aperçu de la technologie 5G	16
I.1 Introduction	17
I.2 Les télécommunications modernes	18
I.3 La chaîne de transmission numérique	18
I.4 L'évolution des réseaux mobiles	20
I.4.1 La 1G	20
I.4.2 La 2G	20
I.4.3 La 3G	21
I.4.4 Évolution de la 4G à la 5G	21
I.5 Organisations de normalisation	23
I.5.1 Third Generation Partnership Project : 3GPP	23
I.5.2 Internet Engineering Task Force	24
I.5.3 International Telecommunication Union	24
I.5.4 International Mobile Telecommunications	24
I.6 Les exigences de la 5G	25
I.6.1 Débit de données maximal	26
I.6.2 Débit de données expérimenté par l'utilisateur	26
I.6.3 Latence	26
I.6.4 Mobilité	26
I.6.5 Densité de connexion	26
I.6.6 L'efficacité énergétique	27
I.6.7 Efficacité du spectre	27
I.6.8 Capacité du trafic	27
I.7 Les cas d'utilisation de la 5G	27
I.7.1 Le Haut débit mobile amélioré	28
I.7.2 Communication de type machine massive	28
I.7.3 Communication ultra fiable à faible latence	28
I.8 Nouvelle Radio 5G NR	30

I.8.1	Les ondes millimétriques	30
I.8.2	LA 5G SUB-6	30
I.9	Les modes de déploiement de la 5G	31
I.9.1	Mode non autonome(Non-Stand-Alone)	31
I.9.2	Mode autonome (Stand Alone).....	31
I.10	Les différentes approches de la 5G	32
I.10.1	Ondes millimétriques	32
I.10.2	Bande submillimétrique ou térahertz	32
I.10.3	Petites cellules	32
I.10.4	MIMO massif	33
I.10.5	Formation de faisceaux ou beamforming	33
I.10.6	Technologie Duplex Intégral	34
I.11	Conclusion	35
Chapitre II : Étude approfondie de la technique NOMA.....		36
II.1	Introduction	37
II.2	Chaîne de transmission sans fil	38
II.2.1	Codage source	38
II.2.2	Codage canal	38
II.2.3	Unité de traitement du signal numérique	39
II.2.4	Modulateur Numérique	39
II.3	Canal radio mobile	39
II.4	L'évanouissement du canal	39
II.5	Propagation multi-trajets	40
II.6	L'ACCÈS MULTIPLE (MA)	40
II.7	L'accès multiple orthogonal (OMA)	41
II.8	L'accès multiple non orthogonal (NOMA).....	42
II.8.1	NOMA dans le domaine de puissance	43
II.8.2	NOMA dans le domaine du code	43
II.9	CONCEPTS DE BASE DU NOMA	44
II.9.1	Codage par superposition (SC).....	45
II.9.2	Annulation des interférences successives (SIC).....	46
II.10	Informations sur l'état du canal (CSI)	48
II.11	Modèle des systèmes OMA et NOMA	48
II.11.1	La liaison montante	48
II.11.2	La liaison descendante	51

II.12	Les avantages de NOMA	55
II.12.1	Capacité de connectivité	55
II.12.2	Réduction de la charge de signalisation et de la latence de transmission	55
II.12.3	Équité pour l'utilisateur et efficacité spectrale	56
II.12.4	Compatibilité.....	56
II.13	SOLUTIONS POTENTIELLES DE NOMA	56
II.13.1	NOMA-MIMO	56
II.14	Les défis de NOMA	57
II.15	: les schémas G-NOMA.....	58
II.16	Conclusion	59
Chapitre III : Étude des performances des schémas SCMA, MUSA et PDMA sous		
MATLAB		
III.1	Introduction	61
III.2	Les différents schémas typiques de NOMA	62
III.2.1	Le schéma MUSA	62
III.2.2	Le schéma PDMA	66
III.2.3	Le schéma SCMA	68
III.3	Comparaison entre les trois schémas NOMA.....	71
III.3.1	La complexité du récepteur	72
III.3.2	La complexité du conception	73
III.3.3	La capacité de surcharge	74
III.4	Scénarios adaptés	74
III.5	Simulation et résultats	76
□	Simulation de la capacité des systèmes OMA et NOMA	77
□	Simulation de la performance du BER pour un système NOMA à 3 utilisateurs : .	78
□	Simulation de la performance du BER pour les différents schémas NOMA : MUSA ,PDMA et SCMA.....	80
III.5.1	Conclusion	84
III.6	Conclusion générale et perspectives	84
III.7	Bibliographie	86

Introduction générale :

Depuis l'introduction du concept Communication de type machine massive (mMTC) dans les réseaux de 5^{ème} génération (5G), des efforts énormes ont été fait pour répondre aux demandes pressantes de ses applications tout en introduisant plusieurs technologies, qui offrent un débit de données élevé , une faible complexité du système et une consommation d'énergie efficace pour des objets à faible coût. Avec cette croissance rapide du nombre d'objets connectés, on peut s'interroger sur la capacité des mécanismes d'accès orthogonaux à satisfaire toutes les demandes de connexions simultanées du mMTC . En effet Les techniques d'accès multiple orthogonaux (OMA) ne sont pas suffisantes pour répondre à la demande croissante de connectivité des générations futures, car le nombre d'utilisateurs pris en charge est limité par le nombre d'éléments de ressource orthogonaux disponibles.

Pour relever les défis de la 5G, tels que l'efficacité spectrale, la connectivité massive et une latence réduite, les mécanismes d'accès multiple non orthogonaux (NOMA) ont été considérés comme une solution prometteuse., l'idée était de permettre à plusieurs utilisateurs de partager simultanément et non-orthogonalement la même ressource en utilisant différentes techniques de multiplexage des utilisateurs telles que des codes clairsemés, des séquences d'étalement ou des distributions de puissance différentes, ce qui augmente le nombre d'utilisateurs pris en charge. Mais, ils introduisent également des interférences inter-utilisateur importantes, nécessitant des techniques robustes de détection de signaux.

Ce mémoire fournit principalement une étude approfondie de la technique NOMA et présente également une analyse des performances des schémas NOMA qui ont particulièrement attiré l'attention de la communauté scientifique [64], à savoir le schéma d'accès multiple par code clairsemé (SCMA), l'accès partagé multi-utilisateurs (MUSA) et l'accès multiple par division de motif (PDMA). Pour mener à bien notre travail, nous l'avons divisé en trois chapitres :

Le 1^{er} chapitre présente en premier lieu l'évolution des réseaux mobiles. Ensuite il se concentre sur les principaux services des futurs réseaux 5G, à savoir eMBB, URLLC et mMTC. Ce chapitre introduit également les modes de déploiement de la 5G et les différentes technologies à adopter par les réseaux 5G pour répondre aux principales exigences et surtout les exigences du mMTC .

Le 2^{ème} chapitre s'intéresse à identifier cette nouvelle technique NOMA en expliquant ses principes de base: superposition des signaux et SIC dans les scénarios de liaison descendante et de liaison montante.

Le chapitre 3 présente une comparaison qualitative entre les trois schémas NOMA mentionnés ci-dessus sur différents points tels que la capacité de connectivité, la complexité de décodage et les scénarios les mieux adaptés. Ce chapitre présente également les résultats des simulations effectuées dans le cadre de ce mémoire.

Chapitre I

Un aperçu de La technologie 5G

I.1 Introduction

L'avènement des technologies 5G marque l'arrivée de la prochaine vague d'une société numérique connectée à l'échelle mondiale, Aujourd'hui, partout dans le monde, l'accès mobile à l'internet est en train de devenir un élément fondamental de la conduite des affaires dans tous les secteurs.

La 5G permet un nouveau type de réseau conçu pour connecter pratiquement tout le monde et tout, y compris les machines, les objets et les appareils avec des milliards d'appareils connectés (100 milliards d'appareils connectés d'ici 2030 [1]). La technologie sans fil 5G est destinée à offrir des vitesses de données plus élevées, une latence ultra faible, plus de fiabilité, une capacité réseau massive, une disponibilité accrue et une expérience utilisateur plus uniforme à un plus grand nombre d'utilisateurs.

Dans ce chapitre , nous nous intéressons d'abord à l'évolution des réseaux mobiles et les nouvelles usagers de chaque génération, Ensuite nous présentons la nouvelle technologie mobile 5G avec ses indicateurs de performances et les trois catégories principales assorties d'exigences strictes différentes à savoir le haut débit mobile amélioré (eMBB), les communications ultra fiables et à faible latence (URLLC) et les communications massives de type machine (mMTC) [1] ,Ainsi que les différentes technologies essentiels pour le déploiement de la technologie 5G.

I.2 Les télécommunications modernes :

Le secteur des télécommunications est en constante évolution, tout comme chaque aspect de la façon dont les humains communiquent. les défis du secteur des télécommunications changent rapidement et continuent d'évoluer Grâce à une planification minutieuse.

Les télécommunications modernes se concentrent sur les problèmes liés à la transmission de grands volumes d'informations sur de longues distances sans perte dommageable due au bruit et aux interférences. Les composants de base d'un système moderne de télécommunications numériques doivent être capables de transmettre des signaux vocaux, de données, de radio et de télévision. La transmission numérique consiste à faire transiter les informations sur le support physique de communication sous forme de signaux numériques.

I.3 La chaîne de transmission numérique :

Dans une liaison radio, les données numériques doivent subir un certain nombre de transformations avant transmission et une autre série de transformations inverses à la réception comme montré dans la Figure I.1. Tous les éléments de ce lien ont des descriptions mathématiques et des théorèmes qui leurs sont associés dans la théorie de l'information et qui régissent leur performance. [2]

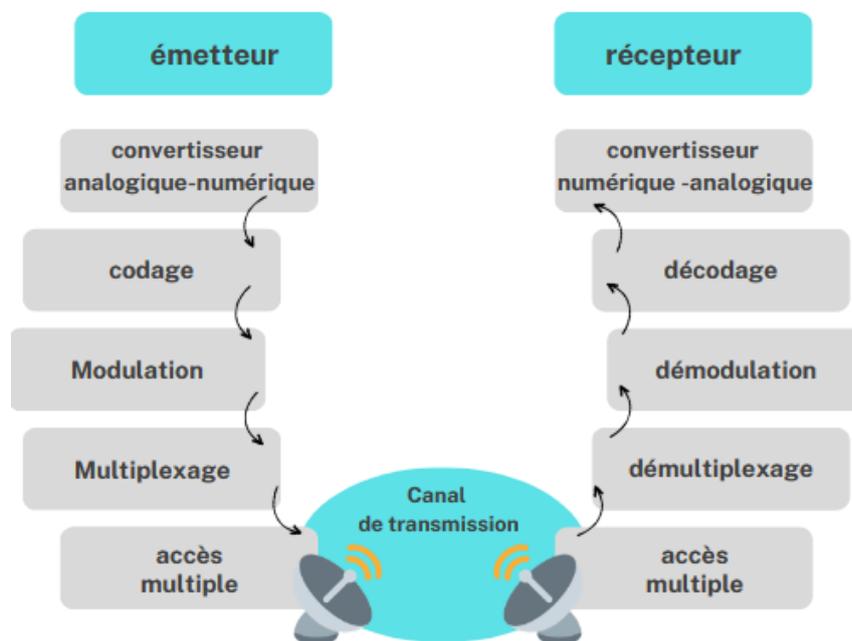


Figure I.1: Le processus de la transmission et la réception

Chapitre I : Un aperçu de la technologie 5G

Une représentation d'une chaîne de transmission numérique est illustrée sur la Figure I.2. Une chaîne de transmission est l'ensemble des dispositifs permettant le transport d'une information sur des distances souvent importantes. Elle comprend trois éléments essentiels : une source, un canal de transmission et un destinataire. Dans la Figure I.2, les blocs représentent une fonction, les flèches représentent la transmission de l'information.

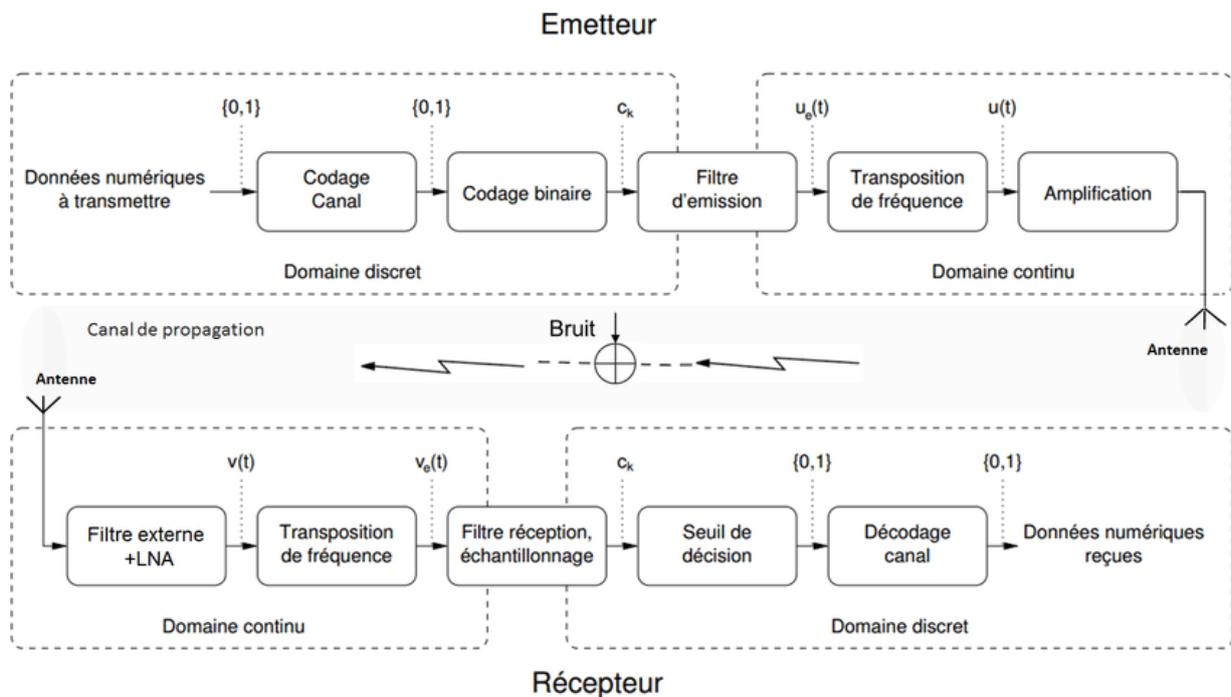


Figure I.2: Processus d'une chaîne de transmission numérique [3]

En partant de la source de données dans la partie émission, les données sont protégées en utilisant un codage de canal, qui rajoute de la redondance aux bits de données afin de réaliser la correction d'erreurs (FEC : Forward Error Correction) ou bien la détection d'erreur. Les bits encodés sont ensuite transmis à un bloc de décodage binaire qui se charge de transformer, par une modulation numérique les bits $\{0,1\}$ en symboles c_k qui seront associés à N bits et qui peuvent être réels ou complexes. Cette modulation Numérique peut se faire en amplitude (ASK), en fréquence (FSK), en phase (PSK) ou en amplitude et phase (QAM). Soit A_{CR} l'amplitude du signal et M le nombre de symboles possibles tels que $M = 2^N$.

Le déploiement de la 5G entraîne de nombreux changements et défis pour le secteur des télécommunications. La 5G vante des débits de données améliorés et une faible latence, et elle a le potentiel de changer l'industrie des télécommunications en profondeur par rapport à ses prédécesseurs 2G, 3G et la 4G. Pour comprendre la principale différence entre ces différentes technologies, voyons d'abord l'histoire de l'évolution des réseaux mobiles.

I.4 L'évolution des réseaux mobiles :

La technologie dans le domaine de la téléphonie mobile n'a pas cessé de se développer depuis ces 10 dernières années. En effet, en quelques décennies la qualité des signaux a connu de grands changements en passant de la 2G à la 5G.

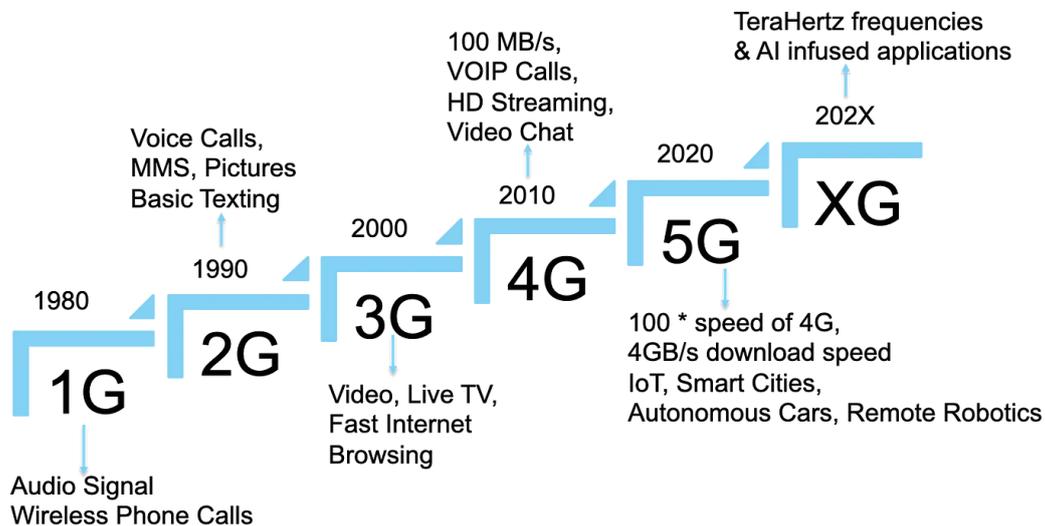


Figure I.3: L'évolution des réseaux mobiles.

I.4.1 La 1G :

Les réseaux mobiles de première génération sont apparus au Japon en 1979, avant de s'étendre à d'autres pays tels que les États-Unis (1980) et le Royaume-Uni (1985). Basés sur une technologie analogique connue sous le nom de système de téléphonie mobile avancé AMPS (ou Advanced Mobile Phone System) qui utilisait la modulation d'accès multiple par répartition en fréquence (ou FDMA), les réseaux 1G offraient une capacité de canal de 30 kHz et une vitesse de 2,4 kbit/s. Cependant, la technologie 1G souffrait d'un certain nombre d'inconvénients: La couverture était médiocre et la qualité sonore était faible. Il n'y avait pas de prise en charge de l'itinérance entre les différents opérateurs pire encore, les appels n'étaient pas cryptés.

I.4.2 La 2G

La 2G a été lancée sous la norme GSM en Finlande en 1991. Elle a marqué le passage de l'analogique au numérique. Pour la première fois, les appels pouvaient être cryptés et les appels vocaux numériques étaient nettement plus clairs, les gens pouvaient envoyer des messages texte (SMS), des messages photo et des messages multimédias (MMS) sur leur téléphone. Bien que les vitesses de transfert de la 2G n'aient initialement été que d'environ

Chapitre I : Un aperçu de la technologie 5G

9,6 kbit/s, les opérateurs se sont précipités pour investir dans de nouvelles infrastructures telles que les tours de téléphonie cellulaire mobiles. À la fin de l'ère, des vitesses de 40 kbit/s étaient réalisables et les connexions EDGE(Enhanced Data rates for GSM Evolution) aussi appelée 2,75G offraient des vitesses allant jusqu'à 500 kbit/s. Malgré des vitesses relativement lentes, la 2G a révolutionné le paysage commercial et changé le monde pour toujours.

I.4.3 La 3G :

L'arrivée en 2000 de la 3G, connue sous le nom d'UMTS (ou Universal Mobile Telecommunications System) en Europe et de CDMA2000 aux États-Unis, a annoncé un changement dans la façon dont les téléphones mobiles étaient utilisés et perçus par l'utilisateur final.

L'objectif principal de la (3G) était de prendre en charge les données à haut débit et la technologie (3G+) Aussi appelée HSDPA(High Speed Downlink Packet Access) permettait des débits de données allant jusqu'à 14 Mbit/s.

I.4.4 Évolution de la 4G à la 5G :

L'objectif de la cinquième génération 5G de technologies de télécommunications mobiles est de permettre un débit de données plus rapide, une plus grande densité de connexion et une latence beaucoup plus faible, ce qui représente une avancée considérable par rapport à la quatrième génération 4G de communications sans fil [4]. La vitesse de téléchargement passerait de 1 Gbit/s en LTE à 20 Gbit/s pour la transmission en liaison descendante et à 10 Gbit/s pour la liaison montante dans les réseaux 5G [5]. En outre, la 5G augmente la densité de connectivité pour couvrir au moins 10^6 dispositifs par km^2 [5]. Elle offre aussi un temps de latence extrêmement faible, pour la 4G la latence est d'environ 60 à 98 millisecondes (ms) [6], tandis que la 5G tombe à 1 ms, soit environ 100 fois moins. De plus, la 5G a le potentiel d'être un réseau cellulaire plus sûr que ses prédécesseurs grâce à sa sécurité intégrée [7].

La principale évolution par rapport à la 4G et la 4.5G (ou LTE Advanced) d'aujourd'hui est qu'au-delà de l'amélioration de la vitesse de transmission des données, ce sont les nouveaux cas d'utilisation de l'IoT(Internet of Things) et des communications critiques qui vont bénéficier des performances améliorées de la 5G. Par exemple, Certaines applications essentielles comme la voiture sans conducteur exigent une latence très réduite Pour toutes ces raisons, la 5G est devenue plus attrayante.

Chapitre I : Un aperçu de la technologie 5G

Chaque réseau sans fil de nouvelles générations décrites au-dessus intègre toute une série de nouveaux usages :

Tableau I.1 : Les nouveaux usagers de chaque génération [8]

La génération	L'année d'arrivée	Nouveaux usagers
1G	1980	ont permis aux services de téléphonie analogiques de bénéficier de la mobilité
2G	1990	ont été marqués par la naissance des services de téléphonie cellulaire numérique et des services de données de base (SMS, GPRS) ,ainsi que des services d'itinérance sur les réseaux (roaming)
3G	2000	ont amélioré l'expérience de l'Internet mobile, mais avec un succès limité pour déclencher l'adoption massive des services de données
4G	2010	ont introduit tous les services IP (Voix et Données), une expérience Internet haut débit, avec des architectures de réseaux et des protocoles unifiés
5G	2020	développent les services sans fil haut débit au-delà de l'Internet mobile jusqu'à l'IoT et les segments de communication critiques

I.5 Organisations de normalisation :

Parmi les travaux proposés par les organisations de normalisation les plus populaires dans le domaine de la communication dans le monde entier nous trouvons :

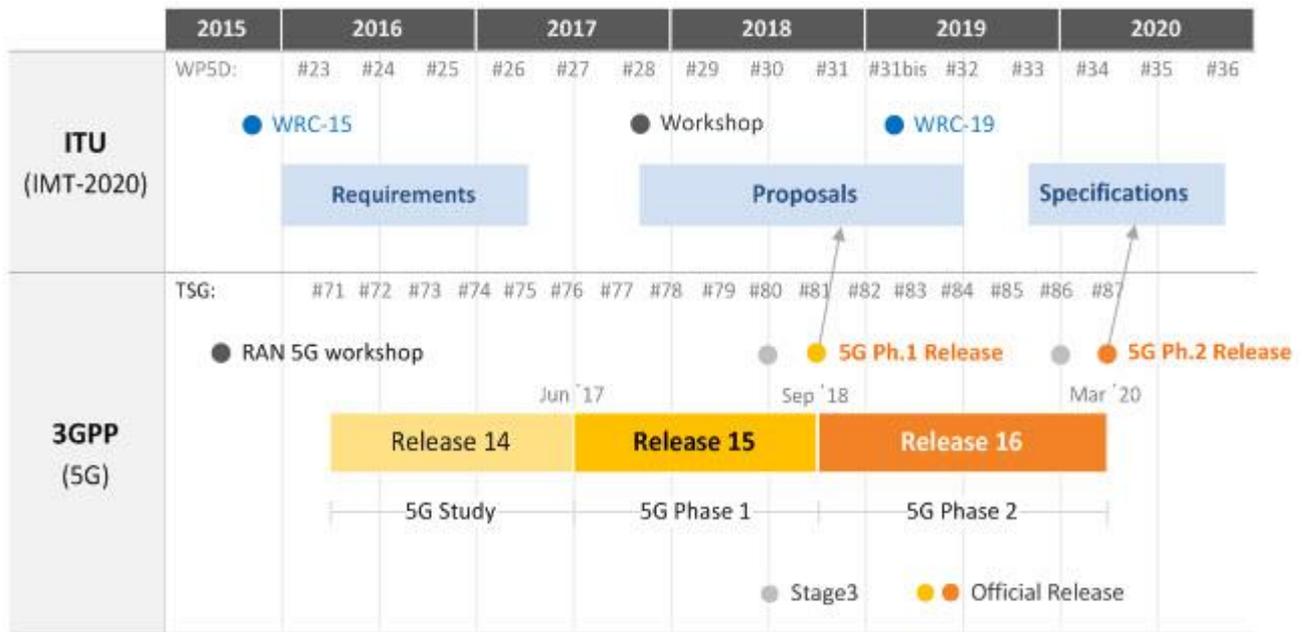


Figure I.4: Calendrier de l'ITU en parallèle avec le 3GPP [9].

I.5.1 Third Generation Partnership Project : 3GPP

Le 3GPP (ou Third Generation Partnership Project) réunit sept organismes d'élaboration de normes de télécommunications (ARIB, ATIS, CCSA, ETSI, TSDSI, TTA, TTC), connus sous le nom de « partenaires organisationnels » offrant à leurs membres un environnement stable pour produire les rapports et spécifications qui définissent les technologies 3GPP.

Pour la 5G, le 3GPP continue de produire et de publier des spécifications techniques comme il l'a fait pour la 3ème et la 4ème génération de réseaux mobiles. Fin 2017, les premières spécifications 5G ont été proposées par le 3GPP dans la version 15, y compris un ensemble de tâches et de points de contrôle pour guider les études en cours sur l'architecture 5G et le réseau NR. En plus de 83 études relatives à la version 16 et treize autres relatives à la version 17 couvrant des sujets aussi divers que le service prioritaire multimédia, les services de couche d'application V2X (Vehicle-to-everything), l'accès par satellite 5G, la prise en charge du réseau local en 5G et d'autres études [10] .

Chapitre I : Un aperçu de la technologie 5G

I.5.2 Internet Engineering Task Force :

L'IETF L'Internet Engineering Task Force (IETF), fondée en 1986, est le principal organisme de normalisation de l'Internet. L'objectif général de l'IETF est d'améliorer le fonctionnement de l'internet. Sa mission est de produire des documents techniques et d'ingénierie pertinents et de haute qualité qui influencent la façon dont les gens conçoivent, utilisent et gèrent l'internet de manière à en améliorer le fonctionnement. Ces documents comprennent des normes de protocole, les meilleures pratiques actuelles et des documents d'information de toutes sortes. l'IETF a collaboré avec le 3GPP pour le développement de certaines technologies 5G .De plus, de nouvelles technologies en cours de développement par l'IETF sont proposées, notamment les tests liés au routage, les protocoles pour les réseaux distribués, le routage par segment et le calcul de chemin afin de répondre aux contraintes de la 5G NR .

I.5.3 International Telecommunication Union :

l'Union internationale des télécommunications (ou L'ITU) est une institution spécialisée des Nations unies chargée de nombreuses questions liées aux technologies de l'information et de la communication. Elle a été créée le 17 mai 1865 sous le nom d'Union télégraphique internationale. Sa principale mission consiste à attribuer le spectre radioélectrique mondial et les orbites des satellites, et à élaborer des spécifications techniques afin de garantir l'interconnexion des réseaux de communication.

En 2015, lorsqu'elle a commencé à travailler sur la 5G, l'ITE a identifié trois bandes de fréquences qui seront utilisées pour cette nouvelle génération. Plus tard en 2016, les critères de sélection de l'interface radio à adopter dans les technologies 5G ont été améliorés. À la fin de la même année, afin d'atteindre des performances 5G plus élevées, l'ITU a conclu une étude préliminaire incluant l'architecture du réseau, les exigences et le cadre de gestion du réseau.

I.5.4 International Mobile Telecommunications :

International Mobile Telecommunications (ou IMT) est un terme générique utilisé par l'Union internationale des télécommunications (ITU) et les communautés des radiocommunications et de la normalisation pour désigner les systèmes mobiles à large bande.

Chapitre I : Un aperçu de la technologie 5G

L'IMT englobe trois grands ensembles de normes mobiles définies et élaborées par l'ITU, à savoir : IMT-2000, qui spécifie les normes de télécommunications mobiles de troisième génération, IMT-Advanced, qui prévoit les protocoles mobiles à large bande basés sur l'internet, connus sous le nom de "4G" et IMT-2020 qui englobe largement les réseaux et services mobiles "5G" d'aujourd'hui [11].

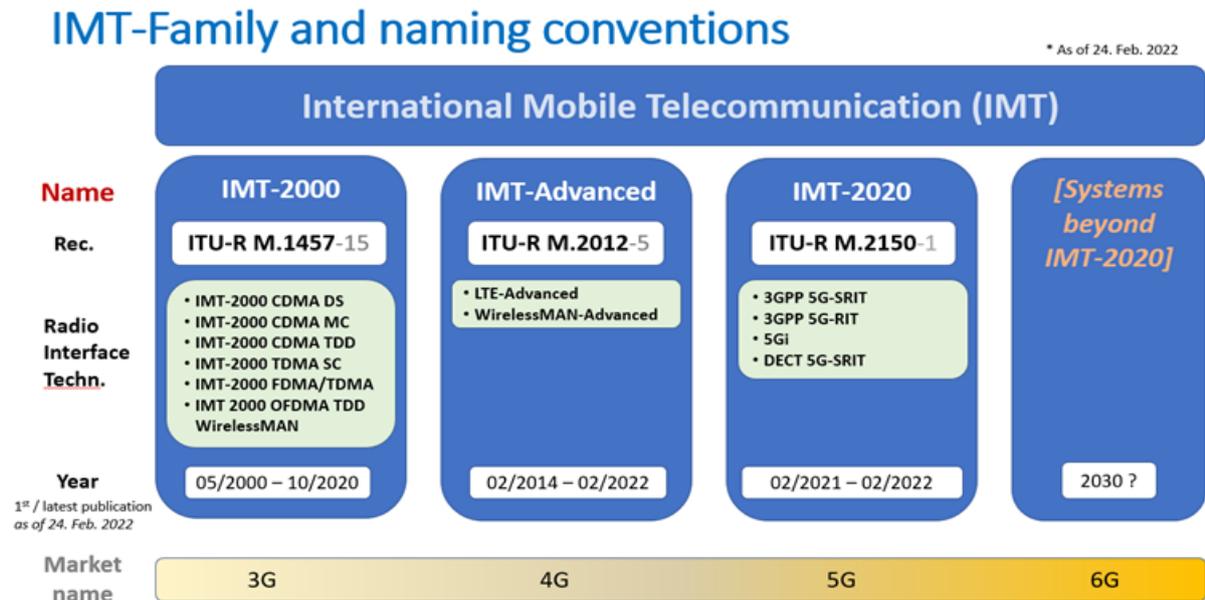


Figure I.5: L'évolution continue de la famille des télécommunications mobiles internationales (IMT) [12].

I.6 Les exigences de la 5G :

L'IMT-2020 (International Mobile Telecommunications-2020) normalise les exigences applicables à un réseau 5G. Il s'agit toutefois d'un travail effectué en collaboration par l'ITU et l'autre grand organisme de normalisation des communications cellulaires, le 3GPP. En juillet 2020, l'ITU a conclu que la 3GPP 5G pour les versions 15 et 16 répondait aux exigences des phases un et deux de la 5G, ce qui la rendait viable pour répondre aux exigences technologiques de la norme IMT-2020 [13].

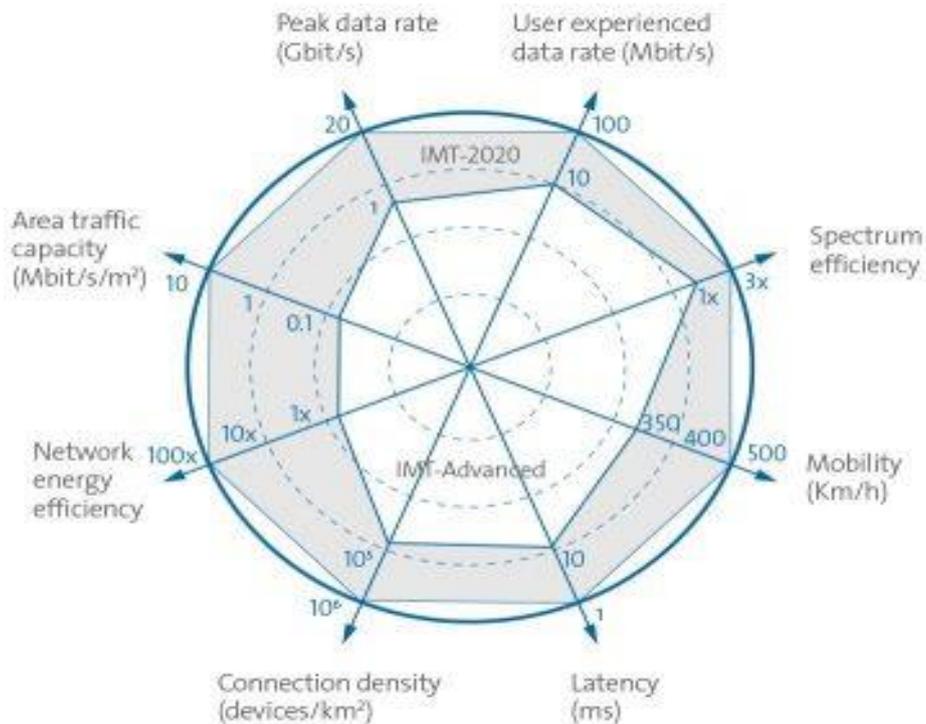


Figure I.6: Les indicateurs de performance KPI [14].

Ces exigences connues sous le nom de KPI (ou Key Performance Indicators), tels que fixés par l'IMT-2020, sont les suivants [5] :

I.6.1 Débit de données maximal :

Débit de données maximal réalisable dans des conditions idéales par utilisateur/appareil (en Gbit/s).

I.6.2 Débit de données expérimenté par l'utilisateur :

Débit de données réalisable qui est disponible de manière omniprésente dans la zone de couverture pour un utilisateur mobile/appareil (en Mbit/s ou Gbit/s).

I.6.3 Latence :

La contribution du réseau radio au temps écoulé entre l'envoi d'un paquet par la source et sa réception par le destinataire (en ms).

I.6.4 Mobilité :

Vise à prendre en charge une mobilité rapide des appareils jusqu'à 500 km/h.

I.6.5 Densité de connexion :

Nombre total de dispositifs connectés et/ou accessibles par unité de surface (par km²).

I.6.6 L'efficacité énergétique :

Est calculé comme le rapport entre l'efficacité spectrale et la puissance consommée. L'efficacité énergétique doit être garantie par une puissance de transmission optimale pour un trafic de données élevé et une consommation d'énergie minimale lorsqu'aucune donnée n'est disponible.

I.6.7 Efficacité du spectre :

L'efficacité spectrale fait référence à l'utilisation d'un spectre de fréquences radio de manière plus efficace en (bit/s/Hz).

I.6.8 Capacité du trafic :

Débit total du trafic desservi par zone géographique (en Mbit/s/m²).

I.7 Les cas d'utilisation de la 5G :

Le but de la 5G est d'offrir l'impression d'une connectivité fluide pour l'utilisateur malgré des obstacles apparents. Ces obstacles varient selon le scénario. Dans un environnement urbain, il peut s'agir de problèmes de congestion et d'interférences au sein du spectre utilisé. Dans un contexte rural il peut s'agir d'une insuffisance d'accès généralisée due à l'impossibilité d'atteindre la station de base locale. C'est pourquoi un grand nombre des paramètres de conception et des normes émises est lié aux paramètres de performance clés de la 5G. Ces KPI forment les limites supérieures des différents cas d'utilisation de la 5G. ils sont regroupés dans les grandes catégories suivantes :

➤ **EMBB :Enhanced Mobile Broadband**

Cette catégorie offre une connexion en ultra haut débit, nécessaire à certaines applications et services plutôt orientés grand public.

➤ **URLLC : Ultra Reliable Low Latency Communication**

Cette catégorie comprend les communications ultra-fiables et à très faible latence.

➤ **MMTC (Massive Machine Type Communication) ou Massive IoT (Internet Of Thing) :** Cette catégorie est nécessaire à l'augmentation exponentielle du nombre d'objets connectés.

Chapitre I : Un aperçu de la technologie 5G

I.7.1 Le Haut débit mobile amélioré :

Également connu sous le nom d'extrême haut débit mobile, l'eMBB est adapté aux cas d'utilisation axés sur les données qui nécessitent des débits élevés dans une vaste zone de couverture. L'eMBB prend en charge des connexions stables avec des débits de pointe très élevés, ainsi que des débits modérés pour des centaines d'utilisateurs en bordure de cellule dans des environnements à fort trafic de données. La capacité eMBB est considérée comme la première phase des réseaux 5G, Elle fait partie des premiers services livrés en 2020. Selon Ericsson, environ 1,9 milliard d'abonnés 5G sont attendus pour les services eMBB d'ici 2024 [15] .

I.7.2 Communication de type machine massive :

Le futur réseau cellulaire devrait évoluer considérablement au cours des prochaines décennies en raison de la multiplicité des services demandés tels que le réseau intelligent, la gestion du trafic et du stationnement, la ville intelligente, etc..... Plus précisément, le nombre d'appareils connectés va augmenter de manière significative pour atteindre 100 milliards d'appareils connectés dans le monde d'ici 2030 [16] . En fait, la capacité MMTC, également connue sous le nom d'IoT massif est conçue pour gérer un grand nombre de dispositifs à faible coût avec des exigences strictes en termes de taille de paquet, de consommation d'énergie et de fréquence de transmission [17] .

I.7.3 Communication ultra fiable à faible latence :

L'URLLC est un scénario d'utilisation essentiel pour la 5G , il a été introduit dans la phase initiale de l'étude 5G dans la version 15 [18] . Il a ensuite été enrichi de nouvelles fonctionnalités lors de la deuxième phase de l'étude 5G dans la version 16 [19] . L'URLLC assure la transmission de données en quelques millisecondes. Et comme son nom l'indique, il assure une fiabilité ultra-haute du réseau qui est supérieure à 99,999 % [20] . Cette catégorie est principalement utilisée dans le cas d'utilisation de missions critiques telles que la chirurgie à distance, le système de transport intelligent [21] , etc...

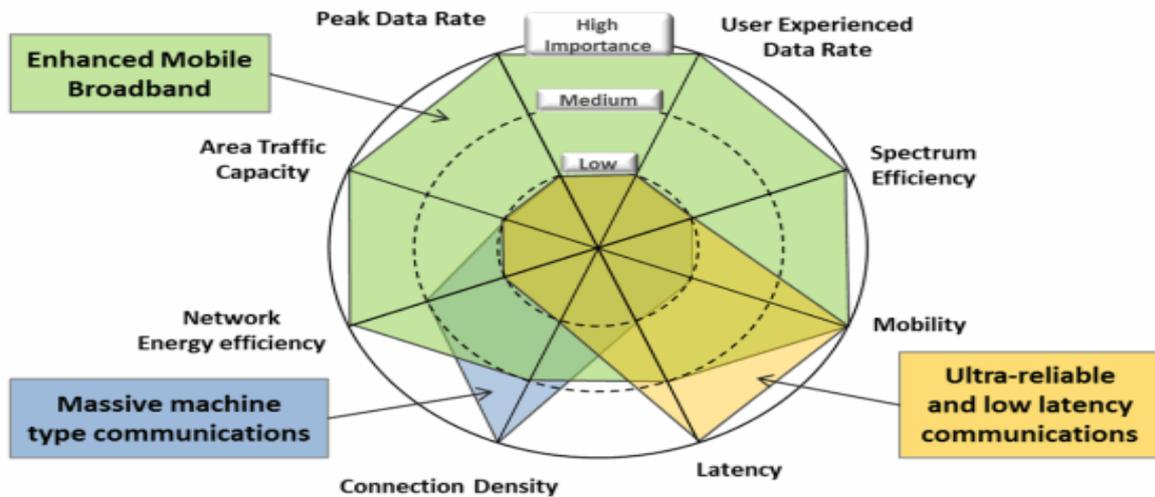


Figure I.7: Les déclinaisons des indicateurs clés de performance [22]

Tableau I.2: La classification des différents indicateurs KPI [23]

Type d'exigence de performance 5G	Exigences minimales KPI	Catégorie
Débit de données maximal	<ul style="list-style-type: none"> ○ Liaison descendante : 20 Gbps ○ Liaison montante : 10 Gbps 	EMBB
Débit de données expérimenté par l'utilisateur	<ul style="list-style-type: none"> ○ Liaison descendante : 100 Mbps ○ Liaison montante : 50 Mbps 	EMBB
Latence	<ul style="list-style-type: none"> ○ 4 ms pour eMBB ○ 1 ms pour URLLC 	EMBB URLLC
Mobilité	<ul style="list-style-type: none"> ○ Urbain dense : jusqu'à 30 Km/h ○ Rural : jusqu'à 500 Km/h 	EMBB
Densité de connexion	<ul style="list-style-type: none"> ○ 1×10^6 dispositifs/Km² 	MMTC
L'efficacité énergétique	<ul style="list-style-type: none"> ○ 90% réduction de la consommation d'énergie 	EMBB
Efficacité du spectre maximale	<ul style="list-style-type: none"> ○ Liaison descendante : 30 bits/sec/Hz ○ Liaison montante : 15 bits/sec/Hz 	EMBB
Capacité de trafic de la zone	<ul style="list-style-type: none"> ○ Liaison descendante : 10 Mbits/sec/m² ○ dans un point d'accès intérieur ○ (environnement d'essai EMBB) 	EMBB

I.8 Nouvelle Radio 5G NR :

La 5G NR est une nouvelle interface radio en cours de développement pour la 5G, Une interface radio est la partie radiofréquence entre l'appareil mobile et la station de base active qui peut changer au fur et à mesure que l'utilisateur est en déplacement. Cette nouvelle interface est une descendante de l'interface radio LTE qui offre :

Deux modes d'implémentation appelés **F1** et **F2** :

- Les fréquences F1 prennent en charge le spectre inférieur à 6 GHz, également appelé inférieur à 6 GHz.
- Les fréquences F2 prend en charge le spectre à partir de 24 GHz, également appelé ondes millimétriques ou mmWave.



Figure I.8: Les fréquences utilisés en 5G [24]

I.8.1 Les ondes millimétriques :

Les ondes millimétriques, ou mmWave, sont une nouvelle gamme de fréquences utilisées pour la 5G qui se trouvent sur la tranche des plus hautes fréquences des ondes radioélectriques avec une longueur d'onde s'étalant de 1 à 10 mm, et une fréquence allant de 30-300 GHz . Ces ondes portent en elles toutes les promesses de la nouvelle génération des télécommunications, que ce soient les débits de plusieurs Go/s ou la latence de 1 ms en revanche les ondes millimétriques ne parcourent que de courtes distances et sont sensibles aux conditions météorologiques et aux obstacles tels que les bâtiments, les fenêtres, les murs et les feuilles. C'est pourquoi les transmissions en visibilité directe sont privilégiées.

I.8.2 LA 5G SUB-6 :

La 5G sub-6 désigne les fréquences utilisées en 5G et sous la barre des 6 GHz. Ce sont des fréquences permettant une meilleure portée que les ondes millimétriques, mais un débit maximal plus faible. Elles regroupent à la fois les bandes moyennes, qui sont nouvelles, et les bandes basses fréquences, qui réutilisent des fréquences utilisées par la 4G LTE.

I.9 Les modes de déploiement de la 5G :

la 5G est une mise à jour technologique de la 4G LTE et peut réutiliser les mêmes bandes de fréquences que cette dernière. Grâce à cette mise à jour, un smartphone 5G peut bénéficier d'un meilleur débit qu'un smartphone 4G pourtant connecté à la même antenne et en utilisant la même fréquence. En ce qui concerne l'infrastructure des réseaux 5G, cette dernière peut être déployée selon deux modes de déploiement [25] :

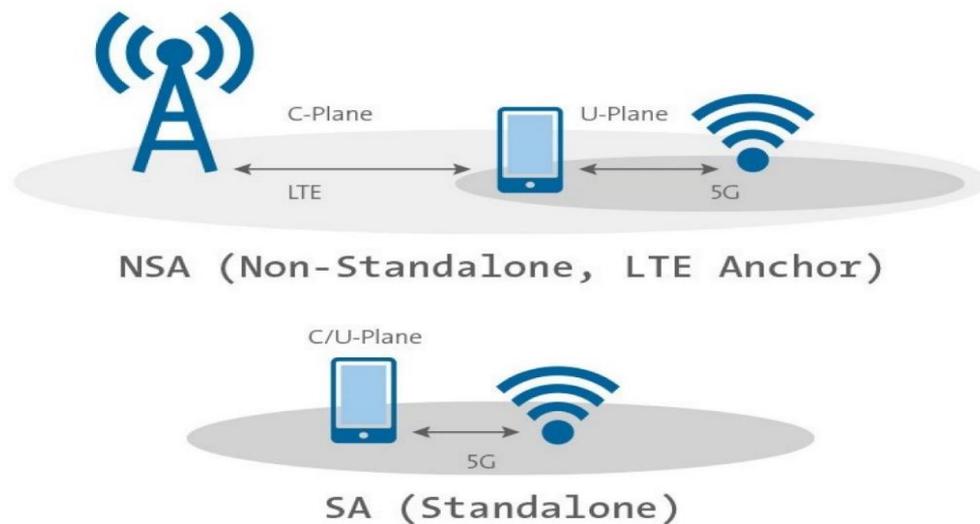


Figure I.9 : Les modes de déploiement de la 5G [24].

I.9.1 Mode non autonome(Non-Stand-Alone) :

C'est la première version commercialisée de la nouvelle interface radio 5G NR. Il exploite le réseau central 4G existant avec des stations de base 5G. L'architecture du mode non autonome est illustrée à la figure I.9 Elle permet de réduire le coût de déploiement de la 5G et d'accélérer sa commercialisation .

I.9.2 Mode autonome (Stand Alone):

Il repose sur un déploiement complet des réseaux 5G indépendamment de l'infrastructure 4G, comme le montre la figure I.9 . Ce mode assure la prise en charge de toutes les caractéristiques de la 5G en bénéficiant pleinement de ses nouvelles fonctionnalités.

Chapitre I : Un aperçu de la technologie 5G

I.10 Les différentes approches de la 5G :

Pour faire des réseaux 5G une réalité, de nombreuses idées avancées ont été proposées et analysées ces dernières années. Les principales technologies habilitantes qui ont été envisagées pour les systèmes 5G comprennent les ondes millimétriques, les ondes térahertz, les petites cellules, la formation de faisceaux, la technologie duplex intégral, le MIMO massif.

I.10.1 Ondes millimétriques :

De nombreux aspects des ondes millimétriques ont été publiés ces dernières années [26]. Les ondes millimétriques peuvent fournir une bande passante dix fois supérieure à celle de l'ensemble de la bande cellulaire 4G. Ces ondes à haute fréquence sont utilisées dans certaines applications satellitaires. Il y a cependant un inconvénient majeur aux ondes millimétriques, elles ne peuvent pas facilement traverser les bâtiments ou les obstacles et elles peuvent être absorbées par le feuillage et la pluie. C'est pourquoi les réseaux 5G augmenteront probablement les tours cellulaires traditionnelles avec une autre nouvelle technologie, appelée petites cellules.

I.10.2 Bande submillimétrique ou térahertz :

La fréquence élevée des ondes térahertz permet d'envisager le développement de systèmes de télécommunication à très haut débit, notamment dans le cadre du développement des technologies 5G et de la future 6G, la bande THz présente de nombreux avantages, tels que le déploiement sans interférence, l'évolutivité, le renforcement de la sécurité, la disponibilité de nouvelles fréquences, la faible consommation d'énergie, la taille réduite des antennes et la focalisation des faisceaux [27].

I.10.3 Petites cellules :

Les petites cellules sont de minuscules stations de base à faible puissance qui peuvent être placées tous les 100 mètres pour couvrir de petites zones géographiques. Cette structure de réseau radicalement différente devrait permettre une utilisation plus ciblée et plus efficace du spectre.

Avoir plus de stations signifie que les fréquences qu'une station utilise pour se connecter à des appareils dans une zone peuvent être réutilisées par une autre station dans une zone différente pour servir un autre client. Mais le nombre de petites cellules nécessaires à la construction d'un réseau 5G peut rendre difficile sa mise en place dans les zones rurales.

I.10.4 MIMO massif :

Les développements technologiques récents ont fait de Massive MIMO l'option privilégiée pour les déploiements à grande échelle des réseaux mobiles 5G, ils ont été largement utilisés pour obtenir une efficacité spectrale et énergétique élevée. Avant l'introduction de la technologie MIMO, on utilisait principalement des systèmes à entrée unique et à sortie unique SISO, dont le débit était très faible et qui ne pouvaient pas prendre en charge un grand nombre d'utilisateurs avec une grande fiabilité. Pour répondre à la demande massive des utilisateurs, plusieurs nouvelles technologies MIMO ont été développées, telles que la MIMO mono-utilisateur (SU-MIMO) , la MIMO multi-utilisateur (MU-MIMO) [28] et la MIMO en réseau .

Massive MIMO semble très prometteur pour l'avenir de la 5G. Cependant, l'installation de beaucoup plus d'antennes pour gérer le trafic cellulaire provoque également plus d'interférences si ces signaux se croisent. C'est pourquoi les stations 5G doivent intégrer la formation de faisceaux (le beamforming).

I.10.5 Formation de faisceaux ou beamforming :

La formation de faisceaux est la capacité de diriger l'alimentation radio à travers le canal radio vers un récepteur spécifique, c'est d'aider la station de base à trouver un itinéraire approprié pour acheminer les données vers l'utilisateur et réduit également les interférences avec les utilisateurs proches le long de l'itinéraire [29] . Pour les systèmes MIMO massifs, la formation de faisceaux permet d'accroître l'efficacité du spectre, et pour les ondes millimétriques, elle permet d'augmenter le débit de données. Bien que souvent très efficace, la transmission de puissance dans un seul sens n'offre pas toujours une solution optimale.

Dans les scénarios à trajets multiples, où le canal radio comprend plusieurs chemins de propagation de l'émetteur au récepteur par diffraction autour des coins et des réflexions contre des bâtiments ou d'autres objets, il est avantageux d'envoyer le même flux de données dans plusieurs chemins différents (direction et/ou polarisation) avec des phases et des amplitudes contrôlées pour qu'elles s'ajoutent de manière constructive au récepteur.

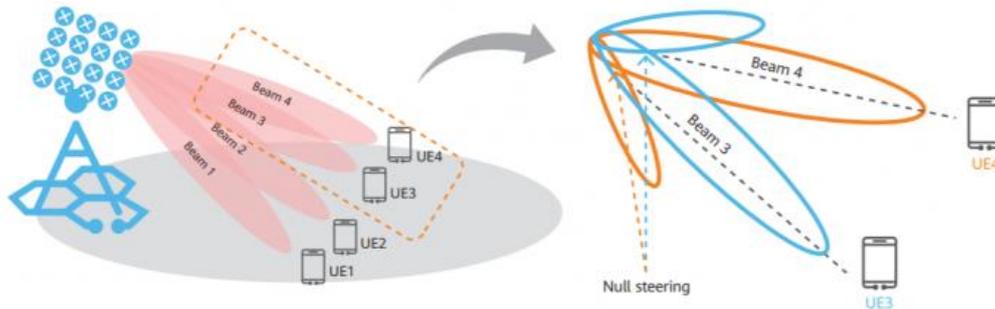


Figure I.10 : la formation de faisceaux de la 5G [30] .

I.10.6 Technologie Duplex Intégral :

En général, la transmission et la réception sans fil ne se font pas sur les mêmes bandes de fréquences pour éviter les interférences. Tout système bidirectionnel doit donc séparer les canaux de liaison montante et descendante en utilisant le domaine temporel ou fréquentiel pour obtenir des signaux orthogonaux ne provoquant pas d'interférences. Avec la 5G, un émetteur-récepteur pourra transmettre et recevoir des données en même temps, sur la même fréquence. L'un des inconvénients de la technologie duplex intégral est qu'elle augmente les interférences du signal, ce que l'on appelle l'écho gênant [31] .

I.11 Conclusion :

Comme nous l'avons vu dans ce chapitre que l'arrivée de la 5G permettra de répondre aux limites de la précédente génération, la 4G, en relevant trois défis principaux que sont : l'augmentation exponentielle d'objets connectés, la capacité à fournir un accès aux réseaux et un débit suffisant qui offre une meilleure expérience utilisateur, et enfin, palier les trop longs délais de latence pour des services innovants qui requerront des temps de réaction à l'échelle de la milliseconde, pour tous ces raisons il faut accueillir avec enthousiasme l'arrivée à maturité technologique de ce nouveau standard.

Le chapitre suivant sera consacré à l'étude de la technique NOMA et aussi à la comparaison entre les deux techniques d'accès multiple OMA et NOMA sur la base de critères spécifiques tels que la capacité du système et la qualité de service offerte.

Chapitre II

Étude approfondie de la technique NOMA

II.1 Introduction:

Comme expliqué dans le chapitre précédent, la connectivité massive est l'une des principales exigences de la 5G et au-delà. L'une des clés pour atteindre cet objectif est de permettre à plusieurs dispositifs d'accéder efficacement et simultanément aux mêmes ressources. Cette approche est appelée accès multiple. Historiquement, la proposition de nouvelles techniques d'accès multiple au cours des différentes générations a été un élément clé de l'évolution des systèmes de communication sans fil, y compris FDMA pour 1G, TDMA pour 2G, CDMA pour 3G. Cependant, les schémas d'accès multiple les plus avancés qui ont été proposés pour la 4G LTE, tels que l'OFDMA [32] et le Single Carrier FDMA (SC-FDMA) [33], ne peuvent plus répondre aux besoins actuels des nouvelles générations de communication sans fil en termes de trafic de données et de connectivité massive.

La NOMA est une technologie plus récente qui permet d'obtenir une meilleure efficacité spectrale et de prendre en charge un plus grand nombre d'utilisateurs dans la même bande de fréquences. Dans la 5G, la NOMA devrait jouer un rôle crucial pour répondre à la demande croissante de transmission de données sans fil à haut débit. La NOMA peut être utilisée dans une variété d'applications 5G, y compris les communications massives de type machine, les communications ultra-fiables à faible latence et le haut débit mobile amélioré.

II.2 Chaîne de transmission sans fil :

La chaîne de transmission sans fil est le processus par lequel les données sont transmises à travers un réseau sans fil. Elle se compose de plusieurs éléments clés qui travaillent ensemble pour permettre l'envoi et la réception des données, les éléments clés de la chaîne de transmission sans fil comprennent [34] :

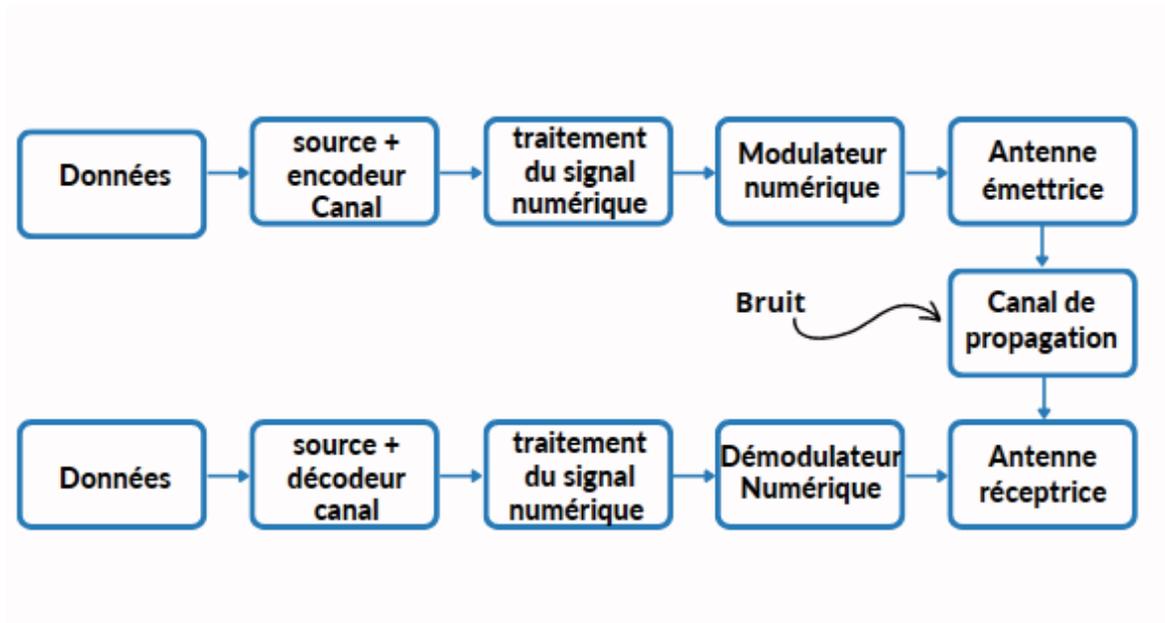


Figure II.1: chaîne de transmission pour un système sans fil

II.2.1 Codage source :

Le codage de source est une technique de compression de données qui permet de réduire la quantité d'informations nécessaires pour stocker ou transmettre un signal numérique. Il est basé sur la théorie de l'information et utilise des algorithmes de compression pour éliminer les redondances et les informations inutiles présentes dans les données. Les algorithmes de compression peuvent être divisés en deux catégories principales : les algorithmes de compression sans perte et les algorithmes de compression avec perte.

II.2.2 Codage canal :

Un codeur canal est un système qui encode les données à transmettre en ajoutant des bits de redondance pour détecter et corriger les erreurs de transmission qui peuvent survenir dans les canaux de communication. Il est utilisé dans les systèmes de communication pour améliorer la qualité de transmission des signaux numériques.

Chapitre II : Étude approfondie de la technique NOMA

II.2.3 Unité de traitement du signal numérique :

Une unité de traitement du signal numérique est un composant électronique qui traite les signaux numériques en utilisant des algorithmes mathématiques pour effectuer des opérations telles que :

- Filtrage : utilisé pour supprimer les bruits et les interférences des signaux numériques.
- Modélisation : utilisé pour modéliser les signaux et extraire des informations utiles, telles que les paramètres, les caractéristiques, les propriétés, etc.
- Détection de motifs : utilisé pour détecter des motifs dans les signaux numériques, tels que les pics, les creux, les fréquences, etc...

II.2.4 Modulateur Numérique :

un modulateur numérique est un dispositif électronique utilisé dans les systèmes de communication numériques pour convertir des signaux numériques en signaux analogiques pouvant être transmis sur un canal de communication sans fil.

Ce processus est inversé au récepteur qui va recevoir, démoduler et décoder les signaux transmis par l'émetteur, afin de récupérer les données transmises.

II.3 Canal radio mobile :

un canal radio mobile est un canal de communication radio qui est utilisé dans les systèmes de communication mobile pour transmettre des signaux entre les stations de base et les terminaux mobiles. Les canaux radio mobiles sont caractérisés par des variations de propagation du signal radio dues à des facteurs tels que les obstacles physiques, les réflexions, les diffractions et les interférences. Les canaux radio mobiles sont souvent modélisés comme des canaux de propagation à trajet multiple, et sont caractérisés par des phénomènes d'évanouissement qui doivent être pris en compte pour assurer une transmission de signal efficace et fiable.

II.4 L'évanouissement du canal :

L'évanouissement du canal de transmission, également connu sous le nom de fading, est un phénomène dans lequel la puissance du signal radio varie en raison de la propagation du signal à travers un canal de transmission. L'évanouissement peut être causé par des obstacles physiques, des réflexions, des diffractions ou des interférences, qui peuvent altérer la forme et la qualité du signal radio.

Chapitre II : Étude approfondie de la technique NOMA

les types d'évanouissement les plus courants sont :

- Évanouissement à grande échelle : il s'agit des fluctuations de la puissance du signal mesuré lors d'un déplacement à grande distance. L'évanouissement à grande échelle est causé par la diffraction ou la réfraction des signaux radio, ainsi que par les effets de la topographie.
- Évanouissement à petite échelle : il s'agit d'un type d'évanouissement qui se produit sur de courtes distances, Cela est dû au fait que le signal reçu est la somme de nombreux signaux venant des différents chemins que peut emprunter les ondes radios. Ces chemins, de longueurs variables, sont dus aux réflexions causées par les objets présents dans l'environnement.

II.5 Propagation multi-trajets :

Une propagation multi trajets se produit lorsque les signaux prennent différents chemins d'une source à une destination, plutôt qu'un chemin en visibilité directe LOS (line of sight). Cela peut se dérouler lorsque le signal se réfléchit sur des surfaces telles que des bâtiments, des terrains ou d'autres obstacles, ou lorsqu'il se diffracte autour d'eux. Les chemins multiples peuvent entraîner des interférences et une dégradation du signal, ce qui peut nuire à la qualité et à la fiabilité des systèmes de communication sans fil.

II.6 L'ACCÈS MULTIPLE (MA) :

L'accès multiple est une technique qui permet à plusieurs utilisateurs mobiles d'accéder efficacement aux ressources limitées du réseau et d'obtenir des performances maximales du système. Les techniques d'accès multiple peuvent être classées en deux grandes catégories à savoir l'accès multiple orthogonal (OMA) et l'accès multiple non orthogonal (NOMA) [35].

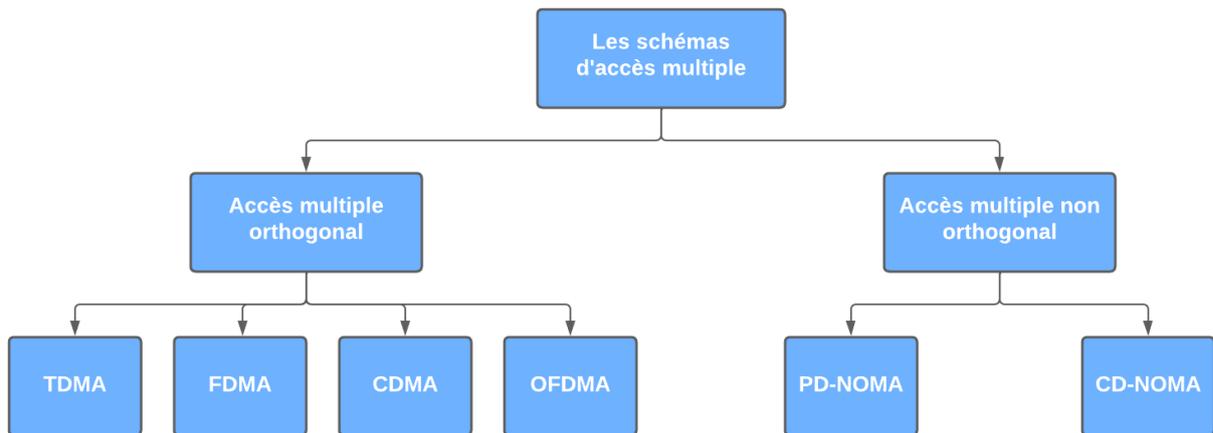


Figure II.2: La classification des schémas d'accès multiple

II.7 L'accès multiple orthogonal (OMA) :

Un schéma orthogonal permet à un récepteur parfait de séparer entièrement les signaux non désirés du signal désiré, les signaux des utilisateurs sont transmis de manière unique sur différents intervalles de temps pour le schéma TDMA ou sur différentes bandes de fréquences pour le schéma FDMA.

Dans le système d'accès multiple par répartition en code (CDMA), utilisé dans les réseaux 3G, tous les utilisateurs sont autorisés à partager simultanément toutes les ressources temps-fréquence en utilisant différentes séquences d'étalement, telles que les séquences Walsh-Hadamard. Tandis que le schéma OFDMA, utilisé dans les réseaux 4G, est considéré comme une combinaison des schémas TDMA et FDMA, Les ressources OFDMA sont divisées simultanément et orthogonalement en temps et en fréquence.

Toutes les technologies précédentes souffrent d'une surcharge de signalisation élevée pour l'attribution des ressources et d'une capacité de connectivité limitée. Par conséquent, les schémas OMA ne sont pas vraiment adaptés pour répondre aux exigences du mMTC, notamment en ce qui concerne la densité de connexion massive. Pour faire face à ces limitations, les systèmes NOMA[36] ont été présentés comme une solution prometteuse.

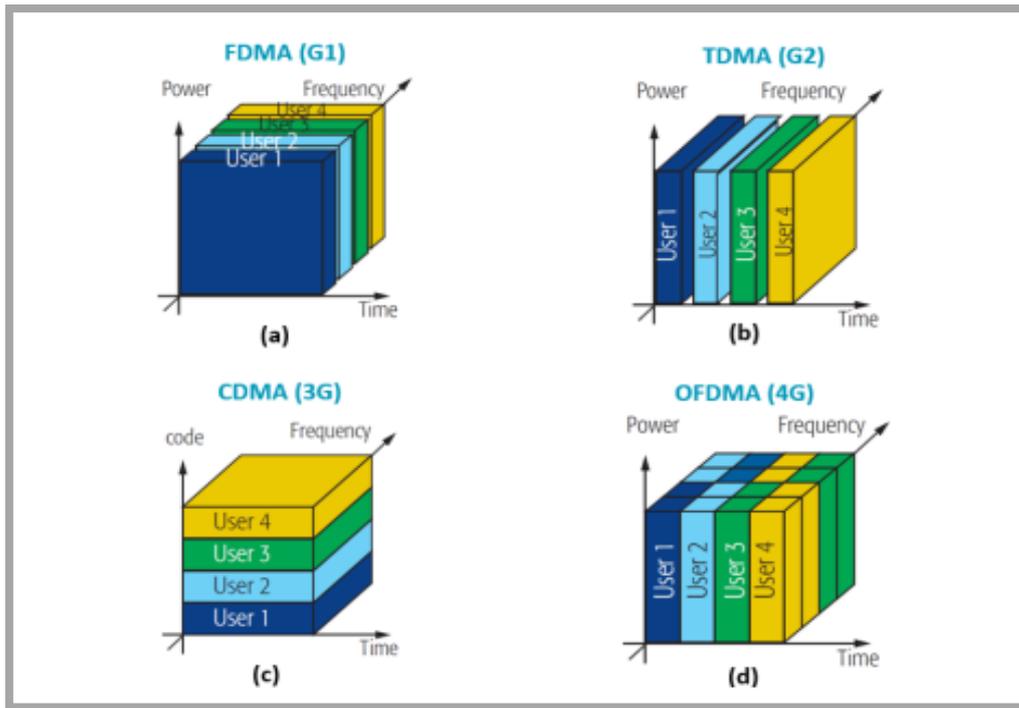


Figure II.3: les différents schémas d'accès multiple orthogonal [37]

II.8 L'accès multiple non orthogonal (NOMA)

L'accès multiple non orthogonal (NOMA) a récemment fait l'objet d'une attention considérable en tant que technique prometteuse pour les réseaux mobiles de cinquième génération (5G) en raison de son efficacité spectrale supérieure.

En 2017, le 3GPP LTE Advanced a proposé le NOMA comme une technologie prometteuse pour répondre aux besoins actuels des nouvelles générations de communications sans fil en termes de trafic de données et de connectivité massive en accueillant plusieurs utilisateurs au sein d'un même réseau d'accès multiple[38]

L'idée centrale de la NOMA est de multiplexer différents flux de données sur les mêmes ressources radio et d'utiliser un algorithme de détection multiutilisateur au niveau du récepteur pour récupérer les flux de signaux des utilisateurs multiples.

Contrairement aux systèmes orthogonaux les systèmes non orthogonaux permettent une corrélation croisée non nulle entre les signaux de différents utilisateurs ce qui introduit des interférences, L'objectif principal de la conception du NOMA est d'introduire des interférences mutuelles contrôlables entre les utilisateurs afin d'obtenir un bon compromis entre le gain de multiplexage et la fiabilité de la détection

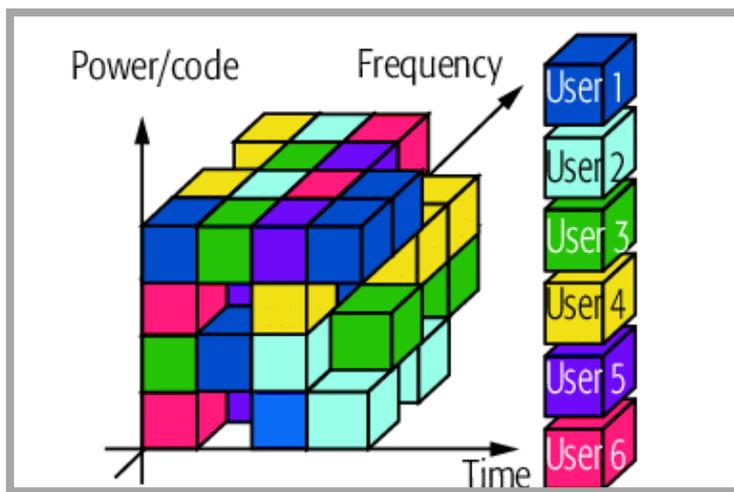


Figure II.4: l'accès multiple non orthogonal [37]

Les techniques de NOMA disponibles peuvent être divisées en deux catégories, à savoir le NOMA dans le domaine de la puissance et le NOMA dans le domaine du code [36]

II.8.1 NOMA dans le domaine de puissance :

Le schéma PD-NOMA est l'une des premières solutions NOMA proposées pour le futur réseau d'accès radio. Il a été proposé à l'origine par l'opérateur japonais NTT DoCoMo en 2013 [39]. L'idée de base du PD-NOMA est de permettre la prise en charge d'un plus grand nombre d'accès multiples en employant une nouvelle dimension : la puissance du signal [40]. Le PD-NOMA repose sur la combinaison de deux techniques clés, à savoir le codage par superposition au niveau de l'émetteur et principalement, l'annulation successive des interférences (SIC) du côté du récepteur, afin de séparer les informations relatives aux utilisateurs.

II.8.2 NOMA dans le domaine du code :

Le concept de CD-NOMA a été inspiré par les systèmes CDMA classiques qui sont principalement construits sur l'idée de permettre à plusieurs utilisateurs de partager le même élément de ressource en utilisant une séquence d'étalement unique propre à l'utilisateur. Contrairement aux systèmes CDMA, la séparation des utilisateurs NOMA au niveau du récepteur peut nécessiter des techniques sophistiquées, telles que SIC et MPA, au prix d'une complexité accrue. Selon les différentes conceptions de code, on peut distinguer plusieurs schémas CD-NOMA, Les principaux systèmes existants sont LDS-CDMA ; LDS-OFDMA ; MUSA ; SCMA ; PDMA ; SAMA.

Chapitre II : Étude approfondie de la technique NOMA

II.9 Concepts de base de NOMA :

la puissance de transmission attribuée aux utilisateurs dans les systèmes NOMA est inversement proportionnelle à l'état de leur canal. Pour garantir le succès du décodage des signaux superposés et réduire les interférences, la puissance de chaque signal doit être minutieusement optimisée. en exploitant la différence entre les conditions de canal des utilisateurs, par exemple, les utilisateurs dont les conditions de canal sont moins bonnes se voient attribuer une plus grande puissance d'émission. De cette façon, ces utilisateurs sont capables de décoder leurs propres messages en traitant les autres informations comme du bruit, puisque le niveau de puissance de leurs messages est plus élevé. D'autre part, les utilisateurs dont les conditions de canal sont meilleures utiliseront la stratégie d'annulation successive des interférences (SIC), c'est-à-dire qu'ils décodent d'abord les messages des utilisateurs dont les conditions de canal sont moins bonnes, puis décodent leurs messages en éliminant les informations des autres utilisateurs. [41]

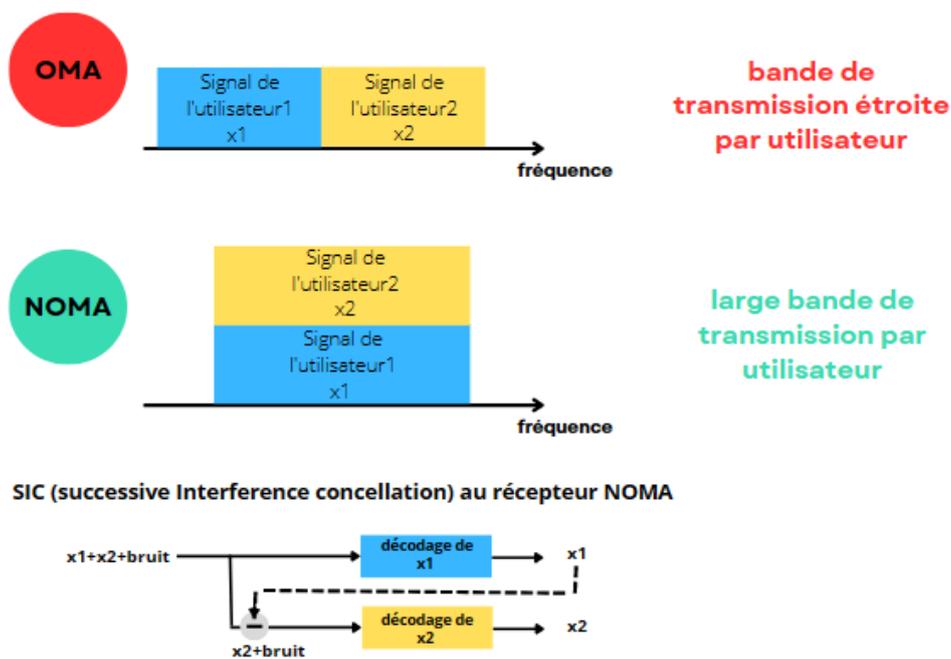


Figure II.5: l'accès à ressource pour les deux systèmes OMA et NOMA

Dans l'OMA, chaque équipement utilisateur (UE) a un accès exclusif à la ressource radioélectrique, alors que chaque sous-canal dans le NOMA peut accueillir plusieurs utilisateur (UE).

Chapitre II : Étude approfondie de la technique NOMA

Dans ce qui suit, une brève note sur SC et SIC est présentée, car ces deux techniques de base jouent un rôle important dans la compréhension de NOMA sur laquelle se concentre ce chapitre :

II.9.1 Codage par superposition (SC)

Le SC est une technique qui permet à l'émetteur de transmettre les informations de plusieurs utilisateurs en même temps [36]. le concept fondamental du codage par superposition consiste à superposer plusieurs utilisateurs à la même ressource avec une répartition de la puissance entre les utilisateurs basée sur la propriété de proximité et de distance comme il a été expliqué au-dessus.

Le multiplexage des utilisateurs consiste à superposer le diagramme de constellation des différents utilisateurs de sorte que les informations de chaque utilisateur soient modulées et additionnées entre les utilisateurs avec des attributions de puissance appropriées, de sorte que le signal résultant reste toujours le même. La figure 0.6 montre comment le SC est réalisé , où la constellation de la modulation par déplacement de phase en quadrature (QPSK) de l'utilisateur 1 avec une puissance d'émission plus élevée est superposée à celle de l'utilisateur 2 avec une puissance d'émission plus faible.

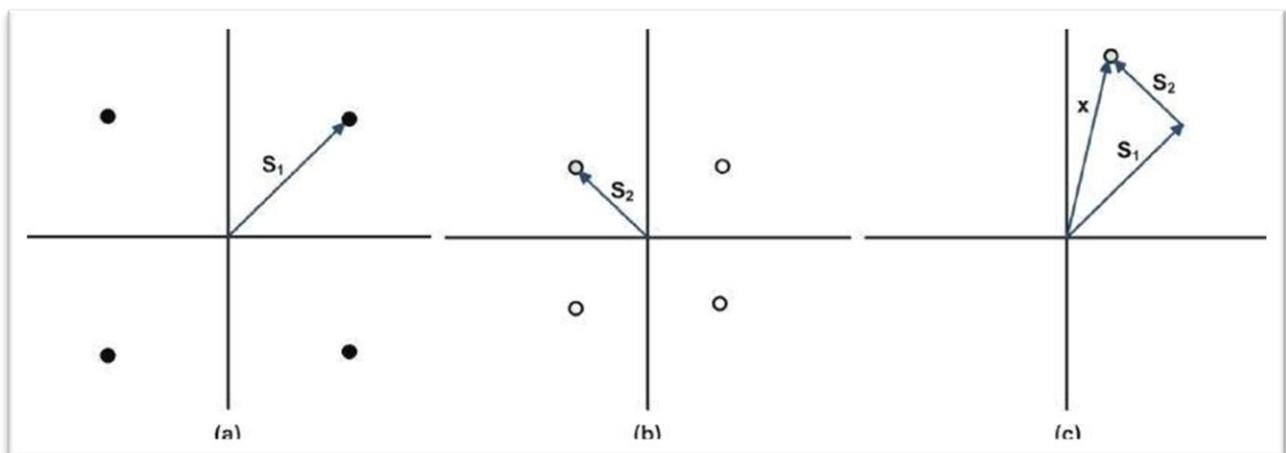


Figure II.6: Un exemple de codage SC ; (a) Constellation du signal de l'utilisateur 1

(b) Constellation du signal de l'utilisateur 2 ; (c) Constellation du signal superposé [42]

II.9.2 Annulation des interférences successives (SIC)

L'idée de base du SIC [43] est que les signaux des utilisateurs sont décodés successivement. Le processus de détection commence par l'utilisateur le plus fort jusqu'au plus faible, l'un des signaux d'utilisateur est décodé en traitant l'autre signal comme un brouilleur, mais ce dernier est ensuite décodé avec le bénéfice du décodage du premier signal qui a déjà été supprimé.

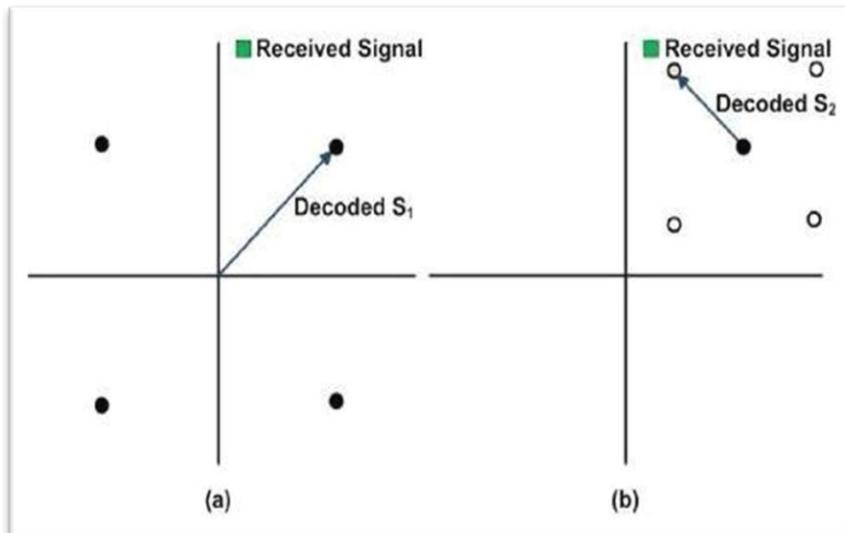


Figure II.7 : Exemple de décodage SC ; (a) décodage du signal de l'utilisateur1 (b) décodage du signal de l'utilisateur 2 [42]

La figure II.7 présente la technique de décodage du signal superposé du côté réception. Ici, le point de constellation de l'utilisateur 1 est décodé en premier à partir du signal reçu.

Ensuite le décodage du point de constellation de l'utilisateur 2 est effectué par rapport au point de constellation décodée de l'utilisateur 1.

II.9.2.1 Capacité du canal avec SIC :

En réalité, nous ne pouvons pas avoir un canal silencieux, Le canal est toujours bruyant. La capacité de Shannon est utilisée pour déterminer le débit de données théorique le plus élevé pour un canal bruyant :

$$C = B \times \log_2(1 + SNR) \text{ en bits/s} \quad (\text{II.1})$$

Comparons maintenant la capacité d'un canal sans fil avec et sans SIC [43], pour un scénario de récepteur commun comme dans la figure II.8

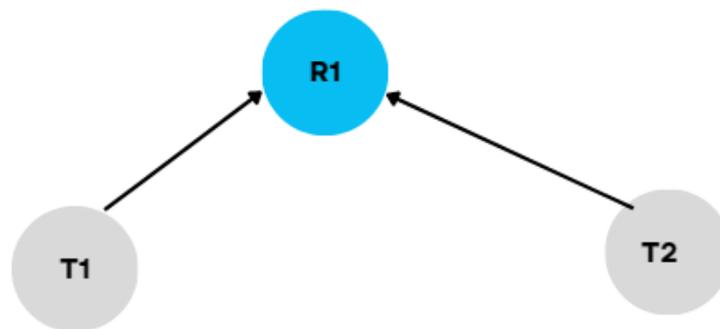


Figure II.8: Deux émetteurs partageant un récepteur commun . [43]

Soit S_{11} et S_{12} les intensités des signaux reçus dans un récepteur commun R_1 à partir de deux émetteurs T_1 et T_2 ; B est la largeur de bande et N_0 est le bruit du canal. Lorsque T_1 et T_2 émettent simultanément, R_1 doit d'abord décoder le signal le plus fort, disons S_{11} , en traitant le signal le plus faible, disons S_{12} , comme une interférence.

- ❖ Sans SIC, seul l'un de T_1 ou T_2 peut transmettre à la fois, donc la capacité du canal C_{-SIC} c'est :

$$C_{-SIC} = \max \left\{ B \log_2 \left(1 + \frac{S_{11}}{N_0} \right), B \log_2 \left(1 + \frac{S_{12}}{N_0} \right) \right\} \quad (\text{II.2})$$

- ❖ Avec SIC, il est possible de recevoir simultanément deux transmissions. La capacité du canal correspondant avec SIC :

$$C_{+SIC} = B \log_2 \left(1 + \frac{S_{11}}{S_{12}+N_0} \right) + B \log_2 \left(1 + \frac{S_{12}}{N_0} \right) \quad (\text{II.3})$$

$$C_{+SIC} = B \log_2 \left(1 + \frac{S_{12}+S_{11}}{N_0} \right) \quad (\text{II.4})$$

Nous observons que la capacité du canal avec SIC est toujours meilleure que les capacités individuelles de chaque émetteur

II.10 Informations sur l'état du canal (CSI) :

L'estimation de l'information sur l'état des canaux (CSI) est l'un des problèmes les plus fondamentaux dans les systèmes de communication sans fil. Jusqu'à présent, diverses méthodes ont été développées pour effectuer l'estimation CSI, ce qui nécessite généralement une grande complexité de calcul. Les informations d'état du canal (CSI) décrivent comment un signal se propage de l'émetteur vers le récepteur et représentent l'effet combiné, par exemple la diffusion, l'affaiblissement et la diminution de la puissance du signal avec la distance. Le CSI permet d'adapter les transmissions aux conditions instantanées du canal, ce qui est essentiel pour obtenir une communication fiable avec des débits de données élevés dans les systèmes à antennes multiples.

II.11 Modèle des systèmes OMA et NOMA :

II.11.1 La liaison montante :

Nous décrivons d'abord le fonctionnement de l'OMA dans un système simple avec deux utilisateurs. Ensuite, nous expliquons le principe du NOMA dans la liaison montante :

II.11.1.1 La liaison montante dans le système OMA :

Dans le cas de la transmission en liaison montante en OMA, chaque utilisateur se voit attribuer un ensemble différent de ressources orthogonales pour transmettre ses données à la station de base. Cela signifie que chaque utilisateur se voit attribuer un créneau horaire ou une bande de fréquences unique, ou un code unique pour la transmission de ses données. La station de base peut alors recevoir et décoder les signaux de plusieurs utilisateurs simultanément sans interférence.

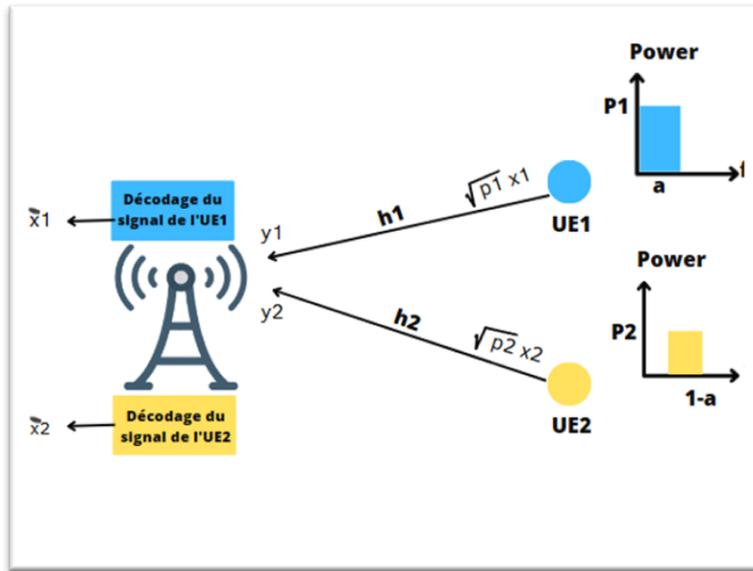


Figure II.9: Transmission NOMA à deux utilisateurs sur la liaison montante

On considère deux utilisateurs transmettant respectivement les signaux x_1 et x_2 à la station de base (BS). Les puissances des signaux x_1 et x_2 sont respectivement p_1 et p_2 . Dans le système NOMA représenté sur la figure II.9, l'utilisateur 1 est servi sur une fraction $a \in [0, 1]$ de la bande passante. L'utilisateur 2 est servi sur une proportion $(1 - a)$ de la bande passante totale. [44]

Le signal reçu de l'utilisateur 1 à la station de base est le suivant :

$$y_1 = h_1 \sqrt{p_1} x_1 + n \quad (\text{II.5})$$

et le signal reçu de l'utilisateur 2 est :

$$y_2 = h_2 \sqrt{p_2} x_2 + n \quad (\text{II.6})$$

où n est un bruit gaussien, h_1 et h_2 sont les coefficients complexes du canal entre la station de base et les utilisateurs 1 et 2, respectivement.

Tenu Compte de la largeur de bande totale W et de la densité spectrale de puissance du bruit N_0 , les rapports signal/bruit des utilisateurs 1 et 2 sont les suivants :

$$SNR_1 = \frac{g_1 p_1}{a W N_0} \quad \text{et} \quad SNR_2 = \frac{g_2 p_2}{(1-a) W N_0} \quad (\text{II.7})$$

où $g_1 = |h_1|^2$ et $g_2 = |h_2|^2$ sont les gains du canal.

Les débits de données réalisables de chaque utilisateur, R_1 et R_2 , peuvent être obtenus par la formule de capacité de Shannon comme suit :

$$R_1 = aW \log_2 \left(1 + \frac{g_1 p_1}{aW N_0} \right) \quad (\text{II.8})$$

$$R_2 = (1 - a)W \log_2 \left(1 + \frac{g_2 p_2}{(1-a)W N_0} \right) \quad (\text{II.9})$$

II.11.1.2 La liaison montante dans le système NOMA :

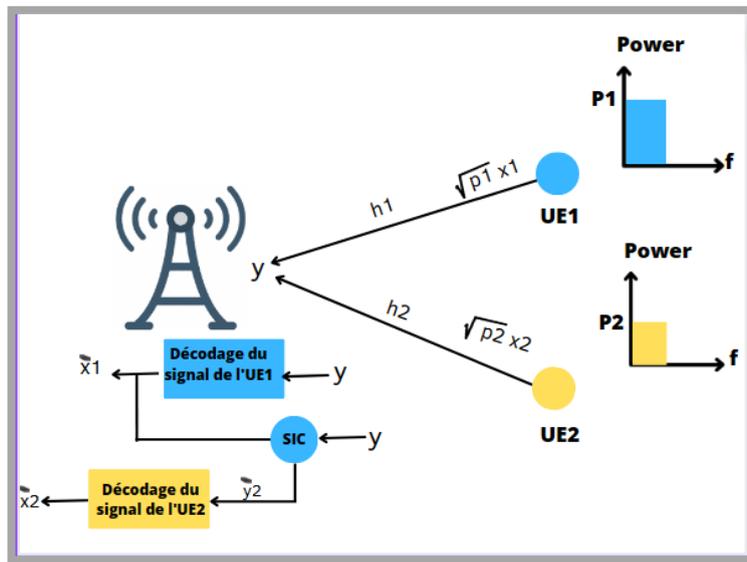


Figure II.10: Transmission NOMA à deux utilisateurs sur la liaison montante

la liaison montante NOMA permet à plusieurs utilisateurs de partager la même ressource temps-fréquence en utilisant des niveaux de puissance comme le montre la figure II.10, les deux utilisateurs transmettent sur la même largeur de bande W

Le signal reçu par la station de base est donc une superposition de x_1 et x_2 [44]:

$$y = h_1 \sqrt{p_1} x_1 + h_2 \sqrt{p_2} x_2 + n \quad (\text{II.10})$$

Dans cet exemple, x_1 est décodé en premier en considérant x_2 comme du bruit. Son rapport signal/interférence plus-bruit est :

$$SINR_1 = \frac{g_1 p_1}{W N_0 + g_2 p_2} \quad (\text{II.11})$$

En supposant que le signal de l'utilisateur 1 a été correctement décodé, \hat{x}_1 est ensuite soustrait du signal superposé y (voir le bloc SIC du figure II.10) pour obtenir le signal

$$\tilde{y}_2 \approx h_2 \sqrt{p_2} x_2 + n \quad (\text{II.12})$$

dans lequel les interférences causées par l'utilisateur 1 sont annulées. C'est le principe de l'annulation successive des interférences (SIC) : lorsque plusieurs signaux sont superposés, les premiers signaux décodés sont soustraits de y avant de décoder le signal suivant.

Le rapport signal/interférence plus-bruit de x_2 après SIC est :

$$SINR_2 = \frac{g_2 p_2}{WN_0} \quad (\text{II.13})$$

L'idée du NOMA dans le domaine du puissance est de sélectionner les signaux à multiplexer (en fonction de leurs gains de canal g_1 et g_2) et d'optimiser leur puissance respective afin que tous les signaux puissent être décodés avec succès et que le débit de données de chaque utilisateur soit maximisé.

Dans ce cas, les débits de données NOMA sont :

$$R'_1 = W \log_2 \left(1 + \frac{g_1 p_1}{WN_0 + g_2 p_2} \right) \quad (\text{II.14})$$

$$R'_2 = W \log_2 \left(1 + \frac{g_2 p_2}{WN_0} \right) \quad (\text{II.15})$$

Si x_2 est décodé en premier, les taux deviennent :

$$R'_1 = W \log_2 \left(1 + \frac{g_1 p_1}{WN_0} \right) \quad (\text{II.16})$$

$$R'_2 = W \log_2 \left(1 + \frac{g_2 p_2}{WN_0 + g_1 p_1} \right) \quad (\text{II.17})$$

II.11.2 La liaison descendante :

II.11.2.1 La liaison descendante dans le système OMA

Dans la liaison descendante, la station de base dessert les utilisateurs 1 et 2 avec une puissance p_1 et p_2 , respectivement. Ces puissances satisfont $p_1 + p_2 \leq P$, où P est le budget de puissance total disponible à la BS.

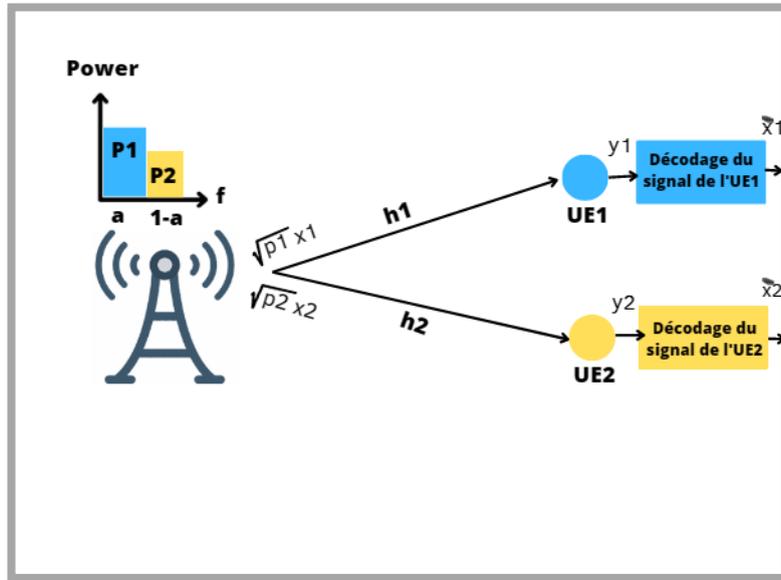


Figure II.11: Transmission OMA à deux utilisateurs sur la liaison descendante

Dans le système OMA illustré à la figure II.11 les deux utilisateurs sont desservis sur des sous-porteuses où l'utilisateur 1 obtient $a \in [0, 1]$ de la bande passante totale et l'utilisateur 2 obtient

$(1 - a)$ de la bande passante totale. Leurs signaux reçus sont [44]:

$$y_1 = h_1 \sqrt{p_1} x_1 + n \quad (\text{II.18})$$

$$y_2 = h_2 \sqrt{p_2} x_2 + n \quad (\text{II.19})$$

Par conséquent, leurs débits de données réalisables sont :

$$R_1 = aW \log_2 \left(1 + \frac{g_1 p_1}{aW N_0} \right) \quad (\text{II.20})$$

$$R_2 = (1 - a)W \log_2 \left(1 + \frac{g_2 p_2}{(1-a)W N_0} \right) \quad (\text{II.21})$$

qui sont similaires aux équations (II.8) et (II.9) obtenues dans le cas de la liaison montante.

II.11.2.2 La liaison descendante dans le système NOMA :

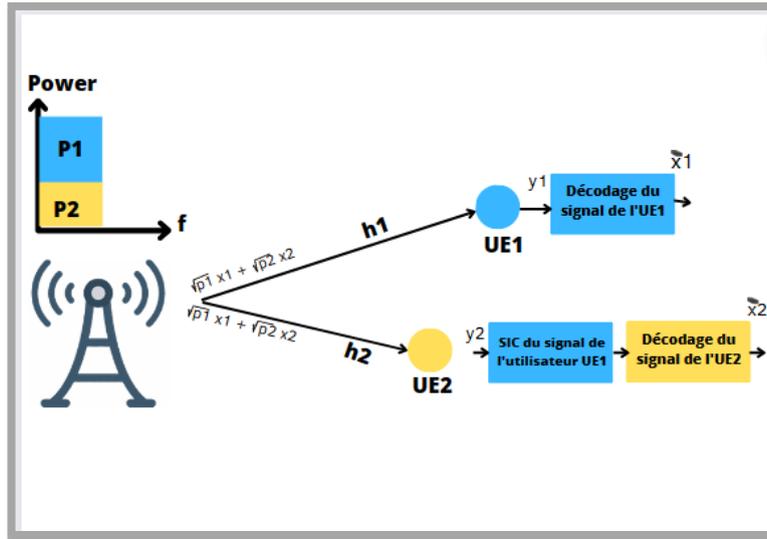


Figure II.12: Transmission NOMA à deux utilisateurs sur la liaison descendante

La station de base transmet sur la bande passante W le signal superposé

$\sqrt{p_1}x_1 + \sqrt{p_2}x_2$, Le signal reçu y_1 et y_2 de chaque utilisateur est donc une superposition de x_1 et x_2 [13] :

$$y_1 = h_1(\sqrt{p_1}x_1 + \sqrt{p_2}x_2) + n \quad (\text{II.22})$$

$$y_2 = h_2(\sqrt{p_1}x_1 + \sqrt{p_2}x_2) + n \quad (\text{II.23})$$

Dans cet exemple, l'utilisateur 1 est considéré comme l'utilisateur faible et l'utilisateur 2 comme l'utilisateur fort, c'est-à-dire que $g_1 < g_2$.

x_1 est décodé en considérant x_2 comme du bruit. Par conséquent, son rapport signal sur interférence plus bruit est :

$$SINR_1 = \frac{g_1 p_1}{W N_0 + g_1 p_2} \quad (\text{II.24})$$

On notera qu'ici le terme de brouillage est $g_1 p_2$, alors qu'il était $g_2 p_2$ dans la liaison montante.

Du côté du récepteur de l'utilisateur 2, x_1 est également décodé en considérant x_2 comme un bruit. Puis l'utilisateur 2 soustrait \hat{x}_1 du signal superposé y_2 avant de décoder son propre signal x_2 . Le rapport signal sur interférence plus bruit de x_2 après SIC est :

$$SINR_2 = \frac{g_2 p_2}{W N_0} \quad (\text{II.25})$$

Les débits de données NOMA sont :

$$R'_1 = W \log_2 \left(1 + \frac{g_1 p_1}{WN_0 + g_1 p_2} \right) \quad (\text{II.26})$$

$$R'_2 = W \log_2 \left(1 + \frac{g_2 p_2}{WN_0} \right) \quad (\text{II.27})$$

Dans l'accès multiple non orthogonal (NOMA), l'ordre de décodage joue un rôle important dans l'obtention de meilleures performances.

Dans le cas de l'Annulation successive des interférences (SIC), le récepteur décode d'abord le signal ayant le niveau de puissance le plus élevé, l'élimine du signal reçu, puis procède au décodage du signal ayant le niveau de puissance le plus élevé suivant, et ainsi de suite. Cette approche permet au récepteur d'éliminer les interférences des signaux décodés et d'améliorer les performances globales du système.

Dans[44], Les auteurs ont comparé la région de capacité en liaison descendante en tenant compte de l'ordre de décodage adopté parmi les deux cas suivants :

- Le décodage du signal ayant le niveau de puissance le plus élevé en premier
- Le décodage du signal ayant le niveau de puissance le plus faible en premier

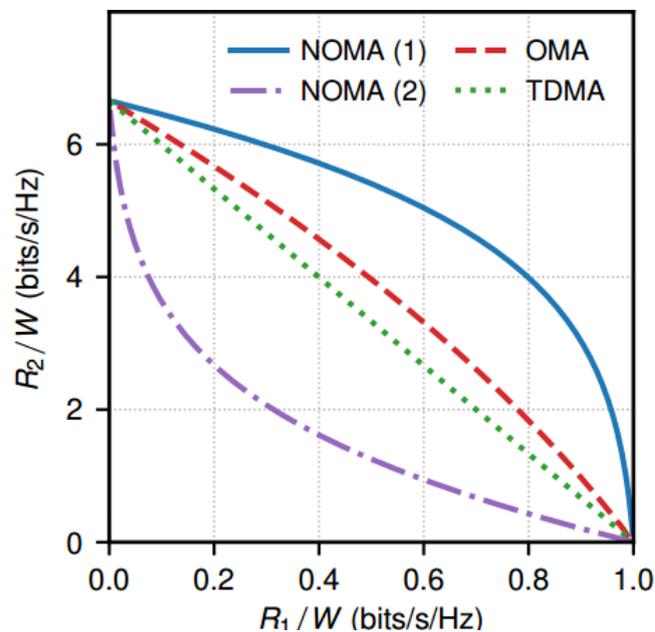


Figure II.13: Régions de capacité en liaison descendante pour deux utilisateurs[44]

Valeurs numériques : $P = p_1 + p_2 = 1W$, $\frac{g_1 p_2}{WN_0} = 0dB$ et $\frac{g_2 p_2}{WN_0} = 20 dB$

Le NOMA (1) correspond au décodage de l'utilisateur faible 1 en premier, tandis que NOMA (2) correspond au décodage de l'utilisateur fort 2 en premier

Nous constatons sur la figure II.13 que La limite de la région de débit du NOMA (1) est strictement supérieure à celle de l'OMA. Cela montre que le NOMA permet d'obtenir une meilleure efficacité spectrale que l'OMA. En outre, l'ordre de décodage du SIC est particulièrement important car les débits de données obtenus par le NOMA (2) sont toujours sous-optimaux et même inférieurs à ceux de l'OMA et du TDMA.

II.12 Les avantages de NOMA :

Les systèmes NOMA présentent de nombreux avantages par rapport aux systèmes classiques d'OMA à savoir [36] :

II.12.1 Capacité de connectivité :

La capacité de NOMA à desservir un grand nombre d'utilisateurs en partageant les mêmes ressources de temps et de fréquence est la motivation centrale de son adoption dans la 5G, ce qui peut être réalisé par multiplexage de puissance mais au prix d'un brouillage inter-utilisateurs important et d'une complexité de décodage élevée pour la séparation des signaux.

II.12.2 Réduction de la charge de signalisation et de la latence de transmission :

Les schémas OMA classiques sont des systèmes basés sur des allocations. Chaque utilisateur doit passer par un processus d'allocation de ressources pour chaque tentative de transmission. Ce processus est très coûteux en termes de latence de transmission, par exemple 9,5 ms pour un accès aléatoire en LTE [45] et de surcharge de signalisation, ce qui entraîne une forte consommation d'énergie, en particulier pour un grand nombre de dispositifs connectés.

l'un des candidats proposés pour les scénarios mMTC est d'appliquer des schémas NOMA avec accès libre[45], chaque équipement d'utilisateur peut transmettre ses données en fonction de ses besoins sans communication préalable avec la station de base pour l'allocation des ressources, ce qui permet de réduire la surcharge de signalisation et la latence [46]. L'accès gratuit peut être soit un accès basé sur le RACH qui permet aux utilisateurs d'obtenir la synchronisation de liaison montante, soit un accès sans RACH (sans garantie de synchronisation). En revanche l'utilisation d'accès libre pour les schémas OMA n'est pas possible car il peut générer une grave collision dans le système en raison du nombre limité de ressources. Par conséquent, les paquets en collision doivent être retransmis ce qui entraîne un gaspillage de ressources, un retard de transmission et surcharge de signalisation générée.

II.12.3 Équité pour l'utilisateur et efficacité spectrale :

les systèmes NOMA peuvent dans certains cas, offrir une meilleure équité de taux que les systèmes OMA [47] en allouant plus de puissance à l'utilisateur éloigné et peu de puissance à l'utilisateur proche, tel que la ressource attribuée à l'utilisateur faible est également utilisée par l'utilisateur fort, et les interférences peuvent être atténuées par des processus SIC au niveau des récepteurs des utilisateurs. Par conséquent, la probabilité d'avoir une efficacité spectrale améliorée et un débit élevé sera considérablement augmentée, en particulier pour l'utilisateur en bordure de cellule.

II.12.4 Compatibilité:

le NOMA a été inclus dans le projet de partenariat de troisième génération pour l'évolution à long terme (3GPP LTE Release 13) [48] en raison de son gain de performance spectrale, démontrant le rôle de NOMA dans les réseaux sans fil 5G. Par conséquent, l'une des principales préoccupations dans la conception et l'exploitation des réseaux sans fil 5G est de fournir un niveau de sécurité inégalé pour NOMA

II.13 SOLUTIONS POTENTIELLES DE NOMA

Cette section présente une vue d'ensemble sur quelques recherches actuelles et émergentes sur la NOMA, considérées comme des solutions potentielles aux problèmes ou questions liés à l'intégration de la NOMA dans la 5G. Notre objectif principal est de couvrir les idées fondamentales de la recherche de pointe sur la NOMA dans les systèmes 5G.

II.13.1 NOMA-MIMO:

L'accès multiple non orthogonal (NOMA) avec entrée multiple et sortie multiple (MIMO) est une combinaison de deux techniques avancées visant à améliorer l'efficacité spectrale, la capacité et la qualité de service dans les systèmes de communication sans fil de la prochaine génération, tels que la 5G et au-delà.

La NOMA avec MIMO peut améliorer de manière significative l'efficacité spectrale en permettant à plusieurs utilisateurs de partager la même bande de fréquence et en utilisant plusieurs antennes pour augmenter la capacité de la communication sans fil. Ainsi, Cette technique peut offrir une meilleure expérience à l'utilisateur en améliorant la fiabilité et la qualité de la communication sans fil. La présence d'antennes multiples au niveau du récepteur permet d'améliorer la qualité du signal. Et peut aussi contribuer à réduire le temps de latence en permettant une transmission plus rapide des données et en réduisant le temps nécessaire au traitement du signal.

En résumé, les études menées sur NOMA-MIMO ont montré que cette combinaison de technologies peut améliorer les performances du réseau par rapport aux systèmes MIMO conventionnels, mais qu'elle peut être plus sensible aux interférences et qu'il y a des limites à la taille du groupe et à la puissance de transmission. Ces études contribuent à la compréhension de l'efficacité et des limites de NOMA-MIMO, ce qui peut aider à guider le développement et l'optimisation des réseaux sans fil.

II.14 Les défis de NOMA :

L'accès multiple non orthogonal (NOMA) est une technique prometteuse pour améliorer l'efficacité spectrale des systèmes de communication sans fil, mais elle est également confrontée à plusieurs défis. Voici quelques-uns des problèmes posés par l'accès multiple non orthogonal :

- **Complexité** : La NOMA nécessite des algorithmes sophistiqués de traitement des signaux pour permettre à plusieurs utilisateurs de partager la même bande de fréquences en utilisant le multiplexage dans le domaine de la puissance. Cela peut entraîner une complexité accrue du système, ce qui peut rendre sa mise en œuvre difficile dans la pratique.
- **Interférence entre utilisateurs** : La NOMA repose sur le fait que les signaux des différents utilisateurs peuvent être séparés en fonction de leurs niveaux de puissance, mais cela peut entraîner des interférences entre utilisateurs. Lorsque le nombre d'utilisateurs augmente, le niveau d'interférence augmente également, ce qui peut dégrader les performances du système.
- **Attribution de puissance** : La NOMA nécessite une répartition de la puissance minutieuse pour obtenir des performances optimales. En effet, l'attribution de puissance affecte le niveau d'interférence et l'efficacité spectrale globale du système. Toutefois, il peut être difficile de déterminer la répartition optimale de la puissance, en particulier dans les environnements dynamiques.
- **Diversité des utilisateurs** : La méthode NOMA fonctionne le mieux lorsqu'il existe une différence significative entre les conditions des canaux des différents utilisateurs. Toutefois, si les conditions du canal sont similaires, la NOMA peut ne pas être en mesure de fournir des gains significatifs en termes d'efficacité spectrale.

- Estimation du canal : La NOMA nécessite une estimation précise du canal pour séparer les signaux des différents utilisateurs. Cependant, l'estimation du canal peut s'avérer difficile, en particulier dans les environnements où la mobilité est élevée.

Dans l'ensemble, la NOMA est une technique prometteuse pour améliorer l'efficacité spectrale des systèmes de communication sans fil, mais elle est confrontée à plusieurs défis qu'elle convient de les relever pour exploiter pleinement son potentiel.

II.15 les schémas G-NOMA:

La NOMA a été identifiée comme une technologie clé pour la 5G et au-delà, et elle a le potentiel d'améliorer de manière significative les systèmes de communication sans fil.

Cependant, la NOMA est également confronté à plusieurs défis, notamment la complexité, les interférences entre utilisateurs, l'allocation de puissance, la diversité des utilisateurs et l'estimation des canaux. Ces défis doivent être relevés pour réaliser le plein potentiel du NOMA.

Depuis l'introduction du paradigme de l'IoT et des cas d'utilisation attendus de la 5G, plusieurs schémas G-NOMA [49](The generalized non-orthogonal multiple access) ont vu le jour, à savoir l'accès multiple par division entrelacée IDMA (Interleave Division Multiple Access), l'accès partagé multi-utilisateurs (MUSA), l'accès multiple par division de motifs (PDMA), l'accès multiple par code épars (SCMA), qui répondent aux problèmes de connectivité massive et d'amélioration de la capacité du système.

II.16 Conclusion :

Comme nous avons vu dans ce chapitre que La NOMA présente plusieurs avantages par rapport aux techniques traditionnelles d'accès multiple orthogonal (OMA), notamment une plus grande efficacité spectrale, un temps de latence plus faible et une plus grande équité entre les utilisateurs. Dans l'ensemble, NOMA et OMA sont deux techniques différentes et chacune a ses propres avantages et limites en fonction de l'application spécifique et des exigences du système.

Le chapitre suivant présente une étude qualitative d'une sélection des schémas NOMA les plus prometteurs à savoir MUSA, PDMA et SCMA en décrivant les grands principes de ces systèmes

Chapitre III

Étude des performances et simulation des schémas SCMA, MUSA et PDMA sous MATLAB

_____ Chapitre III : Étude des performances et simulation des schémas SCMA, MUSA et PDMA sous MATLAB

III.1 Introduction :

Depuis l'introduction du modèle IoT et les cas d'utilisation attendus de la 5G, plusieurs schémas NOMA ont vu le jour, à savoir NOMA dans le domaine de puissance (PD-NOMA), et dans le domaine de code SCMA, MUSA et PDMA . Le chapitre 3 fournit une étude des performances des schémas SCMA, MUSA et PDMA . nous comparerons les performance de ces schémas NOMA dans des canaux typiques à évanouissement de Rayleigh avec plusieurs utilisateurs dispersés dans la cellule. L'objectif est de choisir la technique qui offre les meilleurs performances en termes tu BER.

_____ Chapitre III : Étude des performances et simulation des schémas SCMA, MUSA et PDMA sous MATLAB

III.2 Les différents schémas typiques de NOMA :

III.2.1 Le schéma MUSA :

Accès partagé multi-utilisateurs MUSA(Multi User Shared Access) : Dans ce modèle, les utilisateurs ont un accès équitable à la ressource partagée, sans qu'il y ait de préférence accordée à un utilisateur par rapport à un autre. Il a été proposé pour la première fois par ZTE en 2016 dans [50]. Il peut être considéré comme un raffinement du schéma MC-CDMA avec des séquences d'étalement non orthogonales, à faible corrélation croisée et courtes pour permettre la coexistence d'un grand nombre d'utilisateurs dans les mêmes ressources radio[50].

L'idée principale de la MUSA est que les utilisateurs sont divisés en plusieurs groupes. Dans chaque groupe, le signal de chaque utilisateur est multiplié par son coefficient d'échelle de puissance spécifique. Ensuite, les signaux de tous les utilisateurs d'un groupe donné sont superposés pour être étalés dans une séquence spécifique [50], comme le montre la figure III.1 Les séquences spécifiques aux groupes sont conçues pour être orthogonales, de sorte que le brouillage intergroupe est facilement éliminé au niveau du récepteur grâce à un corrélateur à faible complexité. Enfin, un détecteur SIC peut être utilisé pour résoudre le problème du brouillage intragroupe. [51]

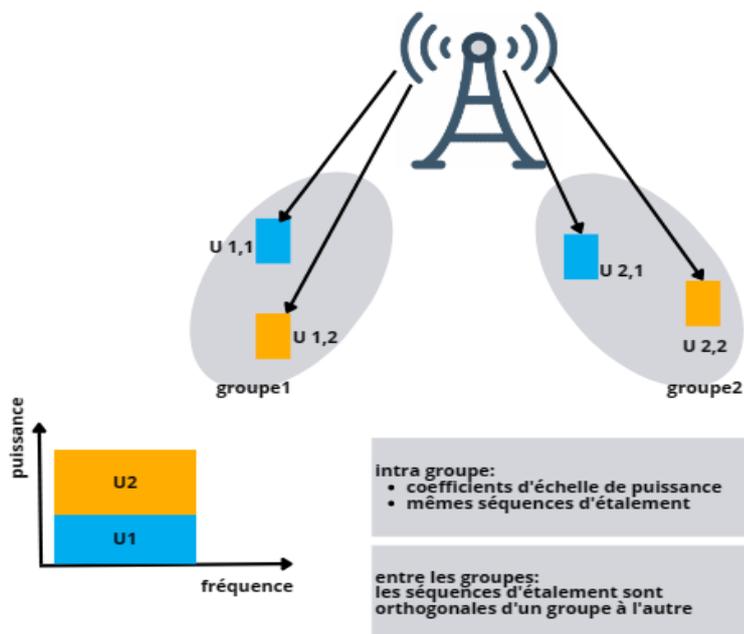


Figure III.1 :Principes de base de la MUSA

Le modèle MUSA peut-être utilisé dans des scénarios d'accès libre, où la ressource partagée est accessible à tous les utilisateurs, sans limitation ou restriction d'accès. En fait, chaque utilisateur peut choisir de manière autonome une séquence d'étalement aléatoire au

Chapitre III : Étude des performances et simulation des schémas SCMA, MUSA et PDMA sous MATLAB

sein d'une constellation prédéfinie, sans communication avec la station de base ou les autres utilisateurs.

En ce qui concerne la conception des séquences d'étalement, chaque élément complexe de la j -ème séquence d'utilisateur est représenté par $S_{kj} = a + ib \forall k \in \{1, \dots, K\}$ et $\forall j \in \{1, \dots, J\}$, où a et b sont choisis dans une constellation M -aire, Par exemple, pour une constellation 3-aire $\{-1, 0, 1\}$, l'ensemble des éléments complexes possibles est $\{0, 1, -1, 1i, -1i, 1+1i, 1-1i, -1+1i, -1-1i\}$ et donc le nombre maximum de séquences à K dimensions est de 9^k , ce qui offre une grande capacité de surcharge. Un exemple de séquences d'étalement MUSA, La matrice $S \in \mathbb{C}^{K \times J}$, avec $K = 4$ et $J = 6$ utilisateurs, est représentée par :

$$S = \begin{bmatrix} 1+i & 1 & -1-i & 1-i & i & -1 \\ 0 & -1+i & i & 1 & -1 & 1+i \\ 1 & -i & 1+i & -1-i & 1+i & 0 \\ -1-i & 1+i & -1+i & 1 & -1-i & i \end{bmatrix} \quad (\text{III.1})$$

III.2.1.1 Modèle du système :

Pour mettre en place un système MUSA, plusieurs éléments doivent être pris en compte :

Le flux binaire entrant de chaque utilisateur est mis en correspondance avec une série de symboles M -aire où M désigne l'ordre de modulation. Ensuite, chaque symbole est multiplié par tous les éléments d'une séquence d'étalement aléatoire à K dimensions. Le code résultant, c'est-à-dire le symbole multiplié par la séquence d'étalement, est étalé sur les K sous-porteuses, MUSA utilise des séquences d'étalement spéciales pour étaler les données individuelles de plusieurs utilisateurs. Ensuite, les données étalées des utilisateurs sont superposées et transmises comme l'illustre la figure III.2 [52]. Le signal reçu sur la sous-porteuse k peut être donné comme suit :

$$y_k = \sum_{j=1}^J \sqrt{P_j} h_{kj} s_{kj} + n_k \quad (\text{III.2})$$

Où s_{kj} désigne le k -ième élément de la séquence d'étalement du j -ième utilisateur $s_j = [s_{1j}, s_{2j}, \dots, s_{Kj}]^T \in \mathbb{C}^K$ (T : transposé) et x_j est le symbole transmis du j -ème utilisateur. Par conséquent, le vecteur signal reçu sur toutes les sous-porteuses peut être exprimé comme suit :

$$y = GP^{\frac{1}{2}}x + n \quad (\text{III.3})$$

où $x = [x_1, x_2, \dots, x_j]^T$ est le symbole vectoriel des utilisateurs avec $E[xx^H] = I_j$

**_____ Chapitre III : Étude des performances et simulation des schémas
SCMA, MUSA et PDMA sous MATLAB**

$P_2^{\frac{1}{2}} = \text{diag}(\sqrt{P_1}, \sqrt{P_2}, \dots, \sqrt{P_J}) \in \mathbb{R}_+^{J \times J}$ est la matrice des puissances d'émission des utilisateurs

Et $G \in \mathbb{C}^{K \times J}$ est la matrice de canal équivalente incluant les séquences d'étalement, qui peut être exprimée comme suit :

$$G = H \odot S \quad (\text{III.4})$$

où $H = [h_1, h_2, \dots, h_J] \in \mathbb{C}^{K \times J}$, $S = [s_1, s_2, \dots, s_J] \in \mathbb{C}^{K \times J}$ et \odot est le produit de Hadamard c'est-à-dire $g_{kj} = h_{kj} s_{kj}$.

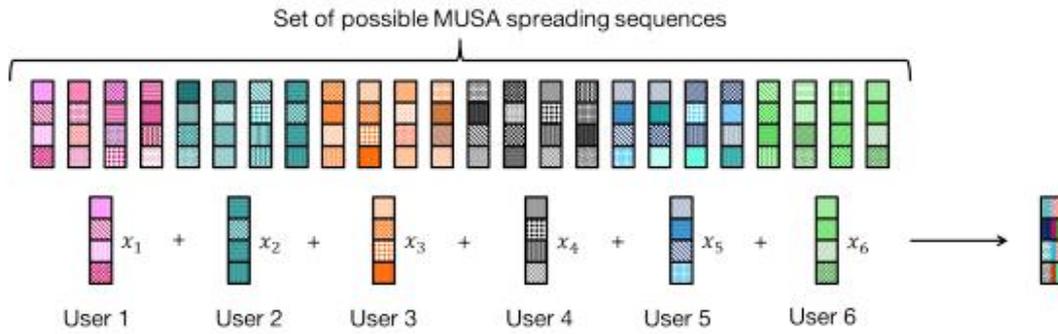


Figure III.2:schéma d'un émetteur MUSA pour $j=6$ et $K=4$ [61]

III.2.1.2 Détections multi-utilisateurs :

La détection multi-utilisateurs (MUD) est une technique importante utilisée dans les systèmes de communication sans fil pour détecter et séparer plusieurs utilisateurs transmettant simultanément sur la même bande de fréquence.

La détection aveugle est appliquée dans le cadre de la MUSA, dans laquelle l'annulation successive des interférences par l'erreur quadratique moyenne minimale (MMSE-SIC) est utilisée pour atténuer les interférences entre les utilisateurs. L'idée principale est d'estimer successivement les symboles des utilisateurs tout en éliminant l'interférence générée par les utilisateurs déjà décodés, comme l'illustre la figure III.3

pour l'estimation du symbole de l'utilisateur, où la matrice MMSE peut être calculée comme suit [53] :

$$W^H = \left(P_2^{\frac{1}{2}} G^H G P_2^{\frac{1}{2}} + \sigma^2 I \right)^{-1} P_2^{\frac{1}{2}} G^H \quad (\text{III.5})$$

Les utilisateurs seront triés par ordre décroissant en fonction de leur SINR. Pour un ordre de décodage donné, par exemple : $\text{SINR}_1 > \text{SINR}_2 > \dots > \text{SINR}_J$, c'est-à-dire les interférences

**_____ Chapitre III : Étude des performances et simulation des schémas
SCMA, MUSA et PDMA sous MATLAB**

des utilisateurs les plus puissants étant éliminées en premier, suivies des interférences des utilisateurs les plus faibles.

le signal reçu au jème niveau, après suppression du brouillage des utilisateurs déjà décodés, est représenté comme suit :

$$y^j = \sqrt{P_j}g_jx_j + \sum_{i=j+1}^J\sqrt{P_i}g_ix_i + n^j \quad (\text{III.6})$$

Où n^j désigne le vecteur de bruit à la j-ième itération. Par conséquent, le SINR de l'utilisateur j est [53] :

$$\beta_j(p) = \frac{P_j|W_j^H g_j|^2}{\sum_{i=j+1}^J P_i|W_j^H g_i|^2 + \sigma^2\|W_j^H\|^2} \quad (\text{III.7})$$

où $p = [p_1, p_2, \dots, p_J]^T$, W_j et g_j se réfèrent à la jème colonne des matrices W et G , respectivement. Ainsi, le symbole transmis de l'utilisateur j est estimé comme :

$$\hat{x}_j = W_j^H y \quad (\text{III.8})$$

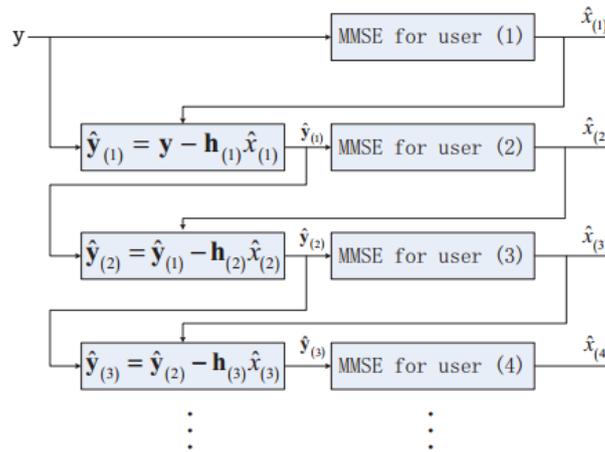


Figure III.3 :Récepteur SIC basé sur MMSE[54]

L'interférence du j-ème symbole décodé est régénérée puis soustraite. Après la j-ème itération, le signal reçu est actualisé comme suit : $\hat{y} = y - \sqrt{p_j}g_j\hat{x}_j$

Enfin, le vecteur de canal de l'utilisateur décodé, c'est-à-dire g_i , est retiré de la matrice de canal G , la matrice MMSE W^H est calculée à nouveau et le $(j + 1)$ ème symbole est estimé puis retiré du signal global. Les symboles des autres utilisateurs sont détectés de la même

_____ Chapitre III : Étude des performances et simulation des schémas SCMA, MUSA et PDMA sous MATLAB

manière, c'est-à-dire que l'annulation des interférences, l'ordre par SINR et la détection linéaire par MMSE sont effectués à chaque étape.

III.2.2 Le schéma PDMA :

Le PDMA (Pattern division multiple Access) est un schéma NOMA qui était proposé pour répondre aux exigences des futurs réseaux d'accès radio[55],[56]. Plus précisément, aux exigences de l'eMBB et à certains scénarios mMTC. Il s'agit d'une variante des techniques d'accès multiple par répartition en code (CDMA) et d'accès multiple par répartition dans le temps (TDMA). Dans le PDMA, la largeur de bande disponible est divisée en un ensemble de motifs orthogonaux, et chaque utilisateur se voit attribuer un motif unique pour transmettre et recevoir des données.

Il peut être réalisé en code, puissance, l'espace ou de leur combinaison. Le PDMA utilise un schéma caractéristique pour distinguer les utilisateurs au niveau de l'émetteur et un algorithme d'annulation des interférences en série peu complexe et très performant pour réaliser la détection multi-utilisateur au niveau du récepteur. Le cadre technique du PDMA pour la liaison descendante est présenté à la figure III.4.

III.2.2.1 Modèle du système PDMA :

Dans le PDMA, la station de base utilise un ensemble de motifs de transmission préconçus appelés motifs PDMA, pour transmettre des données à l'utilisateur. Chaque motif PDMA est une séquence unique binaire avec deux éléments possibles {0, 1}, où "1" indique que l'utilisateur correspondant transmet sur cette ressource et "0" sinon . un nouvel aspect de la conception des modèles a été introduit dans [57]avec deux systèmes PDMA. Le premier est connu sous le nom de PDMA basé sur la cartographie distribuée qui repose sur des motifs non orthogonaux. Cependant, le second, appelé PDMA basé sur la cartographie localisée, applique le concept quasi-orthogonal pour la construction du modèle.

Comme pour le MUSA, PDMA peut permettre un accès libre en autorisant chaque utilisateur à générer de manière aléatoire sa séquence d'étalement, mais au prix d'une probabilité de collision élevée. Cela est principalement dû au nombre limité de motifs binaires.

Le nombre maximal d'utilisateurs pris en charge avec k sous-porteuses orthogonales disponibles peut être calculé comme suit :

$$C(k) = \sum_{i=1}^k \binom{k}{i} = 2^k - 1 \quad (\text{III.9})$$

_____ **Chapitre III : Étude des performances et simulation des schémas
SCMA, MUSA et PDMA sous MATLAB**

où $\binom{k}{i}$ est le nombre de combinaisons d'éléments i parmi un ensemble de k éléments. Par exemple, pour $k = 4$ sous-porteuses, le nombre maximal de motifs possibles est de $2^4 - 1 = 15$, où l'ensemble maximal de séquences d'étalement binaires est donné par la matrice suivante:

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III.10})$$

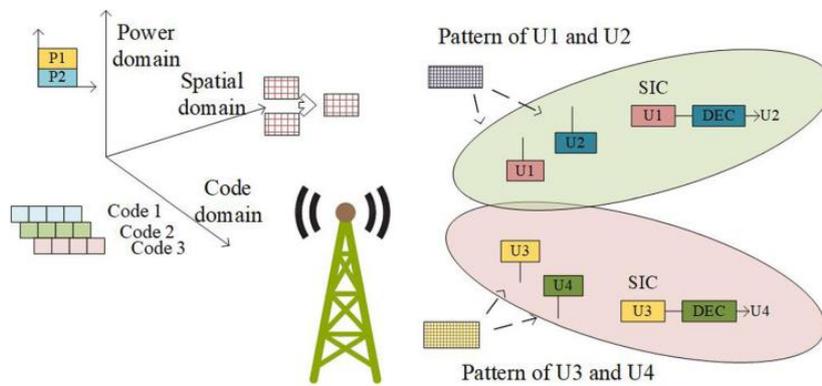


Figure III.4: Processus de transmission PDMA en liaison descendante[58]

III.2.2.2 Détection multiutilisateurs :

Le choix des techniques de détection multi-utilisateurs dépend en particulier du compromis souhaité entre la complexité du décodage et la durée de vie du système., le schéma PDMA peut être réalisé avec les algorithmes SIC ou MPA où le nombre d'éléments non nuls dans les motifs est variable en fonction de la sélection aléatoire des éléments. Par conséquent, les motifs PDMA peuvent être considérés comme une sorte de matrice LDPC irrégulière[59]. Si l'on considère le récepteur MPA, le nombre de nœud de fonction connectés à chaque nœud variable peut être différent, comme le montre la figure III.5. L'irrégularité des motifs augmenterait la diversité des utilisateurs, mais au prix d'une plus grande complexité, en particulier pour un nombre massif de dispositifs connectés.

Avec le récepteur SIC, le processus de décodage est similaire à celui du MUSA. Cependant, la caractéristique d'éparpillement des modèles peut réduire la diversité des utilisateurs et augmenter le problème de la propagation des erreurs.

_____ Chapitre III : Étude des performances et simulation des schémas SCMA, MUSA et PDMA sous MATLAB

Prenons l'exemple de $k = 4$, la séquence d'étalement du premier utilisateur comporte 4 éléments non nuls, c'est-à-dire que l'ordre de diversité est de 4, et donc le symbole du premier utilisateur est le plus fiable parmi ceux de tous les autres utilisateurs. Par conséquent, la probabilité du symbole du premier utilisateur peut converger rapidement, ce qui sera bénéfique pour la convergence des probabilités des symboles des autres utilisateurs ayant des ordres de diversité inférieurs.

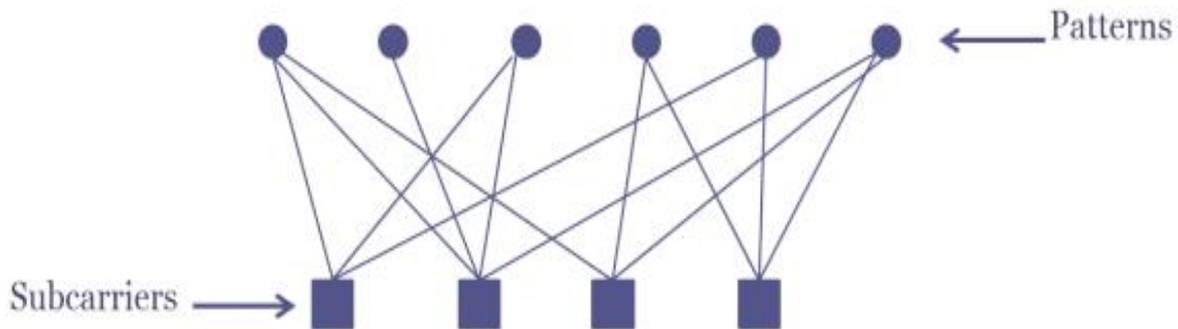


Figure III.5: Graphique du facteur MPA pour le schéma PDMA avec $J = 6$ et $K = 4$ [60]

III.2.3 Le schéma SCMA :

L'accès multiple par codes épars SCMA (Sparse code multiple access) a été proposé pour la première fois par Nikopour et Baligh[61].c'est une technique d'accès multiple qui permet à plusieurs utilisateurs d'accéder simultanément à la même bande de fréquences en utilisant des codes épars uniques. Le SCMA est principalement conçu pour le système de communication 5G, qui devrait prendre en charge un grand nombre de dispositifs et d'applications de communication de type machine (MTC).

Le SCMA combine l'étalement à faible densité (LDS) et la modulation multidimensionnelle (MDM) par le processus de codage SCMA en utilisant différentes opérations telles que le mappage, la permutation dimensionnelle, la conjugaison et la rotation de phase.[63] [62].

Dans le SCMA, chaque utilisateur se voit attribuer un livre de codes unique et dédié comprenant M mots de codes multidimensionnels. Chaque code éparé unique est un vecteur de nombres complexes qui est utilisé pour moduler les données de l'utilisateur avant la transmission. La nature éparse du code signifie que seuls quelques éléments du code sont non nuls, ce qui permet de réduire les interférences entre les différents utilisateurs. Le nombre d'éléments non nuls N doit être inférieur à la dimension K du mot de code($N \ll K$) pour

**_____ Chapitre III : Étude des performances et simulation des schémas
SCMA, MUSA et PDMA sous MATLAB**

permettre de réduire le nombre d'utilisateurs brouilleurs sur chaque sous-porteuse, ce qui conduit à une meilleure séparation des signaux. De plus, les éléments non nuls doivent être laissés aux mêmes positions parmi tous les mots de code d'un livre de code donné, mais ils doivent varier d'un livre de code à l'autre afin de réduire la collision des utilisateurs.

Le nombre maximum de livres de codes possibles, qui peut être généré tout en respectant les restrictions de conception, est calculé comme suit :

$$C(N, K) = \frac{K!}{(K-N)N!} \quad (\text{III.11})$$

III.2.3.1 Modèle du système :

Dans la liaison montante SCMA, différents livres de codes sont attribués à différents utilisateurs. Nous supposons que le nombre de livres de codes ou d'utilisateurs est j , que chaque livre de codes contient M mots de codes de longueur K , que le nombre d'éléments non nuls dans chaque mot de code est N et $N \ll K$, c'est-à-dire que les mots de codes sont épars.

Chaque utilisateur prélève un mot de code à K dimensions avec N éléments non nuls dans son livre de codes dédié. Ensuite, le flux de données d'entrée sera directement mappé par blocs de $\log_2 M$ au mot de code sélectionné, en sautant le processus de modulation bit-à-symbole. Tous les mots de code choisis par les J utilisateurs seront étalés puis transmis sur les K sous-porteuses orthogonales disponibles. Ainsi, le vecteur de signal reçu à la station de base sur toutes les sous-porteuses peut être exprimé comme suit :

$$y = \sum_{j=1}^J \text{diag}(h_j) x_j + n \quad (\text{III.12})$$

Où $x_j = [x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{Kj}]^T \in C^{k \times 1}$, $h_j = [h_{1j}, h_{2j}, \dots, h_{Kj}] \in C^{k \times 1}$ sont le mot de code et le vecteur canal du j -ème utilisateur s'étendant sur les K sous-porteuses, respectivement, et $n \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2 I_k)$ est le vecteur AWGN avec $n = [n_1, n_2 \dots n_k]$

chaque utilisateur ne répartit ses données que sur un nombre limité de sous-porteuses. Par conséquent, le nombre de signaux superposés sur chaque sous-porteuse sera inférieur au nombre d'utilisateurs actifs, ce qui signifie que l'interférence diminue efficacement entre les utilisateurs multiples avec une conception appropriée de mots de code épars.

Désignons par $\mathcal{N}(k) = \{(j | x_{kj} \neq 0)\}$ l'ensemble des utilisateurs émettant sur la sous-porteuse k et par $\mathcal{R}(k) = \{(k | x_{kj} \neq 0)\}$ l'ensemble des sous-porteuses transportant

l'information de l'utilisateur j . Le signal reçu sur la k ème sous-porteuse peut être représenté comme suit [64]

$$y = \sum_{j \in \mathcal{N}(k)} h_{kj} x_{kj} + n_k \quad (\text{III.13})$$

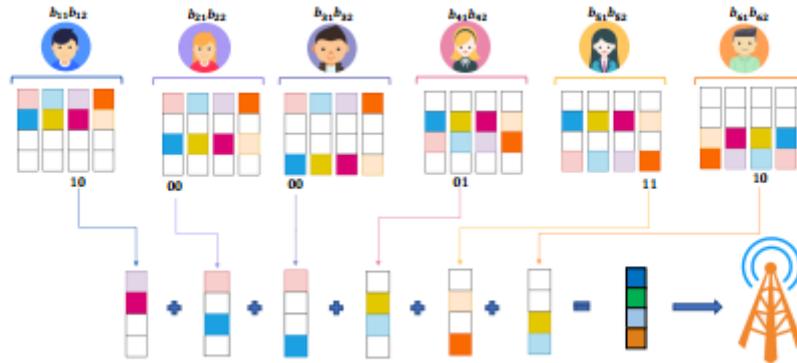


Figure III.6: Multiplexage de code SCMA[65]

III.2.3.2 Détection multi utilisateurs :

La plupart des travaux existants sur les détecteurs de SCMA utilisent MPA ou l'une de ses variantes, ou une combinaison de MPA et d'autres méthodes. MPA (Message Passing Algorithm) est définie comme une technique de décodage parallèle itérative basée sur le passage de l'information extrinsèque des nœuds de fonctions aux nœuds variables et vice versa [66]. comme l'illustre la figure III.7

le graphe contient deux types de nœuds différents : les nœuds fonctionnels y_j , qui représentent les K sous-porteuses, et les nœuds variables x_j , qui représentent les J utilisateurs actifs. Sachant qu'il existe une liaison entre un nœud variable x_j et un nœud fonctionnel y_j si et seulement si $x_{kj} \neq 0$.

_____ Chapitre III : Étude des performances et simulation des schémas SCMA, MUSA et PDMA sous MATLAB

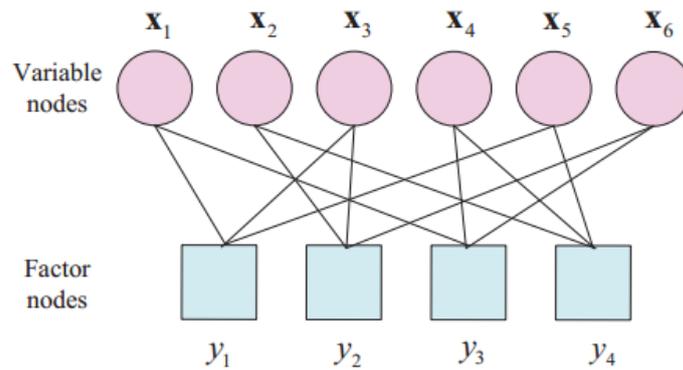


Figure III.7 :Représentation de MPA sous forme de graphe factoriel. [63]

III.3 Comparaison entre les trois schémas NOMA:

Les systèmes NOMA étudiés sont en concurrence pour relever les principaux défis du mMTC, à savoir une densité de connexion massive, une faible complexité du système et une faible consommation d'énergie. ils diffèrent dans leur approche de la modulation et dans leur capacité à gérer les interférences entre les signaux des différents utilisateurs. chaque système a ses propres caractéristiques, avantages et limites.

le tableau III.1 ci-dessous résume les techniques de multiplexages utilisés pour les trois schéma NOMA :

Tableau III.1 :Principales caractéristiques des différents systèmes NOMA[60]

Schéma NOMA	Techniques de Multiplexage
MUSA	Faible corrélation, séquences d'étalement complexes et aléatoires
PDMA	Séquences d'étalement clairsemées et binaires
SCMA	Livre de codes clairsemé, multidimensionnel et complexe

Le tableau III.2 présente les récepteurs applicables aux schémas NOMA étudiés .Il convient de préciser que cela ne signifie pas qu'il s'agit des seuls récepteurs applicables avec ces schémas. En fait, chaque schéma peut être utilisé avec d'autres techniques, mais au prix d'une performance et d'une complexité de décodage différentes.

**_____ Chapitre III : Étude des performances et simulation des schémas
SCMA, MUSA et PDMA sous MATLAB**

Tableau III.2: Les récepteurs applicables aux schémas NOMA étudiés[60]

Schéma NOMA	SIC	MPA	SIC-MPA assemblé
MUSA	✓		
PDMA	✓	✓	
SCMA	✓	✓	✓

III.3.1 La complexité du récepteur :

La complexité du récepteur pour les schémas SCMA, PDMA et MUSA dépend de plusieurs facteurs, notamment le nombre d'utilisateurs, le nombre de symboles modulés et la longueur des codes ou des motifs de modulation utilisés.

En général, la complexité du récepteur est liée à la complexité de la détection des symboles des différents utilisateurs et à la gestion des interférences entre les différents signaux, Cette partie consiste à comparer la complexité des récepteurs typiques pour les schémas NOMA étudiés, comme le résume le tableau III.3:

❖ Le récepteur MPA :

L'algorithme MPA est un algorithme de décision douce qui estime la probabilité a posteriori (APP : a posteriori probabilité) de chaque symbole transmis. Dans le contexte du NOMA, la probabilité a posteriori de chaque symbole est estimée pour chaque utilisateur. L'algorithme prend en entrée le signal reçu, les informations sur le canal et les probabilités a priori des symboles transmis. Le calcul des APP pour chaque symbole est effectué de manière itérative jusqu'à ce que la convergence soit atteinte. Le nombre d'itérations nécessaires à la convergence dépend des paramètres du système et des critères de convergence utilisés.

En résumé, la complexité de calcul du récepteur MPA est importante $\mathcal{O}(TK|C|^{d_f})$, où T est le nombre d'itérations, K est le nombre d'éléments de ressource, d_f est le nombre maximal d'utilisateurs transmettant sur chaque élément de ressource et $|C|$ est le nombre de mots de code possibles dans chaque livre de codes[67], [68]. La complexité peut être réduite en combinant l'algorithme MPA avec d'autres algorithmes.

_____ Chapitre III : Étude des performances et simulation des schémas SCMA, MUSA et PDMA sous MATLAB

❖ le récepteur MMSE-SIC :

le récepteur MMSE-SIC (Minimum Mean Squared Error-Successive Interference Cancellation) est un algorithme de décision douce qui estime les symboles transmis de chaque utilisateur en utilisant le critère de l'erreur quadratique moyenne minimale (MMSE) et annule les interférences causées par les symboles des utilisateurs précédemment détectés. Ce récepteur génère une complexité de $\mathcal{O}(|J|^3)$, principalement pour le calcul de la matrice MMSE, qui croît logarithmiquement avec le nombre d'utilisateurs J [69], [70]. Cette complexité est généralement inférieure à celle des algorithmes MUD à décision douce tels que MPA mais supérieure à celle des algorithmes MUD à décision difficile tels que l'algorithme SIC.

Tableau III.3 :Complexité de décodage des récepteurs NOMA typiques[60]

Récepteurs typiques du NOMA	MPA	MMSE-SIC
Complexité	$\mathcal{O}(TK C ^{d_f})$	$\mathcal{O}(J ^3)$

III.3.2 La complexité du conception :

L'un des principaux défis de la conception des ressources NOMA est la répartition de la puissance et du débit entre les utilisateurs. . Dans le cas de SCMA, La conception des livres de codes SCMA est assez complexe. Les livres de codes doivent être conçus avec soin. En outre, ils doivent être générés par la station de base afin de garantir le respect des conditions définies. Ensuite, les livres de codes sont attribués aux utilisateurs actifs.

Pour le MUSA et le PDMA, les utilisateurs sont séparés par des séquences d'étalement complexes ou binaires, respectivement. En fait, chaque utilisateur peut choisir de manière aléatoire et autonome sa séquence courte sans coordination avec la station de base. ce qui garantit un processus d'émission simple et peu complexe. Comme le nombre de séquences MUSA possibles est très élevé, la probabilité de collision est inférieure à celle du PDMA.

_____ Chapitre III : Étude des performances et simulation des schémas SCMA, MUSA et PDMA sous MATLAB

Tableau III.4: Comparaison des performances des schémas NOMA[60]

Schéma NOMA	Complexité du conception	Capacité de surcharge	Complexité du décodage
MUSA(SIC)	Faible	Elevé	Faible
PDMA(SIC)	Faible	Faible	Faible
SCMA(MPA)	Elevé	Moyen	Elevé

III.3.3 La capacité de surcharge :

La capacité de surcharge (overload capacity) des systèmes NOMA fait référence à la capacité du système à gérer un nombre élevé d'utilisateurs actifs qui tentent d'accéder au réseau simultanément. En d'autres termes, il s'agit de la capacité du système à fonctionner de manière efficace et fiable même lorsque la demande dépasse les niveaux de charge normaux. Les systèmes NOMA ont des capacités de surcharge différentes en fonction de leurs techniques de multiplexage respectives et des conditions du système, comme le résume le tableau III.4

- la conception des mots de code utilisateur en SCMA est limitée par plusieurs conditions, notamment la rareté des mots de code et le mappage des sous-porteuses. Cela peut limiter le nombre de codes uniques disponibles pour chaque utilisateur, ce qui peut réduire la capacité de surcharge du système. En général, la capacité de surcharge de SCMA est considérée comme modérée.
- le schéma MUSA a un potentiel important pour supporter un grand nombre de dispositifs car il peut construire un grand nombre de séquences complexes en utilisant un petit ensemble de constellations . la capacité de surcharge de MUSA est considérée comme élevée.
- le nombre maximal de séquences binaires possibles en PDMA est limité à $2^k - 1$, ce qui peut limiter la capacité de surcharge du système. En général, la capacité de surcharge de PDMA est considérée comme faible.

III.4 Scénarios adaptés :

Chaque schéma de NOMA peut être adapté à différents scénarios en fonction de ses avantages et de ses inconvénients. Il est important de comprendre les caractéristiques de chaque schéma pour choisir celui qui convient le mieux à un scénario spécifique. dans cette section on va citer les scénarios possibles adaptés par chaque schéma :

Chapitre III : Étude des performances et simulation des schémas SCMA, MUSA et PDMA sous MATLAB

- le SCMA peut être particulièrement bien adapté aux scénarios exigeant une grande fiabilité ou aux petites cellules avec un nombre modéré d'utilisateurs actifs simultanément, il peut également être utilisé dans une variété d'autres scénarios en fonction des exigences et des contraintes spécifiques du réseau.
- le MUSA peut être adaptée aux scénarios comportant un nombre massif de dispositifs ayant une faible tolérance à la fiabilité et sont dispersés dans la cellule afin de garantir des puissances de réception différentes.
- Le schéma PDMA peut être plus adaptable aux scénarios avec des communications à faible latence et un petit nombre d'utilisateurs actifs, le PDMA peut être combiné à d'autres techniques, telles que le récepteur MPA, pour améliorer ses performances globales.

Le tableau ci-dessous résume tous ce qu'on a traité sur les trois schémas typiques de NOMA et donne une vue d'ensemble de chaque schéma et de ses principales caractéristiques :

Tableau III.5: Caractéristiques des différents schémas NOMA. [60]

Schéma de NOMA	Avantages	Inconvénients	Les scénarios Adaptés
MUSA	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Faible latence ➤ Capacité de surcharge élevée ➤ Faible surcharge de signalisation ➤ Détection aveugle robuste ➤ Faible consommation d'énergie ➤ Faible complexité du système ➤ Séquences d'étalement simples conception 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Problème de propagation des erreurs SIC ➤ Le temps de latence du SIC augmente avec le nombre d'utilisateurs 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Cellule macro avec un grand nombre d'utilisateurs dispersés ➤ Scénario de tolérance à la fiabilité

Chapitre III : Étude des performances et simulation des schémas SCMA, MUSA et PDMA sous MATLAB

PDMA	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Conception de séquences d'étalement binaires simples ➤ Faible latence ➤ Faible surcharge de signalisation ➤ Faible consommation d'énergie ➤ Domaines de multiplexage multiples : code, puissance espace 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Faible capacité de surcharge ➤ Problème de propagation de l'erreur SIC ➤ L'irrégularité de la densité augmente la complexité de MPA 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Scénarios avec un débit de données relativement élevé ➤ Scénario de faible latence et d'accès libre avec une exigence de surcharge limitée ➤ Scénario avec une fiabilité relativement élevée
SCMA	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Haute fiabilité ➤ Gain de mise en forme de la constellation multidimensionnelle ➤ Faible interférence entre utilisateurs ➤ Mots de code utilisateur épars ➤ Détection multi-utilisateurs robuste 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Capacité de surcharge limitée ➤ Complexité de décodage élevée ➤ Complexité élevée de la conception des livres de codes ➤ Coût élevé de la signalisation 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Petite cellule avec un nombre limité d'utilisateurs actifs ➤ Haute fiabilité

III.5 Simulation et résultats :

- **Le logiciel MATLAB :**

MATLAB est l'acronyme de "Matrix Laboratory", c'est une plate-forme de programmation conçue spécifiquement pour les ingénieurs et les scientifiques afin d'analyser et de concevoir des systèmes et des produits qui transforment notre monde, MATLAB possède son propre environnement de développement intégré (IDE) et sa propre collection de bibliothèques. Comme il était initialement connu sous le nom de langage de programmation matricielle, Il s'agit d'un langage de programmation matriciel permettant l'expression la plus naturelle des mathématiques informatiques.

- **Simulation de la capacité des systèmes OMA et NOMA :**

Maintenant que nous disposons les expressions mathématiques des taux réalisables dans le chapitre 2 pour comparer entre la capacité du NOMA et OMA. Nous Considérons maintenant un scénario de communication en liaison descendante avec une station de base (BS) et 3 utilisateurs, Supposons que l'utilisateur 1, avec le canal h_1 est le plus éloigné de la station de base donc il est l'utilisateur le plus faible, L'utilisateur 2 est le suivant et L'utilisateur 3 est l'utilisateur le plus proche ou le plus fort. Cela signifie que les conditions de canal des utilisateurs sont organisées comme suit : $|h_1|^2 < |h_2|^2 < |h_3|^2$

Tableau III.6: Les distances des utilisateurs utilisés dans la simulation

Utilisateur	U1	U2	U3
Distance	$d_1=5m$	$d_2=3m$	$d_3=2m$

En variant le SNR de 0 à 30, Les graphiques de la capacité se présentent comme suit :

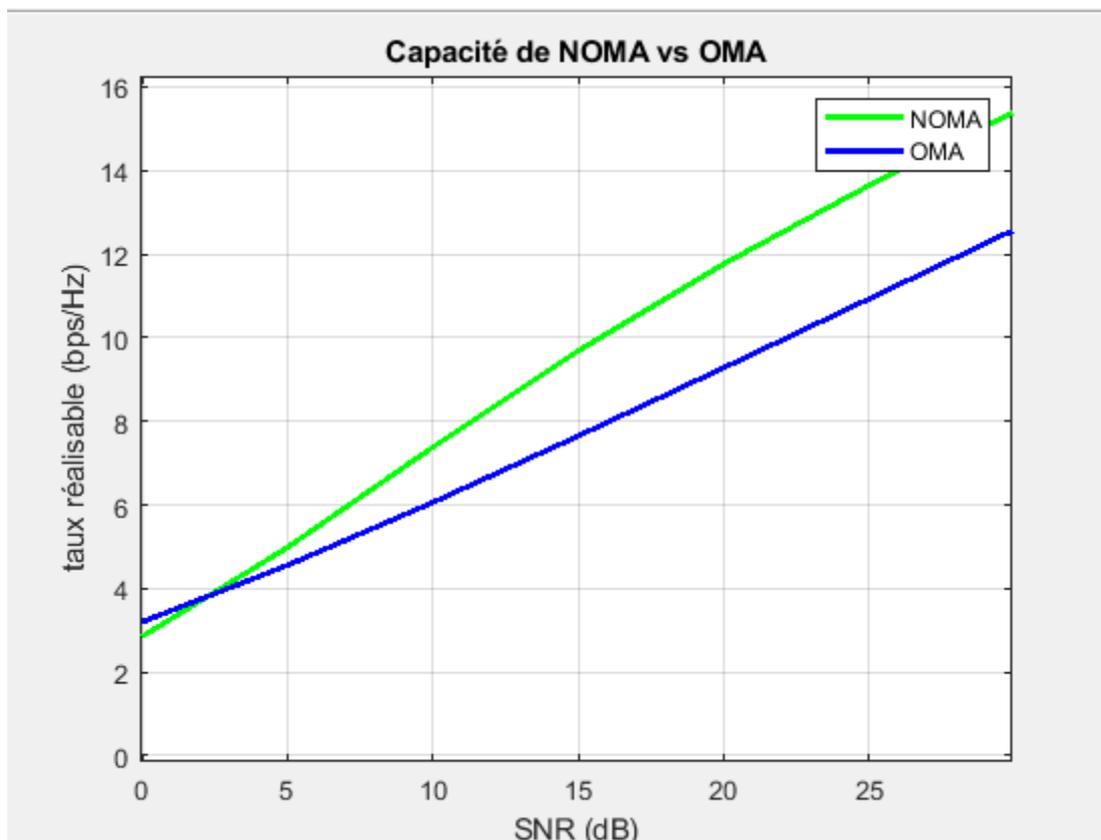


Figure III.8:Représentation du capacité de NOMA et OMA

_____ Chapitre III : Étude des performances et simulation des schémas SCMA, MUSA et PDMA sous MATLAB

➤ Interprétation de la représentation graphique :

Nous pouvons observer que la NOMA offre une capacité élevée par rapport à l'OMA, car les utilisateurs sont multiplexés sur la même ressource fréquentielle et temporelle. Cela permet une utilisation plus efficace des ressources spectrales et une amélioration de la capacité globale du système.

- **Simulation de la performance du BER pour un système NOMA à 3 utilisateurs :** nous allons multiplexer trois utilisateurs, chacun suivant la modulation QPSK, sur une seule porteuse de fréquence pour Simuler les caractéristiques du BER en fonction de la puissance d'émission de ce système .

➤ Les paramètres de simulation :

Selon les principes du NOMA (chapitre 2 : CONCEPTS DE BASE DU NOMA), l'utilisateur le plus faible doit se voir attribuer la plus grande puissance et l'utilisateur le plus fort doit se voir attribuer la plus petite puissance. Par conséquent, les coefficients d'attribution de puissance doivent être ordonnés comme suit : $a_1 > a_2 > a_3$

Le processus de l'annulation successive des interférences pour les trois utilisateurs se fait comme suit :

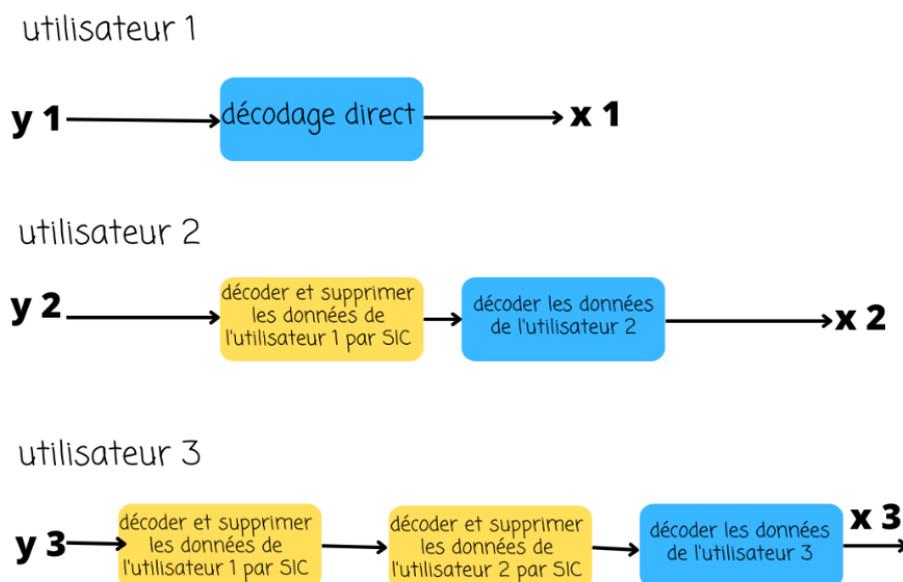


Figure III.9 : Le processus du SIC des trois utilisateurs

Chapitre III : Étude des performances et simulation des schémas SCMA, MUSA et PDMA sous MATLAB

Le **Tableau III.7** suivant présente les distances et les coefficients d'allocation de puissance utilisés dans la simulation:

Utilisateur	U1	U2	U3
Distance	$d_1=500\text{m}$	$d_2=200\text{m}$	$d_3=70\text{m}$
coefficient d'allocation de puissance	$a_1=0.8$	$a_2=0.15$	$a_3=0.05$

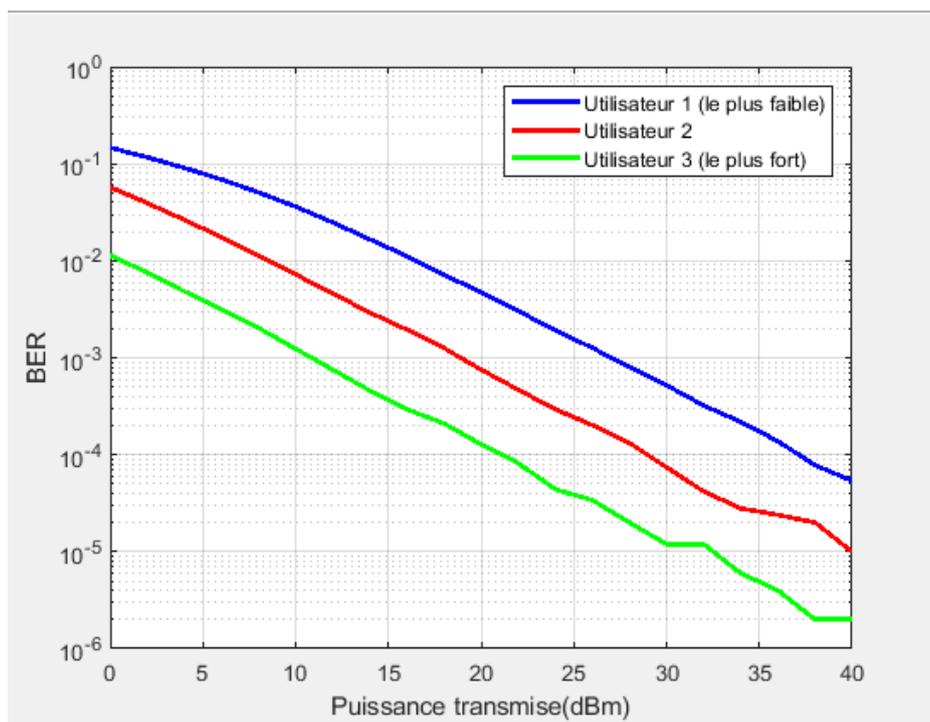


Figure III.10: Représentation du BER de NOMA à 3 utilisateurs en fonction de la puissance transmise

➤ **Interprétation de la représentation graphique :**

Nous pouvons constater sur la figure III.9 que l'utilisateur 3 a le BER le plus bas du groupe. Cela s'explique par le fait qu'il est le plus proche de la station de base, ce qui lui permet de bénéficier d'un meilleur rapport signal sur bruit (SNR) et donc de pouvoir décoder son signal avec précision et de supprimer les interférences des autres utilisateurs pour améliorer encore plus la qualité de son signal.

_____ Chapitre III : Étude des performances et simulation des schémas SCMA, MUSA et PDMA sous MATLAB

En revanche, on observe que le BER des utilisateurs 1 et 2 est plus élevé, malgré le fait que ces derniers disposent des coefficients de puissance plus importants. Cela s'explique par le fait que ces utilisateurs ont un état de canal plus mauvais que celui de l'utilisateur 3, ce qui rend leurs signaux plus sensibles aux interférences et donc plus difficiles à décoder avec précision.

- **Simulation de la performance du BER pour les différents schémas NOMA : MUSA ,PDMA et SCMA**

Dans cette section, notre objectif est de comparer les performances des différents schémas NOMA dans les mêmes conditions du système. Pour cela, nous allons définir les paramètres du système que nous considérons

➤ **Les paramètres de simulation :**

Tableau III.8 ci-dessous présente Les paramètres de simulation :

Model du canal	évanouissement de Rayleigh
Signatures d'accès multiple	MUSA : Séquences d'étalement complexes SCMA : Mots codés épars PDMA : Séquences d'étalement binaires
Nombre d'utilisateurs	$J = 6$
Nombre de sous-porteuses	$K = 4$
Type de Modulation	QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)
Ordre de modulation	$M=4$

nous visons à évaluer la performance du BER (bit error rate) obtenu par SCMA, MUSA et PDMA en fonction du SNR. Plus précisément, nous comparons les performances d'un système surchargé avec une occupation de 150 % des ressources, en utilisant $J = 6$ et $K = 4$. La présente simulation utilise en particulier la modulation QPSK.

Notre but est de sélectionner le schéma qui permet d'obtenir les meilleures performances en termes du BER.

- Simulation de la performance du BER pour le schéma MUSA:

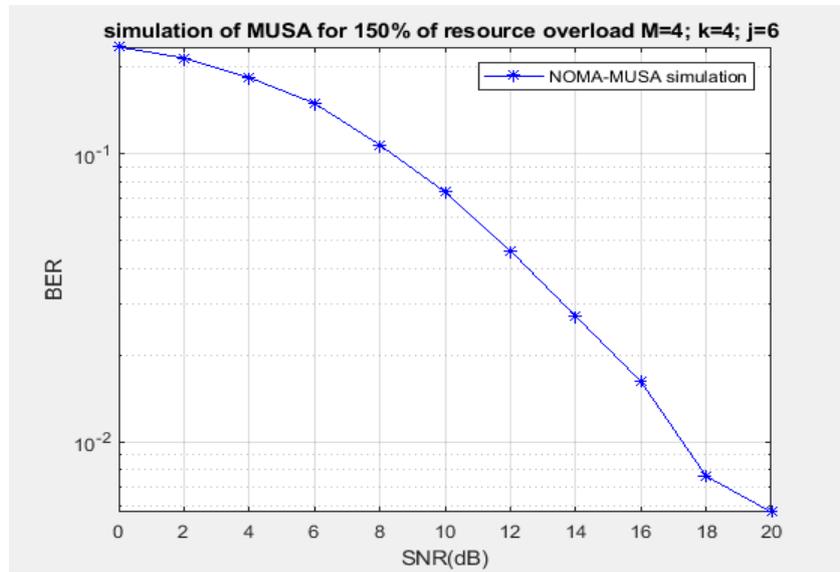


Figure III.11 :Représentation du BER de MUSA en fonction du SNR

- **Interprétation graphique:**

La figure III.11 illustre que le schéma MUSA réalise un niveau du BER moyen, Il permet d'atteindre un BER de $\sim 6 \times 10^{-3}$ à SNR= 20dB.

- Simulation de la performance du BER pour le schéma PDMA:

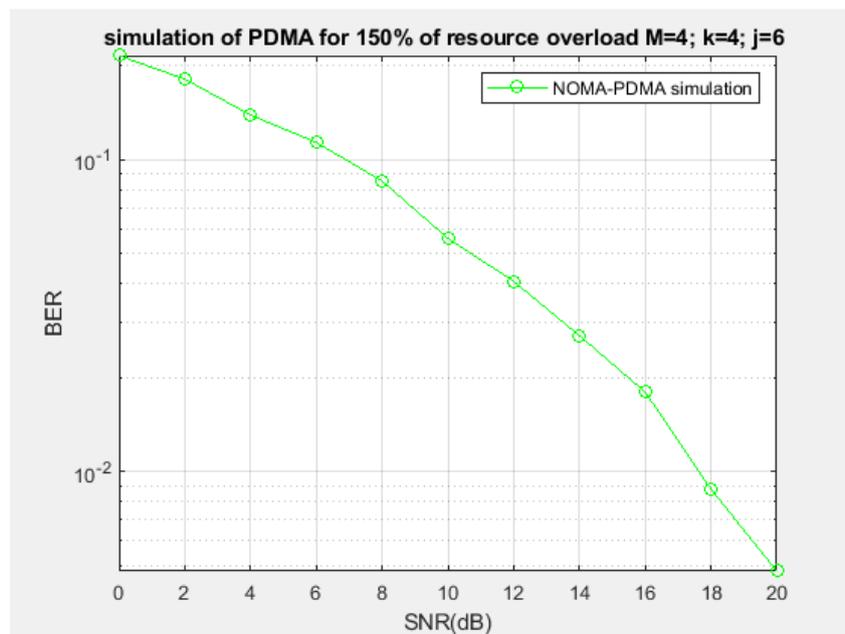


Figure III.12: Représentation du BER de PDMA en fonction du SNR

➤ **Interprétation graphique:**

Nous observons sur la figure III.12 que le schéma PDMA a le même comportement que MUSA . Il atteint des valeurs du BER très proches de celle du schéma MUSA , à SNR élevé on a des valeurs du BER de $\sim 5 \times 10^{-3}$

• **Simulation de la performance du BER pour le schéma SCMA :**

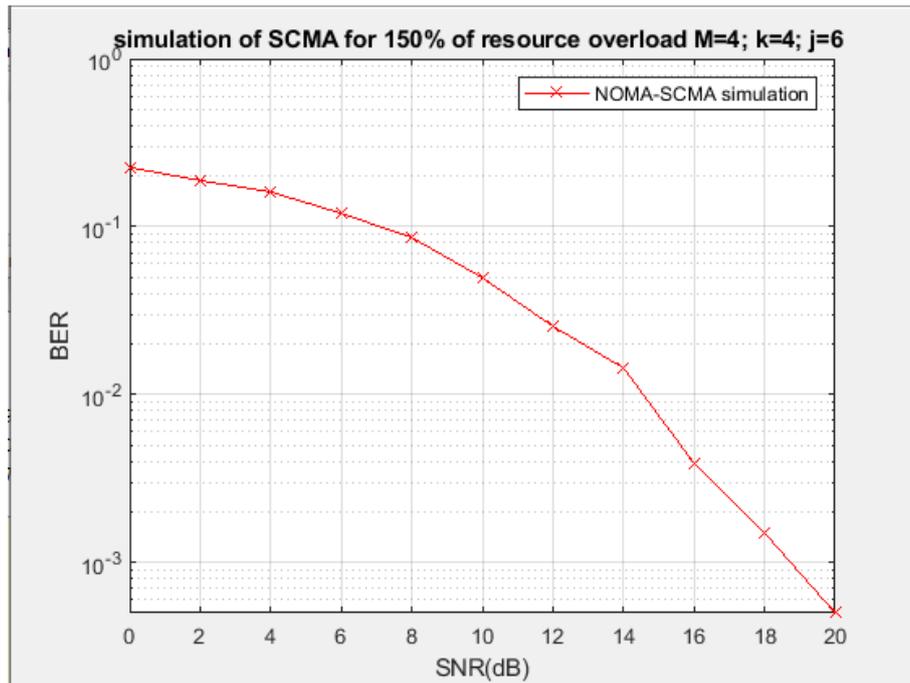


Figure III.13: Représentation du BER de SCMA en fonction du SNR

➤ **Interprétation graphique:**

le graphique de la figure III.13 représente le BER du schéma SCMA, nous remarquons qu'il permet d'obtenir un BER meilleur que les schémas MUSA et PDMA, de $\sim 4 \times 10^{-4}$ à SNR= 20dB

- Comparaison entre la performance du BER pour les trois schémas NOMA:

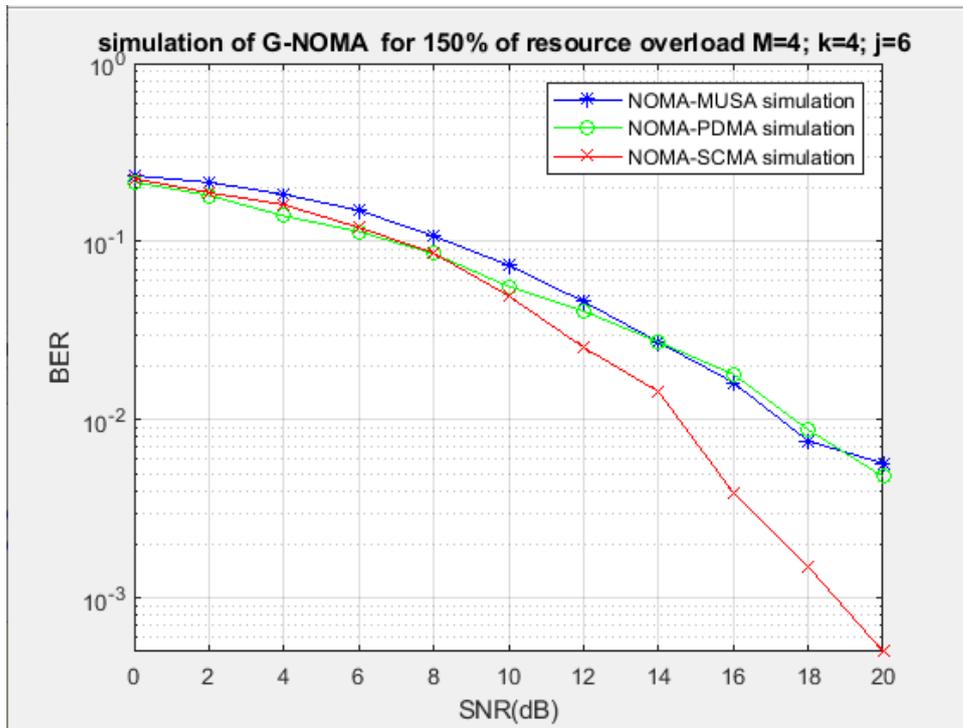


Figure III.14: Représentation du BER des trois schémas NOMA

Interprétation de la représentation graphique :

La figure III.14 représente une comparaison des performances de SCMA, MUSA et PDMA pour $k=4$ et $j=6$. Nous pouvons observer que les trois schémas offrent des performances du BER meilleurs à des valeurs du SNR élevé.

le SCMA a le meilleur BER tandis que MUSA et PDMA ont des résultats très similaires, les performances du MUSA et PDMA se dégradent considérablement par rapport à celles du SCMA, avec un seuil d'erreur au BER de $\sim 6 \times 10^{-3}$ ce qui indique que la conception quasi-optimale des mots de code clairsemés dans le SCMA est bénéfique pour l'amélioration des performances. En outre, il utilise la technique de détection multi-utilisateurs MPA, qui est capable de séparer les signaux des utilisateurs et de gérer l'interférence inter-utilisateurs grâce à un processus de décodage itératif sans propagation d'erreur.

_____ Chapitre III : Étude des performances et simulation des schémas SCMA, MUSA et PDMA sous MATLAB

III.5.1 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons principalement comparé les performances des trois schémas NOMA typiques en terme du BER, à savoir SCMA, MUSA et PDMA. Il s'avère que le SCMA présente les meilleures performances en raison de la conception quasi-optimale des mots de code clairsemés et du récepteur MPA, tandis que le MUSA et le PDMA présentent des performances très similaires.

III.6 Conclusion générale et perspectives :

Dans le chapitre 1, nous avons abordé les motivations de ce travail qui sont les défis imposés par les générations futures en ce qui concerne les techniques d'accès multiple, en particulier le besoin d'appareils connectés massivement sur les réseaux sans fil en présentant une vue d'ensemble de la technologie 5G, sur la base de plusieurs scénarios à savoir la bande large mobile améliorée, la communication massive de type machine et la communication hautement fiable à faible latence.

Ensuite le chapitre 2 nous a abouti à déduire que l'OMA vise à éviter les interférences entre les utilisateurs et à obtenir des signaux à faible complexité. Cependant, ces schémas orthogonaux ne permettent pas toujours d'atteindre la capacité des systèmes NOMA et sont sous-optimaux en termes d'efficacité spectrale.

Enfin dans le chapitre 3, les techniques d'accès multiple non orthogonal favorables aux communications mobiles 5G sont évaluées et comparées sur la base de leurs avantages, de leurs inconvénients et de leurs caractéristiques clés. Nous avons montré que SCMA présente les meilleures performances par rapport aux autres schémas étudiés mais il présente également certaines limites qu'il convient de prendre en compte pour les scénarios mMTC, à savoir la complexité du décodage et la complexité de la conception des livres de codes .

Cette étude comparative révèle que pour obtenir de meilleures performances du système NOMA, la conception de livres de codes épars dans SCMA, de séquences d'étalement à faible corrélation dans MUSA et de motifs non orthogonaux dans PDMA devrait être optimisée dans les travaux futurs. En outre, un récepteur robuste et peu complexe est également attendu pour le NOMA.

Au-delà de l'étude présentée dans ce travail , certaines questions restent ouvertes et doivent être approfondies. Ci-dessous, nous présentons quelques sujets qui peuvent être considérés comme la continuité naturelle de notre travail.

_____ **Chapitre III : Étude des performances et simulation des schémas SCMA, MUSA et PDMA sous MATLAB**

pour améliorer les performances des systèmes de communication sans fil un accès multiple hybride, qui combine les propriétés de la NOMA et de l'OFDMA, a été proposé dans [72]. Les résultats de la simulation ont confirmé la supériorité du schéma d'accès multiple hybride proposé par rapport au NOMA conventionnel. En outre, un schéma de transmission hybride qui se compose de NOMA et de TDMA a été proposé dans [73].

Dans cette technique, la bande de fréquences est divisée en sous-bandes orthogonales, chacune d'entre elles étant attribuée à un groupe d'utilisateurs à l'aide de l'OMA. Au sein de chaque groupe, le NOMA est utilisé pour permettre à plusieurs utilisateurs de partager la sous-bande à l'aide du multiplexage dans le domaine de la puissance. L'utilisation de NOMA au sein de chaque groupe permet d'accroître l'efficacité spectrale du système, tandis que l'utilisation d'OMA entre les groupes garantit l'absence d'interférences entre les utilisateurs. Cette approche hybride peut également réduire la complexité du système par rapport à l'utilisation d'un NOMA pur, car le nombre d'utilisateurs partageant une sous-bande est limité à un petit groupe.

Le NOMA hybride avec OMA est un domaine de recherche actif, et il a le potentiel d'améliorer les performances des systèmes de communication sans fil, en particulier dans le contexte des réseaux 5G et au-delà.

Chapitre III : Étude des performances et simulation des schémas SCMA, MUSA et PDMA sous MATLAB

III.7 Bibliographie :

Pour le chapitre I:

- [1] P. Popovski, K. F. Trillingsgaard, O. Simeone, and G. Durisi, “5G Wireless Network Slicing for eMBB, uRLLC, and mMTC: A Communication Theoretic View”, *IEEE Access*, vol. 6, pp. 55 765–55 779, 2018.
- [2] *Alternate*, “*electronic communication* Written by David E. Borth, Wayne Eric Stark, James S“. *Lehnert* Fact-checked by The Editors of Encyclopaedia Britannica
- [3] Salma OUDJI . “Analyse de la robustesse et des améliorations potentielles du protocole RadioFréquences Sub-GHz KNX utilisé pour l’IoT domotique“ Thèse de doctorat .
- [4] L. Dong, H. Zhao, Y. Chen, D. Chen, T. Wang, L. Lu, B. Zhang, L. Hu, L. Gu, B. Li, H. Yang, H. Shen, T. Tian, Z. Luo, and K. Wei, “Introduction on imt-2020 5g trials in china”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 8, pp. 1849–1866, Aug. 2017.
- [5] J.Rodriguez, “Fundamentals of 5g mobile networks”, in. Wiley, 2014, ch. 10, pp. 221–240
- [6] D. Wang, W. Meng, and J. Han, *Security and Privacy in New Computing Environments: Third EAI International Conference, SPNCE 2020, Lyngby, Denmark, August 6-7, 2020, Proceedings*, ser. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering. Springer International Publishing, 2021, <https://books.google.fr/books?id=O6kWEAAAQBAJ>.
- [7] Q. Qiu, S. Liu, S. Xu, and S. Yu, “Study on security and privacy in 5g-enabled applications”, *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2020, p. 8 856 683, Dec. 2020, issn: 1530-8669. doi: 10 . 1155 / 2020 / 8856683. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1155/2020/8856683>.
- [8] [Réseau mobile : Les différentes générations de réseau mobile \(minitel.fr\)](#)
- [9] [Timeline of 5G Standardization in ITU-R and 3GPP | NETMANIAS](#)
- [10] Rapport annuel 2018 de l’ETSI
- [11] IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 .
- [12] An inside look at mobile broadband standards development ,article d’ITU: [An inside look at mobile broadband standards development - ITU Hub](#)

Chapitre III : Étude des performances et simulation des schémas SCMA, MUSA et PDMA sous MATLAB

- [13] https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/201807/Documents/3_Erik_Guttman.pdf
- [14] [What is 5G Technology? | 5G, 5G-NR, MIMO, URLLC, and Network Slicing | Corning](#)
- [15] Ericsson, "Ericsson Mobility Report: 5G uptake even faster than expected", <https://www.ericsson.com/en/press-releases/2019/6/ericssonmobility-report-5g-uptake-even-faster-than-expected>, 2019.
- [16] W. Xiang, K. Zheng, and X. S. Shen, *5G mobile communications*. Springer, 2016.
- [17] C. Bockelmann et al., "Towards Massive Connectivity Support for Scalable mMTC Communications in 5G Networks", *IEEE Access*, vol. 6, pp. 28 969–28 992, 2018. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2837382.
- [18] "Technical Specification Group Services and System Aspects; Release 15 Description; Summary of Rel-15 Work Items, Release 15", *3GPP TR 21.915 V15.0.0*, 2019.
- [19] 3GPP, "Technical Specification Group Services and System Aspects; Release 16 Description; Summary of Rel-16 Work Items, Release 16", *3GPP TR 21.916 V1.0.0*, 2020.
- [20] "5G; Study on scenarios and requirements for next generation access technologies ", 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Report (TR) 38.913, Sep. 2018, Version 15.0.0.
<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/etsi/08d3693a-e5df-4610-ac4e-bee031d00f2e/etsitr-138-913-v15-0-0-2018-09>.
- [21] 3GPP-RP-163510, "Candidate NR multiple access schemes", Qualcomm Incorporated, RP, Mar. 2017.
- [22] Thèse de doctorat intitulée : A Key 6G Challenge and Opportunity -Connecting the Remaining 4 Billions: A Survey on Rural Connectivity
- [23] [5G KPIs | 5G Key Performance Indicators \(rfwireless-world.com\)](#)
- [24] [Qu'est-ce que la technologie 5G ? | Introduction à la technologie 5G, 5G-NR, MIMO, URLLC et découpages de réseau | Corning](#)

_____ Chapitre III : Étude des performances et simulation des schémas SCMA, MUSA et PDMA sous MATLAB

- [25] “Technical Specification Group Services and System Aspects; Release 15 Description; Summary of Rel-15 Work Items, Release 15”, *3GPP TR 21.915 V15.0.0*, 2019.
- [26] Xiao, M.; Mumtaz, S.; Huang, Y.; Dai, L.; Li, Y.; Matthaiou, M.; Karagiannidis, G.K.; Björnson, E.; Yang, K.; Chih-Lin, I.; et al. Millimeter-wave communications for future mobile networks (guest editorial), part I. *IEEE J. Sel. Areas Commun.* 2017, 35, 1425–1431.
- [27] Singh, R.; Lehr, W.; Sicker, D.; Huq, S.M. Beyond 5G: The Role of THz Spectrum. Available online: <https://ssrn.com/abstract=3426810> (accessed on 25 July 2019).
- [28] Kurve, A. Multi-user MIMO systems: The future in the making. *IEEE Potentials* 2009, 28, 37–42. [Google Scholar] [CrossRef]
- [29] Yang, B.; Yu, Z.; Lan, J.; Zhang, R.; Zhou, J.; Hong, W. Digital Beamforming-Based Massive MIMO Transceiver for 5G Millimeter-Wave Communications. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **2018**, 66, 3403–3418.
- [30] [The Wonders of 5G Beamforming – Huawei BLOG](#)
- [31] 5GBytes:FullDuplexExplained.Availableonline:
<https://spectrum.ieee.org/video/telecom/wireless/5g-bytes-full-duplex-explained>
(accessed on 20 January 2020).

Pour le chapitre II :

- [32] M. Vaezi, Z. Ding, and H. V. Poor, *Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and Beyond*. Springer, 2019, isbn: 978-3-319-92089-4
- [33] Navita and Amandeep, “Performance analysis of ofdma, mimo and sc-fdma technology in 4g lte networks”, in *2016 6th International Conference - Cloud System and Big Data Engineering (Confluence)*, 2016, pp. 554–558. doi: 10.1109/CONFLUENCE.2016.7508181.
- [34] Aliou Diallo. “Systèmes multi-antennes pour diversité et MIMO”. Autre. Université Nice Sophia An-tipolis, 2007. Français.
- [35] P. Wang, J. Xiao, et L. P. -Comparaison des approches orthogonales et non-orthogonales pour les futurs systèmes cellulaires sans fil, *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 1, no. 3, pp. 4-11, Sep. 2006.
- [36] L. Dai, B. Wang, Z. Ding, Z. Wang, S. Chen, and L. Hanzo, ““A Survey of Non-Orthogonal Multiple Access for 5G””, *IEEE Communications Surveys*

_____ **Chapitre III : Étude des performances et simulation des schémas
SCMA, MUSA et PDMA sous MATLAB**

- Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 2294–2323, 2018. doi: 10.1109/COMST.2018.2835558
- [37] Y. Chen, A. Bayesteh, Y. Wu, B. Ren, S. Kang, S. Sun, Q. Xiong, C. Qian, B. Yu, Z. Ding, *et al.*, “Toward the standardization of non-orthogonal multiple access for next generation wireless networks”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 3, pp. 19–27, 2018.
- [38] Y. Liu, Z. Qin, M. ElKashlan, Z. Ding, A. Nallanathan, and L. Hanzo, “Nonorthogonal multiple access for 5g and beyond”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 12, pp. 2347–2381, Dec. 2017
- [39] Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Benjebbour, T. Nakamura, A. Li, and K. Higuchi, “Non-orthogonal multiple access (noma) for cellular future radio access”, in *2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Jun. 2013, pp. 1–5. doi: 10.1109/VTCSpring.2013.6692652.
- [40] S. M. R. Islam, N. Avazov, O. A. Dobre, and K.-s. Kwak, “Power-Domain NonOrthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G Systems: Potentials and Challenges”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 721–742, 2017.
- [41] R. Razavi, R. Hoshyar, M. A. Imran, and Y. Wang, —Information theoretic analysis of LDS scheme,|| *IEEE Commun. Lett.*, vol. 15, no. 8,pp. 798–800, Jun. 2011.
- [42] T. Cover, —Broadcast channels,|| *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 18, no. 1, pp. 2-14, Jan 1972.
- [43] Souvik Sen, Duke University; Naveen Santhapuri, Duke University; Romit Roy Choudhury, Duke University; Srihari Nelakuditi, Univ. of South Carolina : Successive Interference Cancellation: A Back of the Envelope Perspective; Conference: Proceedings of the 10th ACM Workshop on Hot Topics in Networks. HotNets 2010, Monterey, CA, USA - October 20 - 21, 2010
- [44] Resource Allocation and Optimization for the Non-Orthogonal Multiple Access
These de doctorat de l’Institut Polytechnique de Paris préparée à Telecom Paris par
LOU SALAUN
- [45] M. B. Shahab, R. Abbas, M. Shirvanimoghaddam, and S. J. Johnson, “Grant free non-orthogonal multiple Access for IoT: A survey”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020.

_____ Chapitre III : Étude des performances et simulation des schémas SCMA, MUSA et PDMA sous MATLAB

- [46] Y. Yuan, Z. Yuan, and L. Tian, “5g non-orthogonal multiple access study in 3gpp”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 7, pp. 90–96, 2020. doi: 10.1109/MCOM.001.1900450.
- [47] Z. Wei, J. Guo, D. W. K. Ng, and J. Yuan, “Fairness comparison of uplink noma and oma”, in *2017 IEEE 85th vehicular technology conference (VTC Spring)*, IEEE, 2017, pp. 1–6.
- [48] « Study on downlink multiuser superstition transmission (MUST) for LTE (Release 13) », Tech. Rep. 3GPP TR 36.859, 2015. Voir à: [Google Scholar](#)
- [49] Hybrid Generalized Non-Orthogonal Multiple Access for the 5G Wireless Networks
Masters Thesis by Samson Manyani Zitha

Pour le chapitre III:

- [50] Z. Yuan, G. Yu, W. Li, Y. Yuan, X. Wang, and J. Xu, “Multi-user shared access for internet of things”, in *2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, May 2016, pp. 1–5.
- [51] Thèse de doctorat intitulé :Contributions to non-orthogonal multiple access techniques for massive communications Par Manel REBHI
- [52] L. Dai, B. Wang, Y. Yuan, S. Han, C. I, and Z. Wang, “Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 9, pp. 74–81, Sep. 2015, issn: 0163-6804. doi: 10.1109/MCOM.2015.7263349
- [53] Y. S. Cho, J. Kim, W. Y. Yang, and C. G. Kang, *MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB*. John Wiley & Sons, 2010.
- [54] B. Wang, K. Wang, Z. Lu, T. Xie, and J. Quan, “Comparison study of non-orthogonal multiple access schemes for 5g”, in *2015 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting*, Jun. 2015, pp. 1–5. doi: 10.1109/BMSB.2015.7177186.
- [55] J. Zeng, B. Li, X. Su, L. Rong, and R. Xing, “Pattern division multiple access (pdma) for cellular future radio access”, in *2015 International Conference on Wireless Communications Signal Processing (WCSP)*, 2015, pp. 1–5. doi: 10.1109/WCSP.2015.7341229.
- [56] S. Chen, B. Ren, Q. Gao, S. Kang, S. Sun, and K. Niu, “Pattern Division Multiple Access - A Novel Nonorthogonal Multiple Access for Fifth-Generation

_____ **Chapitre III : Étude des performances et simulation des schémas
SCMA, MUSA et PDMA sous MATLAB**

- Radio Networks”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 4, pp. 3185–3196, Apr. 2017.
- [57] X. Dai, Z. Zhang, B. Bai, S. Chen, and S. Sun, “Pattern Division Multiple Access: A New Multiple Access Technology for 5G”, *IEEE Wireless Communications*, vol. 25, no. 2, pp. 54–60, 2018. doi: 10.1109/MWC.2018.1700084.
- [58] Research on PDMA communication system based on complete complementary sequence by Shufeng Li, Baoxin Su and Libiao Jin
- [59] P. Trifonov, “Design of structured irregular ldpc codes”, in *2008 IEEE Region 8 International Conference on Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering*, 2008, pp. 20–24. doi: 10.1109/SIBIRCON.2008.4602580.
- [60] Thèse de doctorat intitulée : Study of non-orthogonal multiple access schemes for the massive deployment of IoT in future cellular networks de L’INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES RENNES par Wissal BEN AMEUR
- [61] H. Nikopour and H. Baligh, “Sparse code multiple access”, in *2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Sep. 2013, pp. 332–336.
- [62] B. Di, L. Song, and Y. Li, “Radio resource allocation for uplink sparse code multiple access (SCMA) networks using matching game,” in *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1–6, Kuala Lumpur, 2016
- [63] M. Taherzadeh, H. Nikopour, A. Bayesteh, and H. Baligh, “Scma codebook design”, in *2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall)*, Sep. 2014, pp. 1–5. doi: 10.1109/VTCFall.2014.6966170.
- [64] B. Wang, K. Wang, Z. Lu, T. Xie, and J. Quan, “Comparison study of non-orthogonal multiple access schemes for 5g”, in *2015 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting*, Jun. 2015, pp. 1–5. doi: 10.1109/BMSB.2015.7177186.
- [65] Contributions to non-orthogonal multiple access techniques for massive communications, Doctoral Thesis of Le Mans University in conjunction with The University of Nantes, Par Manel REBHI

_____ **Chapitre III : Étude des performances et simulation des schémas
SCMA, MUSA et PDMA sous MATLAB**

- [66] R. Hoshyar, F. P. Wathan, and R. Tafazolli, “Novel low-density signature for synchronous cdma systems over awgn channel”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 56, no. 4, pp. 1616–1626, 2008.
- [67] M. Taherzadeh, H. Nikopour, A. Bayesteh, and H. Baligh, “Scma codebook design”, in *2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall)*, Sep. 2014, pp. 1–5. doi: 10.1109/VTCFall.2014.6966170.
- [68] V. P. Klimentyev and A. B. Sergienko, “A low-complexity scma detector for awgn channel based on solving overdetermined systems of linear equations”, in *Problems of Redundancy in Information and Control Systems (REDUNDANCY), 2016 XV International Symposium*, IEEE, 2016, pp. 61–65.
- [69] N. I. Miridakis and D. D. Vergados, “A Survey on the Successive Interference Cancellation Performance for Single-Antenna and Multiple-Antenna OFDM Systems”, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 15, no. 1, pp. 312–335, 2013. doi: 10.1109/SURV.2012.030512.00103.
- [70] Y. Wu and H. Zhu, “Complexity Comparison between Two Optimal-Ordered SIC MIMO Detectors Based on Matlab Simulations”, *arXiv preprint arXiv:2003.03732*, 2020.
- [71] ZTE, ZTE Microelectronics, “Receiver Details and Link Performance for MUSA”, *3GPP TSG RAN WG1 Meeting 86 R1-166404*, Gothenburg, Sweden, 22nd - 26th August 2016.
- [72] Z. Q. Al-Abbasi and D. K. So, “Resource allocation in non-orthogonal and hybrid multiple access system with proportional rate constraint,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 10, pp. 6309–6320, 2017.
- [73] Y. Xu, C. Shen, T.-H. Chang, S.-C. Lin, Y. Zhao, and G. Zhu, “On energy-efficient noma designs for heterogeneous low-latency downlink transmissions,” *arXiv preprint arXiv:1806.09144*, 2018.