

N° d'Ordre :

N° de Série :



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



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued
Faculté de Sciences et de La Technologies Filière : Génie Electrique
Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En : Télécommunications

Spécialité : Systèmes de Télécommunication

Par: Chadou Isra, Haddad Saida, Ben Khalifa Sana

Thème

Evaluation des performances de NOMA dans le Uplink

Devant le jury composé de :

Mr. TOUHAMI Ridha	M.CA	Président
Mr. KHELIL Abdellatif	M.CA	Encadreur
Mr. MADJOURI Abdelkader	M.CA	Examineur

2022-2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Tout d'abord, nous souhaitons exprimer notre gratitude à notre encadreur, le **Dr. Khelil Abdellatif**, pour ses précieux conseils et son soutien tout au long de ce projet. Nous tenons également à adresser nos sincères remerciements au **Dr. Faysal Khennoufa** et aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils portent à nos recherches et pour avoir accepté de revoir nos travaux et de les enrichir de leurs suggestions.

Nous aimerions également exprimer notre profonde reconnaissance envers nos familles, les familles **Haddad**, **Chadou** et **Ben Khalifa**, pour leur soutien moral et matériel tout au long de cette période de préparation.

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



إهداء

إلى من هي قنديل ظلامي وكل شيء في حياتي: أمي الغالية.

إلى صاحب القلب الكبير ونور أيامي: أبي الحبيب

إلى ملاذي وسندي وقوتي بعد الله إخوتي: علي الساسي، محمد نجيب، خالد،

لنرهارمي.

إلى اللاتي قيل عنهن "يد يمنى وضلع ثابت لا يميل، وقطعة من الأم توردد لك الحياة"

إخواتي: إيمان، ليلي.

إلى مروحا سكنت مروحي وسند القلب ومرفيق الدرب خطيبي: ايمن مرزاق

سالم.

إلى جدتي الغالية أسأل الله أن يشفيها ويطول في عمرها.

إلى الأخوات اللاتي لم تلدهم أمي . . . إلى ينايع الصدق الصافي إلى من معهم

سعدت: شفيقة، إسراء، مرندة، خلود، هيبه، غفران.

إلى براعم العائلة: الحاج مسعود، عبد الهادي، محمد الصالح، ذكرى، خديجة.

سعيدة





إهداء

إلى من هي قنديل ظلامي وكل شيء في حياتي: أمي الغالية.

إلى صاحب القلب الكبير ونور أيامي: أبي الحبيب

إلى ملاذي وسندي وقوتي بعد الله إخوتي: محمد الصادق الأمين، مؤيد،

نريد .

إلى اللاتي قيل عنهم "يد يميني وضلع ثابت لا يميل، وقطعة من الأم تورد

لك الحياة" اخواتي: إشراق، إيمان، ألاء .

إلى الأخوات اللاتي لم تلدهم أمي . . . إلى يابيع الصدق الصافي إلى من

معهم سعدت: شفيقة، سعيدة، مرحيل، خديجة.

إسراء





إهداء

أهدي هذا العمل إلى نور الحياة والداعم لي طيلة مشواري الدراسي:

أمي حبيتي .

إلى فخري وعزوتي في هذه الحياة: أبي حبيبي .

إلى سندي وقوتي إخوتي وإخواني الأعزاء .

سناء



Résumé

La 5G et les technologies au-delà représentent une véritable révolution dans le domaine des communications sans fil et des réseaux mobiles. Elles sont devenues des enjeux majeurs dans de nombreux secteurs tels que les transports, la santé, l'énergie et le commerce. Plusieurs concepts sont actuellement étudiés pour l'interface radio des réseaux 5G.

L'accès multiple non orthogonal (NOMA) est une technologie moderne qui permet de multiplexer plusieurs signaux provenant de différents utilisateurs sur une même sous-porteuse, favorisant ainsi le partage de ressources entre ces utilisateurs. Les signaux sont transmis simultanément sur la même bande de fréquence, mais à des niveaux de puissance différents, ce qui réduit la latence et améliore la productivité des utilisateurs. Cependant, les interférences mutuelles causées par le multiplexage des utilisateurs lors de la transmission sont inévitables. Cette recherche vise à étudier les principes fondamentaux de cette nouvelle technologie et à déterminer comment elle peut répondre aux exigences de la 5G dans des applications pratiques. Nous utilisons MATLAB pour simuler la liaison montante NOMA et la comparons à la liaison montante OMA traditionnelle.

Mots clés : NOMA, OMA, 5G, MATLAB.

Abstract

5G and beyond represent a real technological revolution of mobile and wireless networks in the world of communications. It has become a major issue in digital networks in various sectors (transport, health, energy, trade, etc.). Several concepts are being studied for the radio interface of 5G networks.

Non-orthogonal multiple access (NOMA) is a modern technology that makes it possible to multiply several signals from different users in the same subcarrier in order to allow the sharing of resources between the latter, thereby transmitting these signals on the same frequency band at the same time at different power levels, thereby reducing latency time and significantly improving the productivity of users. However, mutual interference due to user multiplexing during transmission is inevitable.

This research work aims to study the basic principles of this new technology, as well as how it can best meet the requirements of the fifth generation 5G in practical applications. We use MATLAB to simulate the NOMA uplink compared to the traditional OMA uplink.

Keywords: NOMA, OMA, 5G, MATLAB.

المخلص

يمثل 5G وما بعده ثورة تكنولوجية حقيقية للشبكات المحمولة واللاسلكية في عالم الاتصالات. لقد أصبحت قضية رئيسية في الشبكات الرقمية في مختلف القطاعات (النقل، الصحة، الطاقة، التجارة، إلخ). يتم دراسة العديد من المفاهيم للواجهة الراديوية لشبكات 5G.

الوصول المتعدد غير المتعامد (NOMA) هي تقنية حديثة تجعل من الممكن مضاعفة عدة إشارات من مستخدمين مختلفين في نفس الناقل الفرعي من أجل السماح بتقاسم الموارد بين الأخير، وبالتالي نقل هذه الإشارات على نفس نطاق التردد في نفس الوقت بمستويات طاقة مختلفة، وبالتالي تقليل وقت الكمون وتحسين إنتاجية المستخدمين بشكل كبير. ومع ذلك، فإن التداخل المتبادل بسبب تعدد إرسال المستخدم أثناء الإرسال أمر لا مفر منه.

يهدف هذا العمل البحثي إلى دراسة المبادئ الأساسية لهذه التكنولوجيا الجديدة، وكذلك كيف يمكنها تلبية متطلبات الجيل الخامس 5G على أفضل وجه في التطبيقات العملية. نستخدم الماتلاب لمحاكاة NOMA للوصلة الصاعدة مقارنة بالوصلة الصاعدة التقليدية OMA.

الكلمات المفتاحية: NOMA، OMA، 5G، MATLAB.

Sommaire

Sommaire

Remerciements	i
إهداء	ii
إهداء	iii
إهداء	iv
Résumé	v
Abstract	v
الملخص	v
Sommaire	vii
Liste des figures	viii
Liste des tableaux	x
Liste des symboles	xi
Introduction générale	1

Chapitre I : Généralités sur la 5G et 6G

I.1 Introduction	4
I.2 Les Réseaux de télécommunications	4
I.3 Les générations des réseaux de télécommunication	5
<i>I.3.1 La Première Génération (1G)</i>	<i>5</i>
<i>I.3.2 Deuxième Génération (2G)</i>	<i>5</i>
<i>I.3.3 Troisième Génération (3G)</i>	<i>6</i>
<i>I.3.4 Quatrième Génération (4G)</i>	<i>6</i>
<i>I.3.5 Cinquième Génération (5G)</i>	<i>7</i>
I.3.5.1 Les trois extrémités de la 5G	<i>7</i>
I.3.5.2 La sécurité des réseaux 5G	<i>8</i>
I.3.5.3 Les faiblesses de la 5G	<i>9</i>
<i>I.3.6 La Sixième Génération (6G)</i>	<i>10</i>
I.3.6.1 Le fonctionnement de la 6G	<i>11</i>
I.3.6.2 Les principaux projets 6G	<i>11</i>
I.3.6.3 Les caractéristiques fondamentales de la 6G	<i>12</i>
I.3.6.4 Les avantages de la 6G.....	<i>13</i>
I.3.6.5 Les exigences de la 6G	<i>14</i>
I.3.6.6 Les services 6G irréalisables en 5G	<i>16</i>
I.3.6.7 Prédire l'avenir de la 6G.....	<i>16</i>
I.3.6.8 Portée future des réseaux 6G.....	<i>17</i>
I.3.6.9 Les enjeux de la 6G	<i>18</i>
I.4 Conclusion	21

Chapitre II : Le système d'accès multiple Non orthogonal (NOMA)

II.1 Introduction	23
II.2 Définition.....	23
II.3 Principe base de NOMA	23
II.4 Codage de superposition SC	25
II.5 Annulation d'interférences successives SIC.....	25
II.6 Liaison descendante NOMA (Down Link).....	27
II.7 Liaison montante NOMA (Up Link)	28
II.8 Les avantages et les inconvénients	28
<i>II.8.1 Avantages de NOMA :</i>	<i>28</i>
<i>II.8.2 Inconvénients de NOMA :</i>	<i>29</i>
II.9 Efficacité spectrale et efficacité énergétique	30
<i>II.9.1 Efficacité spectrale :</i>	<i>30</i>
<i>II.9.2 Efficacité énergétique :</i>	<i>31</i>
<i>II.9.3 Compromis entre l'efficacité spectrale et l'efficacité énergétique</i>	<i>31</i>
II.10 Champs d'application du NOMA.....	31
II.11 Comparaison de l'OMA avec NOMA	32
II.12 Conclusion.....	34
Chapitre III : Simulation de NOMA Sur la liaison montante	
III.1. Introduction.....	36
III.2. Modèle de système	36
III.3. Simulation et résultats	37
<i>III.3.1. Paramètres de simulation</i>	<i>37</i>
<i>III.3.2. Capacité du système</i>	<i>38</i>
<i>III.3.3. Probabilité d'interruption (OP)</i>	<i>39</i>
<i>III.3.4. Débit.....</i>	<i>42</i>
III.4. Conclusion	43
Conclusion générale.....	44
Bibliographie.....	47

Liste des figures

Figure I.1 : Évolution des réseaux mobiles : de la 1G à la 6G [3].	5
Figure I.2 : Les bandes de fréquence 5G identifiées [5].	7
Figure I.3 : Les scénarios d'utilisation de la 5G [3].	8
Figure I.4 : Comparaison des performances de la 5G avec les attentes de la 6G [6].	14
Figure I.5 : Quelques usages permis avec la 6G [8].	16
Figure I.6 : Enjeux de la 6G [7].	21
Figure II.1 : Partage du spectre pour OFDMA et NOMA pour 2 utilisateurs[32].	24
Figure II.2 : Annulation d'interférence successive [32].	24
Figure II.3 : Exemple d'encodage SC, (a) constellation de signaux de l'utilisateur 1 (b) constellation de signaux de l'utilisateur 2 (c) constellation de signaux superposés[22].	25
Figure II.4 : Un exemple de décodage SC (a) décodant le signal de l'utilisateur 2 (b) décodant le signal de l'utilisateur 1.	26
Figure II.5 : Comment fonctionne SIC dans les récepteurs entre deux utilisateurs.	26
Figure II.6 : liaison descendante NOMA pour 2 utilisateurs.	27
Figure II.7 : Liaison montante NOMA pour 2 utilisateurs.	28
Figure III.1 : NOMA sur la liaison montante.	37
Figure III.2 : Capacité de U1 et U2 de la liaison montante NOMA par rapport à la liaison montante OMA.	38
Figure III.3 : Capacité des utilisateurs U1 et U2 de la liaison montante NOMA en fonction de α_1 .	39
Figure III.4 : Probabilité d'interruption de U1 et U2 pour la liaison montante NOMA par rapport à la liaison montante OMA.	41
Figure III.5 : Probabilité d'interruption de U1 et U2 de la liaison montante NOMA en fonction de α_1 .	41
Figure III.6 : Débit de U1 et U2 de la liaison montante NOMA par rapport à la liaison montante OMA.	42
Figure III.7 : Débit de la liaison montante NOMA en fonction de α_1 .	42

Liste des tableaux

Le tableau II.1 : suivant représente une comparaison entre les deux types d'accès NOMA et OMA.....	32
Tableau III.1 : Paramètres de simulation.....	37

Liste des symboles

1G : Première Génération
2G : Deuxième Génération
3G : Troisième Génération
4G : Quatrième Génération
5G : Cinquième Génération
B5G : Beyond Cinquième Génération
6G : Sixième Génération
ACARS: Aircraft Communications Addressing and Reporting System
ANF : l'Agence nationale des fréquences
API : Application Programming Interface
(API) RESTful: API Representational State Transfer
BER: Bit Error Rate
BS: Base Station
C : capacité
CDMA : Code Division Multiple Access
CMR-19 : La Conférence mondiale des radiocommunications 2019
CNET : Centre National d'Etudes des Télécommunications
CSI: Channel State Information
DDoS: Distributed Denial-of-Service
EDGE: Enhanced data Rates for Global Evolution
EE : efficacité énergétique
FCC : La Commission fédérale des communications
FDMA: Frequency Division Multiple Access
Gbps: gigabit par seconde
GEO: Geosynchronous Earth Orbiting
GHz: gigahertz
GPRS: General Packet Radio System
GSM: Global System for Mobile communication
HAPS : High Altitude Platform Station
HD : haute définition
IA : L'intelligence artificielle
IMT-2000 : International Mobile Telecommunications de l'année 2000
IoT: Internet of Things
IP: Internet protocol

LEO: Low Earth Orbit
 LTE: Long Term Evolution
 Li-Fi: Light Fidelity
 Mbps: méga bits par seconde
 MEC: Mobile Edge Computing
 MIMO: Multiple Input Multiple Output
 M2M : Machine to Machine
 mMTC : les communications massives de type machine
 MMS: Multimedia-Messaging Service
 NOMA: Non-Orthogonal Multiple Access
 NTN: Non-Terrestrial Networks
 OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing
 OFDMA: Orthogonal frequency division multiple access
 OMA : Orthogonal multiple Access
 OP : probabilité d'interruption
 OWC : Optical Wireless Communications
 LOD : diode électroluminescente
 PA : puissance adoptée
 QoS: Quality of service
 QPSK: Quadrature Phase Shift Keying
 RAN : Radio Access Network
 R&D : recherche/développement
 REST : Representational State Transfer
 RNIS : Le réseau numérique à intégration de services
 SC: Superposition Coding
 SDN: Software Defined Network
 SE : l'efficacité spectrale
 SIC : Successive Interference Cancellation
 SLA: Service Level Agreement
 SMS: Short Message Service
 SNR: Signal-to-Noise Ratio
 SoDeMA: Software Defined Multiple Access.
 SWIPT: Wireless Information and Power Transfer
 TDMA : Time Division Multiple Access
 THz : TéraHertz

UIT : Union Internationale des Télécommunications

UMTS : Universal Mobile Telecommunications System

VLC : Visible Light Communications

VNF : Agence nationale des fréquences

Wi-Fi: Wireless Fidelity

X2X: Everything to Everything

.

Introduction générale

Introduction générale

La technologie sans fil 5G et au-delà est en constante évolution et constitue l'un des plus grands domaines de recherche pour les universités et l'industrie. Les technologies d'accès multiple ont été un moyen clé de distinguer les différents systèmes sans fil, de la première génération (1G) à la quatrième génération actuelle (4G).

Les réseaux d'accès radio 5G et au-delà doivent prendre en charge un débit très élevé, une latence ultra-faible, des connexions massives et des applications à très haute mobilité. Pour répondre à ces exigences, des technologies améliorées ou révolutionnaires sont nécessaires, notamment l'accès multiple non orthogonal (NOMA), qui est une technologie prometteuse pour augmenter le débit du système et servir simultanément des connexions massives.

NOMA permet la transmission de symboles superposés de plusieurs utilisateurs en fonction de différents niveaux de puissance dans le même intervalle de temps/fréquence. Pour améliorer la zone de couverture du réseau, la fiabilité et la vitesse de transmission, les systèmes de relais coopératifs améliorent les performances des systèmes NOMA.

D'autres technologies, telles que l'accès multiple par division de fréquence orthogonale (OFDMA), sont également utilisées dans les réseaux 5G pour répondre aux exigences de débit élevé et de latence ultra-faible.

L'objectif de ce mémoire était d'analyser les performances du NOMA sur liaison montante par comparaison avec l'OMA en liaison montante traditionnelle en termes de capacité et de probabilité d'interruption.

Ce mémoire se compose de trois chapitres. Le premier chapitre est consacré à l'étude de l'évolution des réseaux de téléphonie mobile de manière générale, et en particulier de la 5G et au-delà. Certaines notions et technologies utilisées dans la 5G et au-delà sont définies.

Le deuxième chapitre contient une étude générale et détaillée de la technologie d'accès non orthogonal multiple (NOMA), en présentant le principe du système NOMA sur la liaison montante et la liaison descendante. Les opérations clés SC et SIC sont discutées.

Introduction générale

Dans le dernier chapitre, nous réaliserons une étude comparative entre deux technologies connues dans le domaine de la communication sans fil (NOMA et OMA). Cette comparaison est basée sur des simulations MATLAB. Nous nous concentrerons sur les résultats graphiques qui examinent les performances des utilisateurs dans chaque technique.

Chapitre I : Généralités sur la 5G et 6G

I.1 Introduction

Le monde d'aujourd'hui est en effervescence autour de tout ce qui est intelligent. L'arrivée de la 5G au cours de ces dernières années et la perspective de la 6G d'ici à la fin de cette décennie apportent des changements significatifs à notre vie quotidienne, conditionnent nos méthodes de travail, améliorent la recherche et nos interactions sociales. La 6G transforme nos échanges commerciaux et a un impact sur notre environnement [1]. Dans ce contexte d'évolution rapide, la recherche doit relever les défis liés à la transformation numérique et au transfert technologique, en se concentrant notamment sur les nouvelles générations de télécommunication [2].

Dans ce chapitre, nous allons présenter le développement et l'évolution des différentes générations de réseaux de télécommunication, ainsi que les caractéristiques propres à chacune. Ensuite, nous aborderons quelques rappels sur la 5G qui est en cours d'implantation territoriale, y compris ses limites et ses inconvénients. Enfin, nous exposerons les éléments technologiques nécessaires pour la future 6G, en discutant des tendances, des exigences, des défis et de la relation avec l'humain.

I.2 Les Réseaux de télécommunications

Un réseau de télécommunications est un réseau d'arcs (liaisons de télécommunication) et de nœuds (Machines, objets, commutateur, routeur, ...), mais en place de manière à permettre la transmission de messages d'un bout à l'autre à travers de multiples liaisons. Les liaisons d'un réseau de télécommunications peuvent être réalisées grâce à des systèmes de transmission hiérarchiques [15].

Un réseau de télécommunications est un ensemble des équipements et des supports de transmission dont une des fonctions est de permettre le transfert d'informations. Les réseaux sont nés d'un besoin d'échanger des informations de manière simple et rapide entre des machines. Ils ont donc commencé à relier ces machines entre elles (les réseaux locaux). Plus tard ils ont éprouvé le besoin d'échanger des informations entre des sites. Exemples de réseaux de télécommunications : réseau de télévision, réseau informatique, réseau de téléphonie mobile, réseau aéronautique (permet le contrôle automatique de l'état de l'avion en vol), réseau internet [14].

Les exemples de réseaux de télécommunication sont nombreux :

- Réseau informatique
- Internet
- Le réseau téléphonique commuté
- Le réseau numérique à intégration de services (RNIS)

- Le réseau de téléphonie mobile public terrestre
- Le réseau Télex mondial
- Le réseau aéronautique ACARS [15].

I.3 Les générations des réseaux de télécommunication

L'ère des télécommunications a connu de grands progrès dans l'évolution technologique des réseaux de télécommunications et a entraîné l'émergence de nouveaux appareils et de nouveaux services (voir figure 1).



Figure I.1 : Évolution des réseaux mobiles : de la 1G à la 6G [3].

I.3.1 La Première Génération (1G)

La première génération (1G) de téléphonie mobile ou de technologie sans fil cellulaire, est apparue dans les années 1980 avec les premiers téléphones mobiles. Le CNET (Centre National d'Etudes des Télécommunications) a effectué un travail de recherche important servant de base à l'élaboration de la norme GSM (Global System for Mobile communication) permettant le développement de la téléphonie mobile, particulièrement en Europe avec les bandes 900 MHz et 1800 MHz, ainsi qu'avec d'autres fréquences aux Etats-Unis. Cette génération était caractérisée par des terminaux de communication volumineuse, très différents de ceux que nous utilisons aujourd'hui, Elle correspond à des normes de télécommunications analogiques qui ont ensuite été remplacées par la suite par des télécommunications numériques (2G, 3G, 4G, 5G).

La 1G permettait uniquement des échanges vocaux, dans le cadre d'appels téléphoniques. Elle offrait un débit d'environ 2,4 kbps, selon un rapport gouvernemental reprenant des données de l'Agence nationale des fréquences (ANF) [1] [3] [4] [16].

I.3.2 Deuxième Génération (2G)

La technologie est devenue entièrement numérique à partir de la 2G qui a été déployée dans les années 1990. En plus de la voix, elle a permis d'ajouter le texte et l'image. Les SMS (Short Message Service) ont ainsi pu commencer à être échangé et à se développer. Tandis que les MMS (MultiMedia Messaging Service), ont fait leur apparition à partir de 2002. La 2G offrait un débit allant jusqu'à 64 kbps. Une version (2.5G) utilisant le standard GPRS (General Packet Radio System) et offrant un débit d'environ 40 kbps, a vu le jour. De même, la version

EDGE (Enhanced data Rates for Global Evolution), avec un débit de 3 487 kbps, a également mis sur le marché [1] [3] [4] [16].

I.3.3 Troisième Génération (3G)

L'avènement de la 3G, dix ans après les débuts de la 2G, à bouleverser l'utilisation des téléphones portables, entre autres, et a accompagné les années 2000. Les données mobiles liées à la navigation sur internet sont alors devenues accessibles aux utilisateurs, permettant le visionnage d'images et de vidéos en définition limitée. Son débit typique atteignait 384 kbps, puis pouvait aller jusqu'à 42 Mbit/s.

Des messages multimédias du type MMS (MultiMedia Messaging Service), courriels, photos, vidéo, sont échangeables avec des débits de l'ordre de 1,9 Mbit/s. En effet, à la suite des spécifications IMT-2000 (International Mobile Télécommunications de l'année 2000) de l'UIT (Union Internationale des Télécommunications), plusieurs avantages sont mis en valeur, tels qu'un débit variable en fonction de la couverture (fixe, en mouvement, etc.) et une comptabilité universelle pour permettre l'accès à Internet. A partir de 2005, la norme UMTS (Universal Mobile Télécommunications System) transforme le terminal en serveur web, fournissant des services multimédias tels que la télévision ou visioconférence. Au début de l'année 2008, près de 300 millions de terminaux mobiles sont en utilisation. Plusieurs variantes de cette génération existent : la 3G+ avec ses 10Mbit/s, ou la 3G++ avec un débit de 42Mbit/s [1] [3] [4] [16].

I.3.4 Quatrième Génération (4G)

Cette génération est apparue dans les années 2010 et a entraîné une généralisation des usages nomades connectés, tels que la visualisation de vidéo en haute définition (HD). Elle offre un débit allant de 100 mégabits par seconde (Mbps) jusqu'à 1 gigabit par seconde (Gbps). La 4G utilise la norme LTE (Long Term Evolution) et est plus performante, offrant un débit de 150 Mbit/s. La 4G+ utilise la norme LTE Advanced, proposant un débit théorique de 1 Gbit/s, souvent plus proche des 300 Mbit/s dans la pratique. La 4G a grandement participé au développement de l'internet mobile, des usages vidéo, des visioconférences, etc [1] [3] [4] [16].

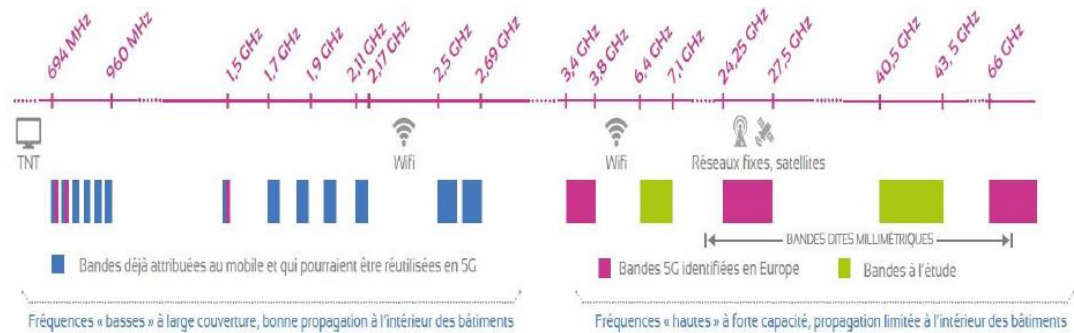


Figure I.2 : Les bandes de fréquence 5G identifiées [5].

I.3.5 Cinquième Génération (5G)

Qui commence à être déployée et devrait prendre son essor dans les années 2020, elle est caractérisée par des débits jusqu'à 10 fois supérieurs à ceux de la 4G (>1 Gbit/s). La latence est divisée par 10. La 5G est la première génération de téléphonie mobile conçue pour des cas d'usage autres que la voix et la donnée.

La densité de connexion dans cette génération est multipliée, offrant un débit dix fois supérieur à celui de la 4G. Elle a pour défi d'éviter la congestion du réseau 4G dans les zones denses. Elle devrait permettre différents nouveaux usages pour les particuliers sur leur smart phone, à des fins de divertissement : Cloud gaming, visionnage de vidéo en résolution 4K, réalité virtuelle, etc. La 5G permettra de connecter les personnes, les objets, les données, les applications, les réseaux, les systèmes de transport, les territoires, etc. La première démonstration de la 5G, en pré-commercialisation, a eu lieu en Corée du Sud (PyeongChang) en février 2018 pour les 23^{ème} Jeux olympiques d'hiver [1] [3] [4] [16].

I.3.5.1 Les trois extrémités de la 5G

Les cas d'usage de la 5G se définissent selon les trois déclinaisons qui sont prévues pour permettre les compromis nécessaires sur l'interface radio et couvrir un maximum d'usages [5] :

a) **Le EMBB pour enhanced Mobile Broad Band** : C'est-à-dire les communications mobiles à ultra haut débit, qui se situent dans la continuité des précédentes générations de télécommunications et permettent de répondre à l'augmentation exponentielle des données mobiles. Les applications de cette catégorie sont typiquement des flux vidéo de qualité de plus en plus grande, ainsi que des applications de réalité virtuelle et augmentée. Son objectif est de répondre à une demande croissante en matière de quantité de données et de vitesse de transfert.

b) **Le MMTC pour massive Machine Time Communication** : C'est-à-dire, les communications entre objets, l'Internet des objets rentre dans cette catégorie. Il s'agit de pouvoir gérer un nombre très important de connexions (jusqu'à un million par kilomètre carré).

La quantité de données à transmettre par communication est généralement limitée, et la rapidité de transfert est peu contraignante. Un domaine d'application typique de ce segment est la ville intelligente avec des réseaux de capteurs pour gérer les différents services.

c) **Le URLLC pour ultra Reliable Low Latency Communication** : C'est-à-dire les communications dites critiques, pour lesquelles la fiabilité et le temps de réponse sont primordiaux. L'application phare de cette catégorie est le véhicule autonome, mais les communications des services de sécurité et d'urgence sont également concernées. Il ne doit pas y avoir d'échec ou de coupure de communication, et la transmission doit être la plus rapide possible.

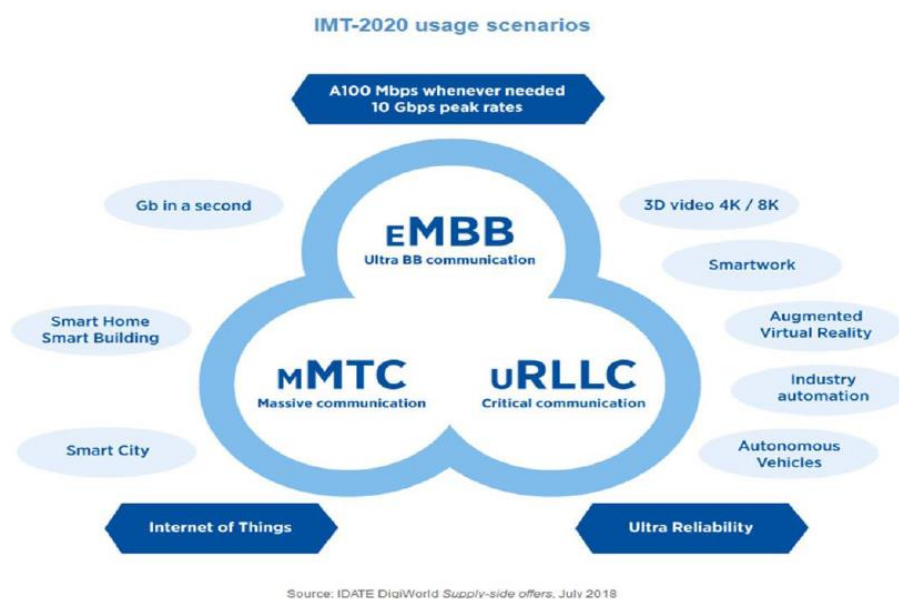


Figure I.3 : Les scénarios d'utilisation de la 5G [3].

La 5G ouvre la voie à de nouvelles possibilités. Avec cette technologie, de nombreux avantages sont désormais à portée de main ; elle offre d'énormes opportunités. Cependant, elle s'accompagne également de menaces accrues, soulevant des interrogations, et des inefficacités ainsi que des problèmes de sécurité. Ainsi, la 5G n'est pas vraiment une technologie sûre.

I.3.5.2 La sécurité des réseaux 5G

La 5G, avec ses avantages connus qu'une vitesse de transmission des données élevées, une bande passante plus large et une latence plus faible, redéfinit en profondeur l'architecture de nos réseaux de télécommunication. Comme beaucoup d'autres révolutions technologiques, elle présente néanmoins certains risques. Avant même l'introduction des réseaux 5G, les cybercriminels faisaient parler d'eux à travers diverses attaques retentissantes. Les rançongiciels, les logiciels malveillants, le cryptojacking le vol d'identité et les violations de données sont désormais courants.

I.3.5.3 Les faiblesses de la 5G

Sans garde-fou ni mesure de prévention, la 5G pourrait aggraver les menaces existantes, voire introduire de nouvelles, notamment :

a) **Des inefficacités passées non traitées** : Les principaux problèmes qui Affectaient déjà les générations précédentes de technologie de télécommunication et qui n'ont pas été résolus dans les normes 5G sont les suivants : La capacité d'intercepter des messages échangés, la possibilité de révéler des informations sur l'appareil qui peuvent être utilisés pour des attaques ciblées IoT, et la planification des attaques en exploitant des détails sur les systèmes d'exploitation et les types d'appareils. Une solution consisterait à intégrer le cryptage de bout en bout ou baser sur la Blockchain pour ces réseaux potentiellement porteurs de données personnelles et confidentielles.

b) **Risques liés aux réseaux définis par logiciel (SDN)** : La mise en œuvre de la 5G implique la transition des infrastructures physiques à des logiciels effectués des fonctions essentielles telles que la configuration, l'administration et la surveillance de tous les composants du réseau à partir d'un emplacement central. Cette évolution provoque une augmentation des vulnérabilités logicielles, ce qui introduit des menaces, et des points exploitables, car ces logiciels qui gèrent ces réseaux sont susceptibles d'être attaqués. Une seule faille de sécurité dans une partie du réseau pourrait compromettre la sécurité de l'ensemble du réseau en raison des fonctions de réseau virtualisées et centralisées.

c) **Network Slicing** : Il consiste à décomposer un réseau physique en plusieurs réseaux virtuels, chacun étant optimisé et dédié à une tâche ou un service spécifique. La sécurité dans le découpage en « parties » de réseau est un problème critique à résoudre en raison du partage de ressources entre les tranches, qui peuvent avoir différents niveaux d'exigences en matière de politique de sécurité. Du point de vue des cybermenaces, cela signifie que chaque tranche peut être attaquée et influencée indépendamment, avec un impact sur l'ensemble du réseau. Par conséquent, lors de la conception de protocoles de sécurité pour le découpage du réseau.

d) **Prolifération rapide d'appareils vulnérables** : L'absence de normes de sécurité pour les appareils IoT signifie que les brèches dans le réseau et le piratage peuvent se multiplier. Par conséquent, il est recommandé de revoir la sécurité de tous les appareils d'un réseau afin de s'assurer qu'ils sont entièrement patchés avec des systèmes d'exploitation, des applications et des micrologiciels mis à jour.

Il est important de noter que la 5G ne représente pas que du négatif car elle a beaucoup à apporter à différents niveaux de notre société. Toutefois, son plein potentiel passe par une prise en compte de la réduction des risques associés. Dans ce sens, la 5G exige le développement et la mise en place de nouveaux protocoles de cybersécurité améliorés pour contrer les risques

connus et inconnus, posés par cette percée technologique. De ce fait, il est important pour les secteurs privés et public de développer une sécurité « multicouche » qui peut se matérialiser selon des normes de sécurité.

La 5G est là et va révolutionner le monde connecté. Cependant, certaines considérations relatives à la cybersécurité doivent être prises en compte avant qu'elle ne soit en mesure de répondre aux attentes élevées qu'elle suscite. Pour y arriver, de nombreuses entreprises devront modifier leurs approches actuelles en matière de cybersécurité afin de faire face aux technologies émergentes liées à la 5G. De plus, Il est important de noter les politiques gouvernementales doivent tenir compte des lacunes du marché et de la manière dont elles peuvent être comblées.

I.3.6 La Sixième Génération (6G)

La 6G sera une remédiation des insuffisances de la 5G notamment en termes de vitesse, couverture, sécurité et de protection de la vie privée. Après la 5G, la 6G devrait ainsi voir le jour aux alentours des années 2030, et l'internet 6G devrait être lancé commercialement. Cette technologie utilise davantage le réseau d'accès radio (RAN) distribué et le spectre TéraHertz (THz) afin d'augmenter la capacité, de réduire la latence et d'améliorer le partage du spectre.

Les usages concrets qu'elle permettra restent forcément flous. Elle pourrait par exemple offrir la possibilité de générer des hologrammes depuis un smart phone, permettant une téléprésence dans un autre endroit du globe que celui où l'on se trouve physiquement, et renforcer les interactions entre le monde réel et le monde numérique et virtuel. Son débit pourrait être 100 fois supérieur à celui de la 5G.

La 6G aura de grandes répercussions sur de nombreuses approches gouvernementales et industrielles en matière de sécurité publique et de protection des biens essentiels, et par la suite des impacts tels que :

- La détection des menaces
- La surveillance de la santé
- La reconnaissance des caractéristiques et des visages
- La prise de décision dans des domaines tels que l'application de la loi et les systèmes de crédit social ;
- Les mesures de la qualité de l'air ; et la détection des gaz et de la toxicité.

Les améliorations dans ces domaines profiteraient également aux technologies mobiles, ainsi qu'aux technologies émergentes, telles que les villes intelligentes, les véhicules autonomes, la réalité virtuelle, la réalité augmentée et toutes les communications X2X [6] [1] [3] [4] [16].

I.3.6.1 Le fonctionnement de la 6G

On s'attend à ce que les solutions de détection sans fil de la 6G utilisent sélectivement différentes fréquences pour mesurer l'absorption et ajuster les fréquences en conséquence. Cette méthode est possible car les atomes et les molécules émettent et absorbent des rayonnements électromagnétiques à des fréquences très élevées. De plus, les fréquences d'émission et d'absorption sont les mêmes pour toute substance donnée.

Les fréquences plus élevées de la 6G permettront des taux d'échantillonnage beaucoup plus rapides, en plus d'offrir un débit nettement meilleur et des taux de transfert des données plus élevés. La combinaison d'ondes submillimétriques et de la sélectivité de fréquence pour déterminer les taux d'absorption électromagnétique relatifs pourrait potentiellement conduire à des avancées significatives dans la technologie de détection sans fil [6].

I.3.6.2 Les principaux projets 6G

La course à la 6G attirera l'attention de nombreux acteurs du secteur, dont le fournisseur de tests et de mesures Keysight Technologies, qui s'est engagé dans son développement. Cette compétition pourrait bien paraître mineure comparée à l'attente de voir quels pays domineront le marché de la technologie 6G. Un pays qui dominera par conséquent toute l'industrie 6G, et par la suite les applications et services connexes. Les discussions préliminaires ont eu lieu pour définir la 6G et les activités de recherche/développement (R&D) ont sérieusement commencé en 2020. Parmi les principaux acteurs dans cette révolution de la 6G, on peut citer [6] :

- La Chine, par exemple, a lancé un satellite de test 6G équipé d'un système THz, tandis que les géants technologiques Huawei Technologies et China Global prévoient des lancements de satellites 6G similaires en 2021. Un grand nombre des problèmes liés au déploiement de la radio à ondes millimétriques pour la 5G doivent être résolus à temps. L'objectif est que les concepteurs de réseaux puissent relever les défis de la 6G.

- L'université d'Oulu en Finlande a lancé le projet de recherche 6Genesis afin de développer une vision de la 6G pour 2030. L'université a également signé un accord de collaboration avec le Consortium de promotion Beyond 5G du Japon pour coordonner les travaux de recherche du 6G Flagship finlandais sur les technologies 6G.

- L'Institut de recherche sur l'électronique et les télécommunications de Corée du Sud mène des recherches sur la bande de fréquences Téra hertz pour la 6G. Elle envisage des vitesses de données 100 fois plus rapides que les réseaux 4G LTE et cinq fois plus rapides que les réseaux 5G.

- Le ministère chinois de l'Industrie et des Technologies de l'information investit dans la recherche et le développement de la 6G.

- La Commission fédérale des communications (FCC) des États-Unis a ouvert En 2020 la fréquence 6G aux tests de spectre pour les fréquences de plus de 95 gigahertz (GHz) à 3 THz.
- Les entreprises de communication Ericsson (Suède) et Nokia (Finlande) sont à la tête d'Hexa-X. Un consortium récemment formé en Europe, composé de leaders universitaires et industriels qui travaillent à faire avancer la recherche sur les normes 6G.

Parmi les fournisseurs engagés dans la 6G figurent de grandes entreprises d'infrastructure telles que Huawei, Nokia et Samsung, qui ont toutes signalé qu'elles avaient des projets de R&D en cours.

I.3.6.3 Les caractéristiques fondamentales de la 6G

Bien qu'encore à un stade précoce, un certain nombre d'études ont fourni des visions pour la 6G. Outre des débits de données et une latence de communication considérablement améliorés, les réseaux 6G sont également considérés comme une intelligence connectée et centrée sur l'humain. Cependant, ils ont tendance à redoubler les problèmes tels que : la fiabilité du réseau, la vulnérabilité des systèmes, la sécurité, la confidentialité et l'immuabilité des données, le partage du spectre souple, l'accès à multiple contrôle, fonctions de réseau virtuel authentiques (VNF), l'utilisation légitime des ressources et la sécurité des services offerts par les différents réseaux virtuels. Les principales caractéristiques des réseaux 6G devraient être les suivantes :

a) **Débits de données extrêmement élevés et faible latence** : Les applications en 6G nécessitent des débits de données beaucoup plus élevés et une latence extrêmement faible par rapport à la 5G. Les taux de transmission de données devraient se situer dans les centaines de giga-octets, voire les téraoctets. La latence doit être considérablement réduite afin de fournir des services et applications en temps réel. Les débits de données très élevés entraînent également de nouveaux besoins en ressources spectrales supplémentaires. Les systèmes de communication hybrides térahertz-lumière visible devraient offrir des ressources de bande passante encore inexplorées pour les réseaux 6G

b) **Faible consommation d'énergie** : Le nombre croissant d'appareils intelligents connectés, tels que les appareils IoT et les smartphones, en 6G nécessite une faible consommation d'énergie afin de prolonger leur durée de fonctionnement et de fournir des services fiables.

c) **Intelligence de pointe élevée** : L'intelligence artificielle (IA) est supposée jouer un rôle crucial dans les réseaux 6G. Le concept d'appareils connectés a évolué vers l'intelligence connectée en 6G. L'intelligence périphérique (Edge intelligence) est un catalyseur clé des réseaux 6G. Les performances du réseau seront améliorées en optimisant l'allocation des ressources telles que le spectre, le calcul et la puissance dans le réseau. De plus, l'intégration

des techniques d'IA dans les réseaux périphériques devrait grandement améliorer la qualité de service (QoS).

d) **Sécurité et confidentialité élevées** : Le nombre croissant des utilisateurs et des appareils impliqués dans la 6G génère une grande quantité de données contenant leurs informations privées. Le risque de fuite de ces données lors de la transmission et du stockage est une menace majeure pour les réseaux 6G. Les technologies émergentes telles que la blockchain et l'apprentissage fédéré sont nécessaires pour améliorer la sécurité du réseau et la confidentialité des données.

I.3.6.4 Les avantages de la 6G

- **Des vitesses allant jusqu'à 100 Gbit/s** : Les réseaux 6G ont une vitesse de téléchargement projetée d'au moins 100 Gbps. Soit 10 fois plus rapide que la vitesse de téléchargement (théorique) d'un réseau 5G. La 6G devrait permettre des débits de données de 1 téraoctet par seconde. Les points d'accès pourront servir plusieurs clients simultanément grâce à l'accès multiple par répartition orthogonale de la fréquence. C'est également 300 fois plus rapide que la vitesse de liaison descendante que les réseaux 4G les plus avancés d'aujourd'hui peuvent offrir [6].

- **Dix millions d'objets connectés par km²** : La puissance de l'IoT est déterminée par le nombre de capteurs et d'appareils connectés. Ici aussi, une croissance énorme est prévue. Les sociétés d'études de marché et de statistiques prévoient que d'ici 2025, l'IoT comprendra près de 31 milliards d'appareils, contre 12 à 13 milliards d'appareils aujourd'hui. Avec ce nombre toujours croissant d'appareils,

- le défi d'en connecter le plus possible à Internet (par m² ou km²). Ce nombre augmentera la densité de connexion. Les réseaux 4G actuels atteignent une densité de connexion d'environ 100 000 appareils par km². La 5G fait déjà beaucoup mieux, permettant la connexion d'un million d'appareils par km². Et avec l'introduction des réseaux 6G, le chiffre de 10 millions d'objets connectés par km² est à la portée de main [6].

- **Fréquences de 100 GHz (et plus)** : Les réseaux 4G sont limités à des fréquences allant jusqu'à 2,5 GHz, tandis que les réseaux 5G fonctionnent dans les bandes 28 GHz et 39 GHz. Et les prochaines générations de réseaux mobiles – dont la 6G – devraient dépendre de fréquences supérieures à 100 GHz [6].

- **Latence de quelques microsecondes seulement** : Le réseau 5G propose une latence inférieure à 1 milliseconde. Mais la 6G propose une latence encore plus faible de quelques microsecondes seulement. Ce niveau de capacité et de latence permettra d'étendre les performances des applications 5G. Il sera aussi utile pour élargir le champ des capacités pour

prendre en charge des applications innovantes en matière de connectivité sans fil, de cognition, de détection et d'imagerie [6].

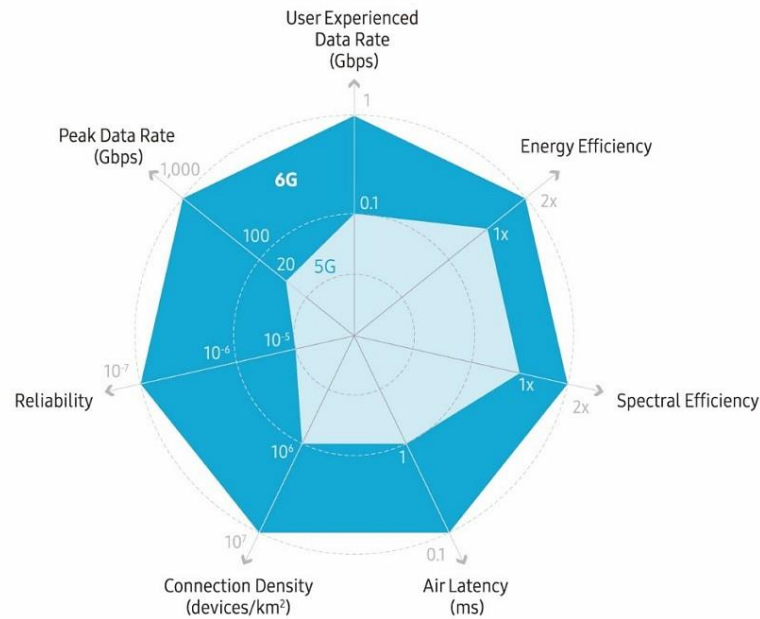


Figure I.4 : Comparaison des performances de la 5G avec les attentes de la 6G [6].

I.3.6.5 Les exigences de la 6G

Certains des exigences perceptibles de la 6G sont exposées par Behnaam et al [7] [8].

a) **Connectivité massive dans les futurs systèmes** : Les passionnés de l'IoT industriel prédisent que des milliards d'appareils seront connectés et exploités dans les futurs écosystèmes industriels avec l'émergence de concepts tels que les communications massives de type machine (mMTC). Il serait donc difficile d'adapter la conception des systèmes 6G à une demande de trafic aussi sans précédent.

b) **Communication en temps réel avec une latence minimale** : La communication en temps réel est une exigence cruciale dans les futurs écosystèmes informatiques. Les communications d'appareil à appareil et de machine à machine nécessitent une précision robuste avec des retards proches de zéro pour un fonctionnement précis. Les cas d'utilisation tels que la conduite autonome et les systèmes de soins de santé assistés par RA peuvent nécessiter une communication à retard minimal cohérente activée dans l'échange de données à grande échelle.

- **Débit plus élevé** : Les systèmes critiques qui utilisent les futurs écosystèmes de communication 5G et au-delà nécessitent une connectivité simultanée de milliards d'appareils.

L'infrastructure réseau telle que les stations de base devraient gérer l'énorme volume de transactions en temps réel.

- **Synchronisation** : La synchronisation est une exigence importante dans les applications industrielles à temps critique. Les systèmes de base essentiels à la mission d'un pays, y compris les systèmes de distribution d'énergie et les réseaux de véhicules, doivent se synchroniser en temps réel pour un fonctionnement précis.

c) Exigences de sécurité dans les futurs écosystèmes informatiques

- **Confidentialité** : La future infrastructure informatique telle que l'IoT expose d'immenses surfaces de menaces avec la connectivité sans fil. Les techniques de chiffrement telles que les algorithmes de chiffrement à clé symétrique doivent être légères pour les appareils IoT à faible consommation. Cependant, les techniques cryptographiques légères peuvent exposer les données à des risques de confidentialité en raison de restrictions de calcul.

- **Intégrité** : Le volume massif de données produites par les futurs systèmes nécessite que les données soient consultées et modifiées par les utilisateurs autorisés lorsque les données sont en transit. L'écoute clandestine et la modification des données en transit dévieront la fonctionnalité du système du comportement attendu.

- **Disponibilité** : La disponibilité du service est une exigence principale dans les futurs réseaux. En particulier, la sophistication des écosystèmes 5G avec un grand volume d'appareils interconnectés augmente le risque d'attaques DDoS. La spécialité des outils de sécurité réseau actuels ne peut pas s'appliquer directement aux réseaux 5G et au-delà pour détecter les menaces et les tentatives de violation.

- **Authentification et contrôle d'accès** : Les données, en transit ou stockées, doivent être sécurisées avec des mécanismes de contrôle d'accès afin d'empêcher les manipulations non autorisées. Les mécanismes conventionnels d'authentification centralisée et de contrôle d'accès limiteront en termes d'évolutivité les demandes futuristes massives anticipées dans les prestations de service la 6G.

- **Audit** : Un audit est nécessaire pour évaluer la conformité du comportement des locataires dans l'écosystème du réseau. Pour les normes de sécurité élevées, un audit approfondi au niveau des paquets peut nécessiter d'identifier et de signaler le comportement de ces locataires. L'audit d'un grand nombre de locataires sera difficile du point de vue de l'application de la sécurité.

d) Consommation de données plus élevée dans les solutions sophistiquées : Le débit de données plus élevé est l'une des attentes les plus importantes dans les futurs écosystèmes de réseau. Les applications telles que la réalité virtuelle, les communications holographiques, la vidéo 16K et l'ultra vidéo 3D nécessitent un débit de données et une consommation de données plus élevés.

e) **Restrictions des ressources de l'appareil** : Les restrictions de calcul et de stockage devraient limiter les capacités des algorithmes cryptographiques et éventuellement conduire à des écarts par rapport aux mécanismes standards. L'adoption standard de la sécurité est plus difficile avec de telles contraintes de ressources de périphérique.

I.3.6.6 Les services 6G irréalisables en 5G

- La réalité étendue réellement immersive (truly immersive extended reality)
- L'hologramme mobile à haute-fidélité 3D (high-fidelity mobile hologram)
- Les répliques numériques de personnes et d'objets réels ou jumeaux numériques (digital replica).

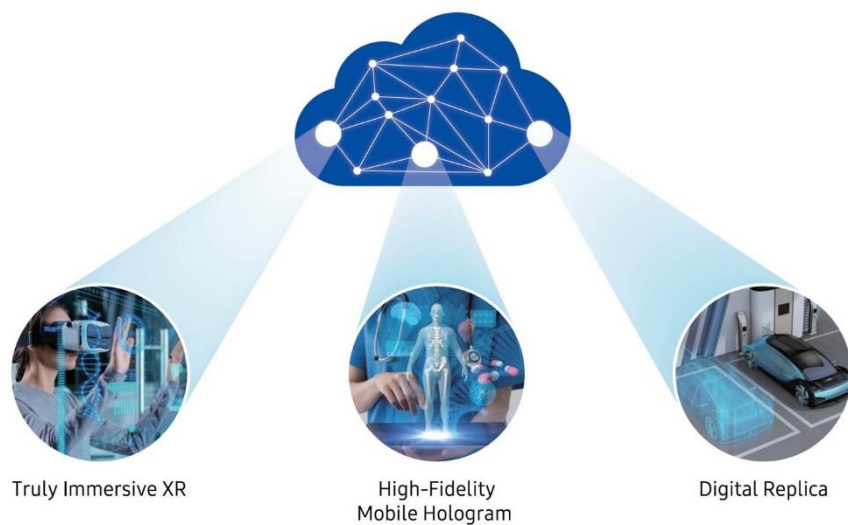


Figure I.5 : Quelques usages permis avec la 6G [8].

I.3.6.7 Prédire l'avenir de la 6G

Si LTE est synonyme d'évolution à long terme, la 5G est une évolution à plus long terme. Cependant, c'est une bonne idée d'explorer ce que l'avenir peut réserver à la 6G. Imaginer l'avenir peut être une tâche futile ; puisque prédire la prochaine génération de technologie sans fil est un passe-temps favori pour les ingénieurs sans fil. C'est peut-être plus facile à faire pour le domaine sans fil que pour la plupart des domaines puisqu'il est possible d'examiner les activités des organismes de normalisation pour avoir un aperçu de ce que les prestataires et les fournisseurs de services essaient d'accomplir (et ce qu'ils doivent corriger à partir de la dernière norme). Avant même que la technologie ne soit débattue dans les organismes de normalisation, les chercheurs développent de nouvelles idées qui peuvent clairement améliorer les performances par rapport aux systèmes actuels [10] [11].

L'histoire nous a appris des leçons qui découlent de l'observation des normes au cours des cinq dernières générations. Par exemple,

- Toutes les fonctionnalités énoncées dans une version donnée ne sont pas implémentées immédiatement ou simultanément ; cela pourrait prendre un certain temps pour qu'elles deviennent pratiques. Cela sera encore plus vrai pour la 5G étant donné l'énorme portée sans précédent des technologies 5G.
- Les faiblesses de la norme actuelle deviennent des moteurs technologiques pour la prochaine génération. Ce processus a été particulièrement vrai avec les faiblesses de confidentialité et de sécurité.
- On peut prédire les tendances technologiques, mais on réussit moins à offrir les modèles commerciaux qui tirent parti de ces développements technologiques.
- Parfois, les nouvelles technologies peuvent fonctionner très bien dans les simulations ou les prototypes. Cependant, le passage des modèles et au déploiement commercial ne fonctionne pas toujours aussi bien et prend beaucoup plus de temps que prévu.
- Les nouvelles générations de normes cellulaires sans fil ont tendance à Augmentations de 10 ans. Par exemple, les déploiements LTE ont commencé vers 2008 et la 5G était normalisé en 2018.
- L'ampleur des problèmes que les adresses sans fil augmentent à chaque génération. Par exemple, la 1re génération a commencé avec la voix, la 2e génération a permis des connexions simples à des machines telles que des distributeurs automatiques, la 3e génération a permis un accès Internet haut débit, y compris une navigation Web améliorée, et la 4e génération a rendu pratique le divertissement vidéo via le sans-fil. Un champ d'application considérablement élargi des normes de 5ème génération est largement attendu.
- En général, le déploiement de toutes les fonctionnalités d'une norme prend plus de temps que ce que le battage médiatique initial pourrait impliquer, mais au final, la norme dépasse les attentes globales.
- Ces tendances ont été assez constantes dans les cinq générations de normes. Ce qui est nouveau pour la 6e génération de normes, c'est que les nations reconnaissent désormais l'importance des normes sans fil pour le bien-être économique national et la sécurité nationale. En conséquence, la création des technologies fondamentales derrière la 6G est devenue beaucoup plus compétitive.

I.3.6.8 Portée future des réseaux 6G

Les réseaux radio 6G fourniront la communication et la collecte de données nécessaires à l'accumulation d'informations. Cependant, une approche systémique est nécessaire pour le marché de la technologie 6G. Elle comprendra l'analyse des données, l'IA et les capacités de calcul de nouvelle génération. En plus de les profonds changements au sein du RAN, le tissu

du réseau de communications central se transformera également. De nombreuses nouvelles technologies convergent effectivement avec la 6G. L'IA, notamment, occupera une place centrale avec la 6G [6].

I.3.6.9 Les enjeux de la 6G

Alors que la 5G est en cours de déploiement au niveau mondial, la 6G est déjà en pleine élaboration dans les laboratoires, les entreprises télécoms, l'industrie des composants, les fabricants et les gestionnaires de réseaux, les concepteurs de logiciels, etc. Parmi les défis révélés dans ce domaine on a les communications holographiques, la fabrication de haute précision, l'introduction omniprésente de l'intelligence et l'incorporation de nouvelles technologies basées sur la sub-THz ou la VLC (Visible Light Communications) sont de véritables enjeux.

Cela aura lieu dans un cadre de couverture véritablement tridimensionnel (3D), qui intègre la radio terrestre et aérienne, pour répondre aux différents besoins à l'aide de fonctionnalités Cloud où et quand cela est nécessaire et disponible à la demande, et dans toutes ces applications la 6G doit soulever les défis pertinents aux communications M2M présentés par Biral et al [9] [12] [13] :

- **SLA vs "meilleur effort"** : Jusqu'à présent, les services fournis sur les réseaux mobiles qui connectent les objets à Internet se faisaient au mieux en raison de la nature du protocole Internet (IP). Par exemple, de petits retards de réseau ou des pertes de paquets étaient peu susceptibles de gêner la vie quotidienne des gens, comme les achats en ligne et le streaming vidéo. À l'avenir, cependant, les réseaux mobiles 6G soutiendront l'infrastructure réseau qui prend en charge une variété d'industries. La 6G assure une communication complète de bout en bout pour les clients avec des accords de niveau de service (SLA : Service Level Agreement) appropriés dans son réseau en tirant parti du Mobile Edge Computing (MEC).

- **Personnalisation du réseau basée sur l'API** : Internet a continué à faire évoluer les systèmes et les protocoles en raison de son ouverture. D'autre part, l'évolution des réseaux mobiles a été limitée en raison de technologies propriétaires et d'une culture fermée. Les réseaux mobiles doivent être capables de prendre en charge la personnalisation et la configuration dynamique à la volée. La 6G fournira des services plus pratiques, en incorporant des interfaces de programmation d'application (API) RESTful (Representational State Transfer) pour personnaliser et configurer son réseau en fonction des besoins des clients.

- **Les réseaux IA** : L'intelligence artificielle est désormais appliquée dans plus de domaines qu'auparavant, notamment pour la détection d'objets à l'aide des techniques de reconnaissance d'images, la reconnaissance/traduction vocale et les opérations d'optimisation/d'automatisation du réseau. Cependant, les moteurs d'IA nécessitent beaucoup

de données et de ressources de calcul. Pour maximiser la puissance de l'IA basée sur le réseau, des réseaux à haut débit et à faible latence sont nécessaires. En distribuant les GPU ainsi que les serveurs sur les réseaux mobiles, il sera possible de fournir des réseaux et des services d'IA à faible coût et de haute qualité. Ces ressources GPU pourraient également être utilisées pour automatiser les opérations des différents réseaux avec l'intelligence de l'IA.

- **100 % de couverture :** Les réseaux 6G doivent éliminer les points morts et offrent une couverture totale dans le monde entier. La 6G vise à résoudre ces défis en proposant des solutions de réseau non terrestre (NTN) qui utilisent des satellites HAPS et Low Earth Orbit (LEO) et Geosynchronous Earth Orbiting (GEO). Cela permettra d'offrir des services Internet à plus de trois milliards de personnes actuellement sans accès à Internet. Il permettra également l'accès au réseau mobile en mer, dans les zones montagneuses et dans la haute atmosphère, où l'installation de stations de base était jusqu'à présent impossible. En tant qu'infrastructure sous-jacente, les réseaux 6G ouvriront la voie à de nouvelles industries qui permettent la conduite autonome, les taxis volants et les services de livraison basés sur des drones, entre autres.

- **Extension de la zone par HAPS :** HAPSMobile Inc., développe des systèmes de plate-forme de télécommunications stratosphériques depuis 2017. En 2020, la société a démontré avec succès un vol stratosphérique et des communications d'évolution à long terme (LTE) depuis la stratosphère au Nouveau-Mexique, aux États-Unis. "Sunglider", un système d'avion sans pilote équipé de panneaux solaires, a été utilisé comme plate-forme de communication stratosphérique pour le test. Le test réussi a prouvé la faisabilité de la technologie HAPS (High Altitude Platform Station).

- **Au-delà des ondes millimétriques :** Les technologies 5G ont permis d'utiliser des fréquences à ondes millimétriques qui restaient auparavant une ressource inexploitée dans les communications mobiles. Pour la 6G, la gamme térahertz, les fréquences supérieures aux ondes millimétriques, telles que le térahertz et la gamme optique, seront exploitées pour construire des réseaux qui fonctionnent à dix fois la vitesse de leurs homologues 5G. Les fréquences comprises entre 100 GHz et 10 THz sont généralement considérées comme étant de l'ordre des térahertz. La Conférence mondiale des radiocommunications 2019 (CMR-19) a réservé un total de 137 GHz pour les télécommunications parmi les fréquences supérieures à 275 GHz qui n'avaient jamais été attribuées auparavant. En exploitant cette vaste gamme de fréquences pour les télécommunications, donc l'objectif est d'atteindre des vitesses encore plus rapides et des communications de volume toujours plus importantes.

- **Détection et positionnement :** Jusqu'à présent, les opérateurs mobiles n'utilisaient le spectre radioélectrique qu'à des fins de télécommunications. Cependant, la 6G peut être utilisée non seulement pour la communication mais aussi pour la détection et le positionnement

simultanément. Par exemple, une technologie utilisant le Wi-Fi pour identifier l'emplacement d'une personne à l'intérieur est déjà en pratique. De plus, Bluetooth® est maintenant utilisé pour suivre les données de position. Dans l'ère 6G à venir, en plus des communications, la 6G cherchera à offrir des services de communication, de détection et de suivi avec des stations de base.

- **Charge/Alimentation** : Pour les appareils tels que les smart phones, les technologies de recharge sans contact conformes à la norme Qi sont largement utilisées. Cependant, cette méthode présente un inconvénient, qui est son incapacité à charger ou à fournir de l'énergie lorsque l'appareil est placé même à une courte distance du chargeur ou de la source d'alimentation. La 6G va radicalement changer les façons de charger les batteries et les routines de charge quotidiennes. Pour concrétiser cet avenir, des se concentreront sur les technologies de charge/d'alimentation sans fil pour les appareils alimentés par batterie tels que les capteurs IoT, les compteurs intelligents, les casques audio, les souris et les claviers.

- **Utilisation et efficacité maximales de la fréquence** : Jusqu'à présent, les fréquences étaient attribuées en fonction des finalités des applications que chaque fournisseur de services utilisait exclusivement. Cependant, en appliquant les technologies du protocole Internet (IP) aux zones sans fil, plusieurs fournisseurs devraient pouvoir partager les bandes passantes disponibles à certains moments et à certains endroits. Les technologies de multiplexage, y compris les entrées multiples/sorties multiples massives (MIMO) et le partage dynamique du spectre (DSS), sont déjà établies. En faisant progresser ces technologies et d'autres, notre objectif est d'utiliser les fréquences plus efficacement.

- **Sécurité du réseau** : À mesure que leur développement s'accélère, on dit que les ordinateurs quantiques pourraient entrer en utilisation pratique d'ici 2030. Lorsque cela se produira, il deviendra possible de déchiffrer les codes RSA*1 actuellement utilisés pour le cryptage Internet, ce qui pourrait rendre les réseaux vulnérables au vol de contenu de communication. Afin de protéger toutes les entreprises construites sur une infrastructure de communication. En faisant progresser des technologies de sécurité réseaux, notre objectif est de construire des réseaux ultra-sûrs.

- **Résilience, Redondance, Récupération** : Avec le déploiement de la 5G, les réseaux mobiles joueront un rôle de plus en plus important dans l'infrastructure des réseaux. En conséquence, les réseaux doivent continuer à fonctionner, même dans des circonstances où une panne de communication se produit. À cette fin, on doit examiner les architectures de réseau traditionnelles et s'efforce de créer des réseaux résistants aux pannes.

- **Sans carbone** : Les données volumineuses obtenues à partir de capteurs et d'appareils, ainsi que le traitement des données, permettront le suivi et l'observation 24h/24 et 7j/7 des émissions de CO₂. Cela contribuera de manière significative à atteindre des émissions nettes de gaz à effet de serre nulles. D'autre part, une surveillance constante à l'aide de capteurs pourrait soulever des problèmes de confidentialité qui doivent être résolus, notamment le traitement des informations personnelles et la sécurité des données. En parallèle, la 6G vise à atteindre un fonctionnement neutre en carbone des stations de base. À l'heure actuelle, les lois exigent l'utilisation de batteries pour l'alimentation électrique de secours dans les stations de base pour maintenir les services du réseau au moment d'une catastrophe. Il est possible de réduire les émissions de gaz à effet de serre en utilisant ces batteries de manière régulière, ainsi qu'en faisant fonctionner les stations de base la nuit en utilisant l'électricité qui a été générée et stockée pendant la journée. De plus, en commandant le fonctionnement des stations de base en temps réel conformément au volume de communication, la consommation d'énergie peut être minimisée. Cela mène des activités de recherche et de développement pour réaliser des stations de base sans carbone.



Figure I.6 : Enjeux de la 6G [7].

I.4 Conclusion

La 5G et la 6G devraient être déployées, offrant une connectivité omniprésente pour les utilisateurs mobiles. Outre le pic attendu de débits de Gbit/s, le défi majeur pour la 5G est la gestion du nombre massif de machines connectées et la croissance 1000 fois supérieure du trafic mobile. Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu du développement et de l'évolution des différentes générations de réseaux de télécommunication, en présentant les caractéristiques propres à chacune. Ensuite, nous avons abordé quelques rappels sur la 5G qui est en cours d'implantation territoriale, en soulignant ses limites et ses inconvénients, et nous avons exposé les éléments technologiques nécessaires pour la future 6G, en discutant des tendances, des exigences, des promesses, des défis et des relations avec l'humain.

Dans le deuxième chapitre, nous allons présenter l'une des techniques importantes pour la 5G et au-delà, à savoir le NOMA.

Chapitre II : Le système d'accès multiple Non orthogonal (NOMA)

II.1 Introduction

L'accès multiple non orthogonal (NOMA) est une technique clé pour les futurs réseaux sans fil tels que la 5G. Cette partie du chapitre introduit le concept de NOMA en présentant le principe du système NOMA en liaison descendante et en liaison montante. Les opérations clés de SC (Successive Interference Cancellation) et de SIC (Simultaneous Interference Cancellation) sont discutées, ainsi qu'une comparaison entre NOMA et OMA (Orthogonal Multiple Access). Enfin, les avantages et les inconvénients de NOMA sont présentés. Les recherches ont montré que NOMA présente des avantages en termes de gain d'efficacité spectrale par rapport à OMA, mais il peut être plus complexe à mettre en œuvre et nécessite une détection et un décodage plus complexes au niveau du récepteur.

II.2 Définition

Les caractéristiques des régimes OMA peuvent être résumées comme suit. En TDMA, les informations pour chaque utilisateur sont envoyées dans des intervalles de temps sans chevauchement, de sorte que les réseaux basés sur le TDMA nécessitent une synchronisation temporelle précise, ce qui peut être difficile, en particulier dans la liaison montante. Dans les implémentations FDMA, telles que l'accès multiple par répartition orthogonale de la fréquence (OFDMA), les informations pour chaque utilisateur sont attribuées à un sous-ensemble de sous-porteuses. CDMA utilise des codes afin de séparer les utilisateurs sur le même canal.

NOMA est fondamentalement différent de ces schémas d'accès multiples qui fournissent un accès orthogonal aux utilisateurs soit dans le temps, la fréquence, le code ou l'espace. Dans NOMA, chaque utilisateur fonctionne dans la même bande et en même temps, mais se distingue par ses niveaux de puissance. NOMA utilise un codage de superposition au niveau de l'émetteur, de sorte que le récepteur à annulation d'interférence successive (SIC) puisse séparer les utilisateurs à la fois dans les canaux de liaison montante et de liaison descendante. NOMA a été proposée comme technologie d'accès radio candidate pour les systèmes cellulaires 5G. La mise en œuvre pratique de NOMA dans les réseaux cellulaires nécessite une puissance de calcul élevée pour mettre en œuvre l'allocation de puissance en temps réel et les algorithmes d'annulation des interférences successives [33].

II.3 Principe base de NOMA

Dans les réseaux 4G conventionnels, comme extension naturelle de l'OFDM, on utilise un accès multiple par répartition orthogonale de la fréquence (OFDMA) lorsque des informations pour chaque utilisateur sont affectées à un sous-ensemble de sous-porteuses. Dans NOMA, en revanche, toutes les sous-porteuses peuvent être utilisées par chaque utilisateur. La

figure II.1 illustre le partage du spectre pour OFDMA et NOMA pour deux utilisateurs. Le concept s'applique aussi bien à la liaison montante qu'à la liaison descendante. [32].

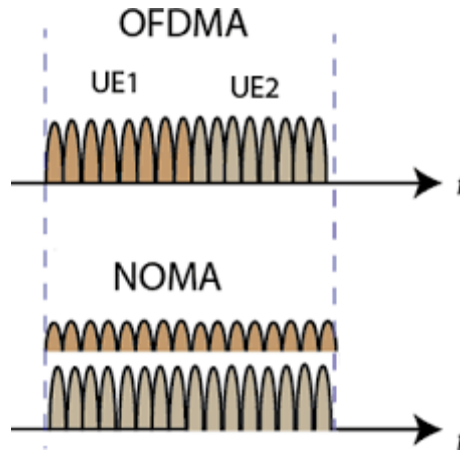


Figure II.1 : Partage du spectre pour OFDMA et NOMA pour 2 utilisateurs [32].

Le codage de superposition à l'émetteur et l'annulation d'interférences successives (SIC ou Successive Interference Cancellation) au niveau du récepteur permettent d'utiliser le même spectre pour tous les utilisateurs. Au niveau de l'émetteur, tous les signaux d'information individuels sont superposés en une seule forme d'onde, tandis qu'au récepteur, le SIC décode les signaux un par un jusqu'à ce qu'il reçoive le signal souhaité. La figure II.2 illustre le concept. Dans l'illustration, les trois signaux d'information, indiqués avec des couleurs différentes, sont superposés à l'émetteur. Le signal reçu au niveau du récepteur SIC comprend ces trois signaux. Le SIC décode d'abord le signal le plus fort, considérant les autres signaux comme des interférences. Le signal décodé est ensuite soustrait du signal reçu, et si le décodage est parfait, la forme d'onde avec le reste des signaux est obtenue avec précision. Le SIC itère ce processus jusqu'à ce qu'il reçoive le signal désiré.

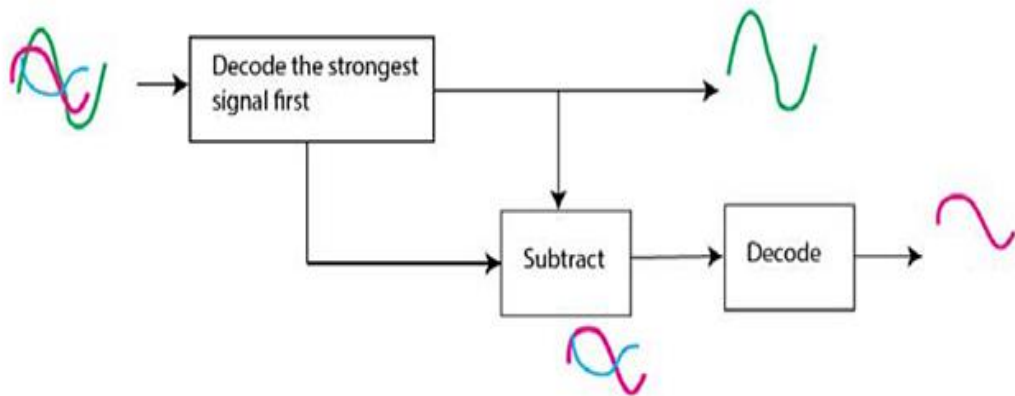


Figure II. 2 : Annulation d'interférence successive [32].

Le succès de SIC dépend de l'annulation parfaite des signaux dans les étapes d'itération. L'émetteur doit diviser avec précision la puissance entre les formes d'ondes de l'information utilisateur et les superposer. La méthodologie de répartition de puissance diffère pour les canaux

de la liaison montante et descendante.

II.4 Codage de superposition SC

Le codage de superposition est une technique de communication qui permet à un émetteur de transmettre simultanément les données de plusieurs utilisateurs. L'émetteur encode les signaux destinés à différents utilisateurs, puis les superpose à des niveaux de puissance différents. Les puissances d'émission sont allouées en fonction de la qualité de leur canal. Pour faciliter l'annulation des interférences successives au niveau des récepteurs, l'émetteur attribue généralement plus de puissance à l'utilisateur faible (celui le plus éloigné de la BS) ayant une mauvaise qualité de canal. Afin d'illustrer le fonctionnement du codage de superposition, un diagramme schématique est présenté à la figure II.3, où la constellation de changement 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 inférieure.

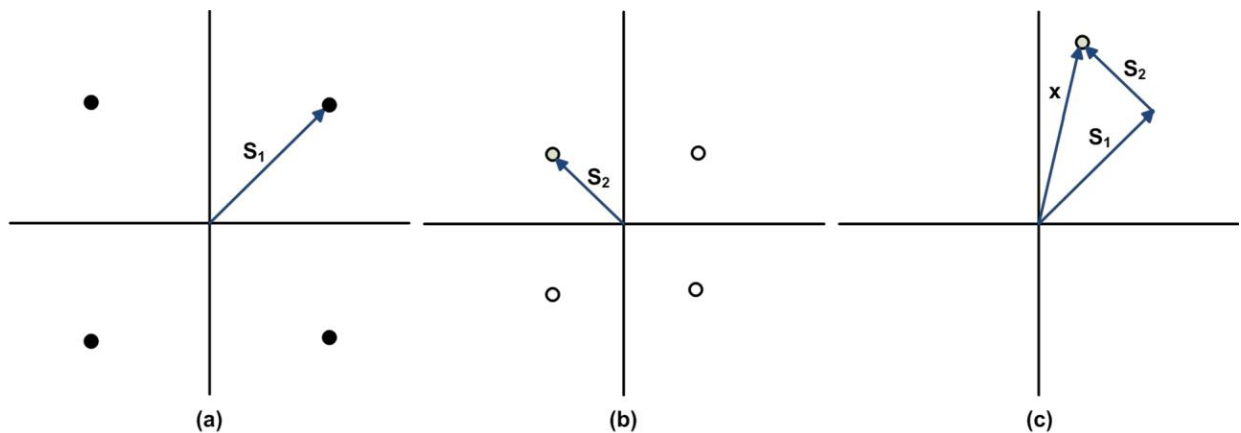


Figure II.3 : Exemple d'encodage SC, (a) constellation de signaux de l'utilisateur 1 (b) constellation de signaux de l'utilisateur 2 (c) constellation de signaux superposés [22].

II.5 Annulation d'interférences successives SIC

Pour décoder les informations superposées au niveau de chaque récepteur, la technique SIC est utilisée. SIC exploite les différences de puissance entre les signaux d'intérêt pour être réalisable. Le principe fondamental du SIC consiste à décoder successivement les signaux des utilisateurs. Une fois qu'un signal utilisateur est décodé, il est soustrait du signal combiné avant de décoder le signal de l'utilisateur suivant. Lorsque le SIC est appliqué, l'un des signaux d'utilisateur est décodé en traitant l'autre signal d'utilisateur comme une interférence, mais ce dernier est ensuite décodé en utilisant l'information du signal précédemment supprimé. Avant d'appliquer le SIC, les utilisateurs sont classés en fonction de la puissance de leur signal, de sorte que le récepteur puisse d'abord décoder le signal le plus fort, le soustraire du signal combiné et isoler le signal plus faible dans le résidu. Il est important de noter que chaque utilisateur est décodé en traitant les autres utilisateurs comme du bruit lors de la réception du

signal. La figure II.4 présente la technique de décodage du signal superposé du côté de la réception. Ici, le point de constellation de l'utilisateur 1 est d'abord décodé à partir du signal reçu. Ensuite, le décodage du point de constellation de l'utilisateur 2 est effectué par rapport au point de constellation décodé de l'utilisateur 1 [18].

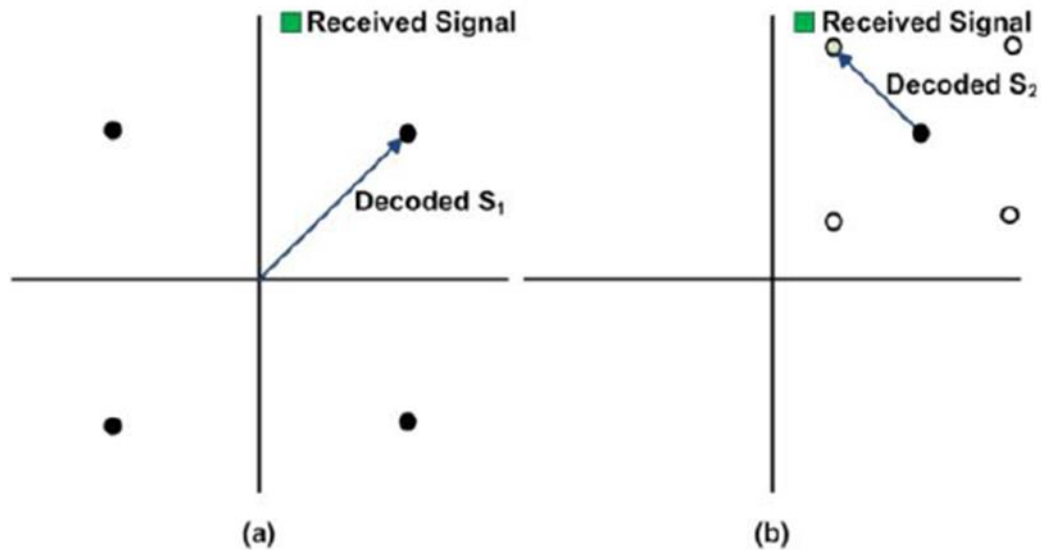


Figure II.4 : Un exemple de décodage SC (a) décodant le signal de l'utilisateur 2 (b) décodant le signal de l'utilisateur 1.

Acquérir une compréhension plus approfondie du fonctionnement de SIC :

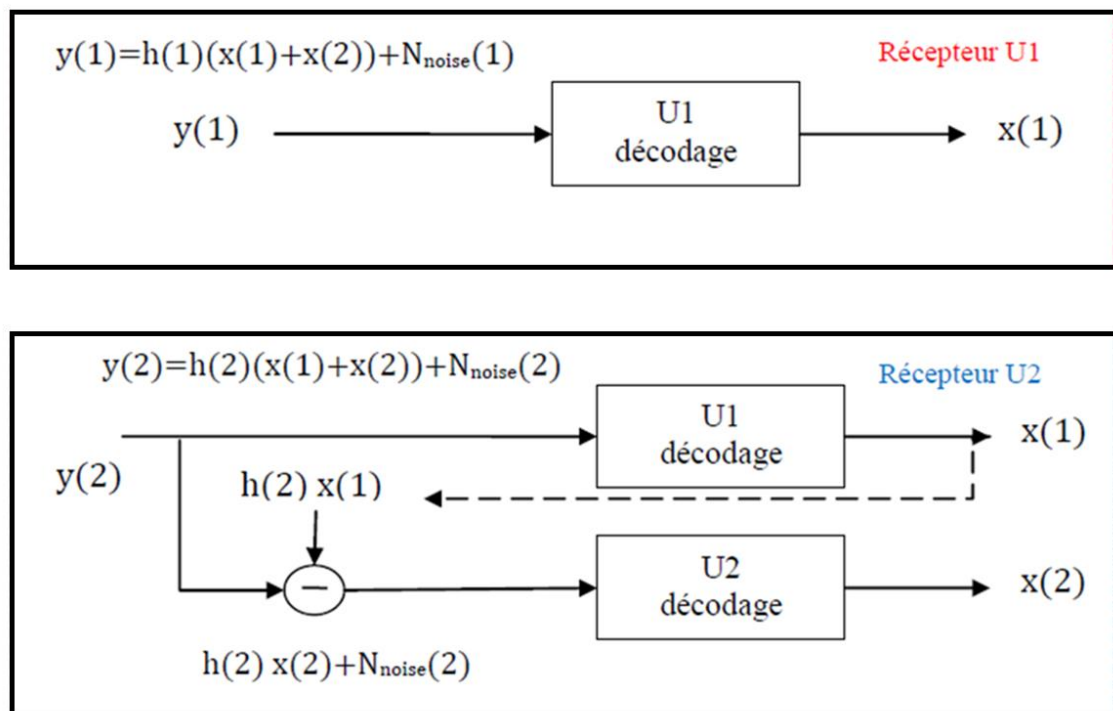


Figure II.5 : Comment fonctionne SIC dans les récepteurs entre deux utilisateurs.

En utilisant l'exemple à deux utilisateurs illustré à la Figure II.5 et en supposant que les utilisateurs sont classés dans un ordre croissant en fonction de leurs gains de canal, l'utilisateur

avec les pires conditions de canal (noté utilisateur 1) traite le signal de l'utilisateur avec le meilleur canal que le bruit et décode ses données à partir du signal reçu. D'autre part, l'utilisateur avec le meilleur canal (noté utilisateur 2) exécute SIC, car il décode d'abord les données de l'autre utilisateur, puis les annule du signal reçu. Le signal reçu à interférences supprimées est ensuite utilisé pour décoder les données pour cet utilisateur.

II.6 Liaison descendante NOMA (Down Link)

La figure II.6 présente un système NOMA simple composé d'un seul BS et de deux utilisateurs, chacun équipé avec une seule antenne. Supposons que x_1 et x_2 sont les signaux à transmettre de la BS à utilisateurs 1 et 2, respectivement. La BS transmet le signal codé de superposition comme :

$$X = \sqrt{p_1}x_1 + \sqrt{p_2}x_2 \quad (\text{II.1})$$

Où p_i , $i = 1, 2$, est la puissance d'émission de l'utilisateur i et le signal de message x_i , $i = 1, 2$, est de l'unité power, c'est-à-dire $E\{|x_i|^2\} = 1$, avec $E\{-\}$ comme opérateur d'espérance. La puissance d'émission totale des utilisateurs 1 et 2 peuvent alors s'écrire $= p_1 + p_2$. En pratique, pour un paramètre système particulier, p est prédéfinie et est donc divisée en p_1 et p_2 selon l'allocation de puissance adoptée (PA) schème. Le signal reçu à l'utilisateur i peut être représenté par :

$$y_i = h_i X + N_{\text{noise}} \quad (\text{II.2})$$

Où h_i est le gain de canal entre la BS et l'utilisateur i et w_i représente le bruit Gaussien s avec la densité spectrale de puissance N_f [34].

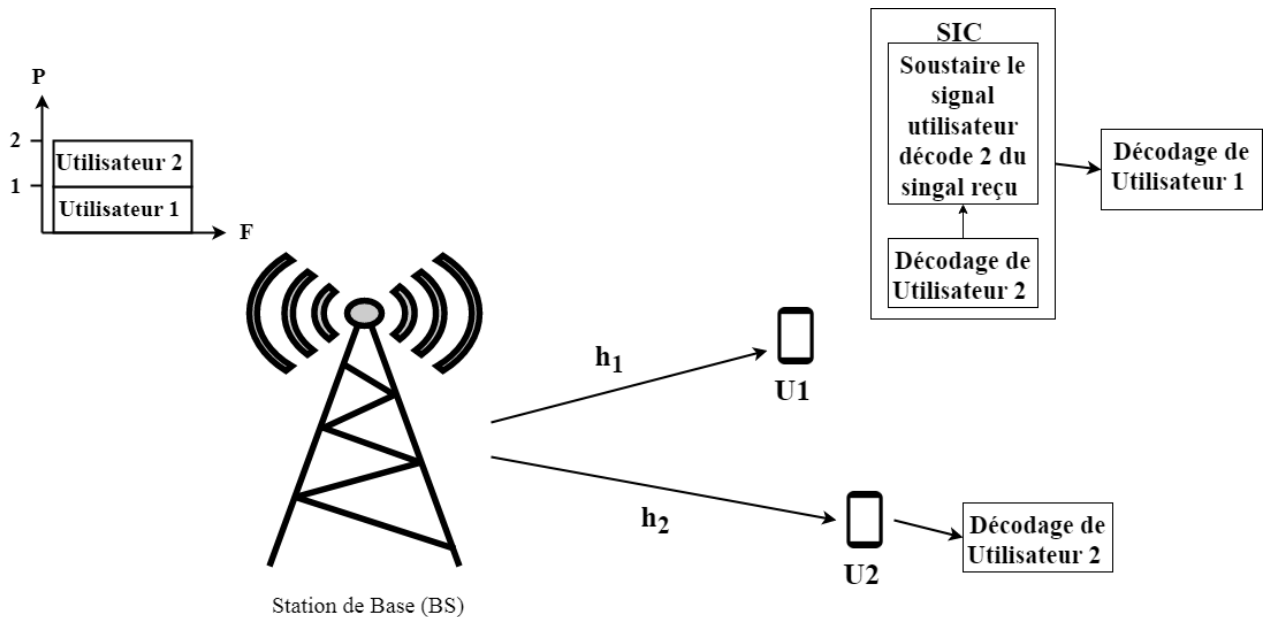


Figure II.6 : liaison descendante NOMA pour 2 utilisateurs.

II.7 Liaison montante NOMA (Up Link)

La figure II.7 présente un schéma NOMA de liaison montante, où les utilisateurs 1 et 2 transmettent simultanément leur signaux x_1 et x_2 vers la BS. Le signal reçu à la BS est donné par :

$$y = \sum_{i=1}^2 \sqrt{p_i} h_i x_i + N_{noise} \quad (II.3)$$

Où p_i est la puissance d'émission pour l'utilisateur, avec $E = \{|x_i|^2\} = 1$, et représente le bruit Gaussien avec la densité spectrale de puissance N_f . En général, la BS diffuse un signal de référence sur la base duquel chaque utilisateur effectue une estimation de canal. Ainsi, ils peuvent régler leur puissance d'émission à p_1 ou p_2 , en fonction de leurs gains de canal. L'utilisateur 1 est à nouveau marqué comme l'utilisateur fort connaissant un gain de canal plus élevé par rapport à l'utilisateur 2, l'utilisateur faible. Lors de la réception du signal superposé, la BS exécute SIC pour séparer les signaux des utilisateurs [34].

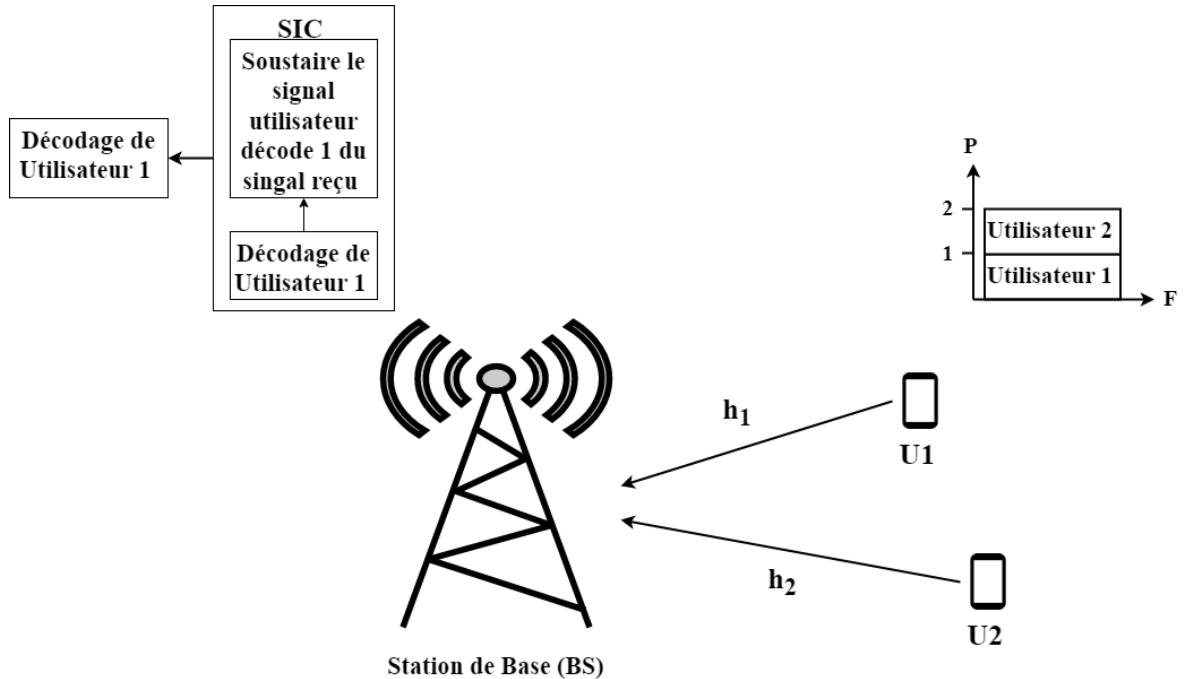


Figure II.7 : Liaison montante NOMA pour 2 utilisateurs.

II.8 Les avantages et les inconvénients

II.8.1 Avantages de NOMA :

a. Efficacité de bande passante supérieure : En exploitant le multiplexage de puissance, NOMA offre une efficacité spectrale élevée par rapport à ses technologies OMA homologues. Contrairement aux technologies OMA, NOMA a la capacité d'accueillir plus d'utilisateurs sur la même ressource fréquence / temps pour faire face à la surcharge du réseau [24].

b. Équité utilisateur améliorée : dans le multiplexage du domaine de puissance, NOMA attribue une puissance de transmission élevée aux utilisateurs avec des qualités de canal plus faibles, ce qui garantit l'équité de ces utilisateurs par rapport aux autres utilisateurs avec de meilleures qualités de canal. Cette caractéristique de NOMA peut être obtenue en allouant efficacement l'énergie à différents utilisateurs du réseau [26].

c. Connectivité massive : les futurs réseaux IoT 5G et B5G devraient connecter des milliards de nœuds IoT, ce qui ne peut être réalisé avec les technologies OMA existantes. NOMA peut accueillir un nombre important d'utilisateurs que l'OMA en utilisant efficacement les ressources de fréquence / temps existantes [28].

d. Capacité élevée du système : Il s'agit d'une autre caractéristique importante de la technologie NOMA. Il a été prouvé mathématiquement que les performances de capacité NOMA sont toujours meilleures que n'importe quel système OMA lorsqu'un schéma de gestion efficace des ressources est appliqué aux deux systèmes [29].

e. Faible latence de transmission et coût de signalisation : un utilisateur exploitant la technologie OMA a besoin d'une planification, avec BS pour une subvention qui entraîne un retard de transmission et un coût de signalisation élevés. La technologie NOMA, cependant, ne nécessite pas cette planification, ce qui peut réduire considérablement la signalisation supplémentaire et le retard de communication [30].

f. Prise en charge de diverses exigences de qualité de service : la technologie NOMA utilisant le multiplexage de puissance a la capacité de prendre en charge plusieurs utilisateurs sur la même ressource de fréquence / temps ayant les diverses demandes de qualité de service (QoS) [28]. Il s'agit donc de la technologie candidate clé pour les futurs réseaux IoT pour connecter un grand nombre de périphériques avec des exigences de QoS différentes.

g. Robuste dans les scénarios de mobilité élevée : dans les scénarios de mobilité élevée, l'accès multiple par répartition orthogonale de la fréquence (OFDMA), qui est l'une des technologies clés OMA, fournit un gain très faible en raison d'informations obsolètes sur l'état des canaux (SCI). La technologie NOMA dépend principalement du CSI côté récepteur et peut donc fournir des gains significatifs dans les scénarios de mobilité élevée [31].

h. Rentable : la technologie NOMA ne nécessite pas d'antennes d'émission supplémentaires, ce qui est assez important du point de vue du coût et des limites d'espace des déploiements de petites cellules et de macro-cellules dans les réseaux pratiques actuels [17].

II.8.2 Inconvénients de NOMA :

a. Frais généraux de retour d'informations sur l'état du canal (CSI) : Pour organiser un ordre approprié de décodage SIC, la technologie NOMA utilisant le multiplexage

de puissance nécessite perfectissime, ce qui peut entraîner une surcharge supplémentaire sur le retour CSI [18].

b. Complexité de calcul : En raison du processus SIC Au niveau des récepteurs, la technologie NOMA introduit une complexité de calcul et un délai de traitement élevés par rapport aux technologies OMA conventionnelles. Cette complexité dépend généralement de la densité de l'utilisateur sur la même ressource de bande passante et peut être plus augmentée si le nombre élevé de périphériques partageant la même ressource de bande passante en même temps [19].

c. Processus SIC réussi : Le déploiement réussi de la technologie NOMA dépend du processus de décodage efficace de SIC au niveau des récepteurs. Pour que ce processus réussisse, un écart de puissance minimum reçu entre différents utilisateurs sur la même ressource de bande passante est obligatoire [20]. Cependant, la plupart des études théoriques sur la technologie NOMA ne garantissent pas cet écart.

d. Surcharge de signalisation : comparé aux technologies OMA conventionnelles, dans la technologie NOMA, un utilisateur fort doit connaître l'allocation de puissance d'un utilisateur faible pour effectuer un SIC, ce qui augmente la surcharge de signalisation [21].

e. Interférence entre les cellules : comme indiqué précédemment, NOMA attribue une puissance de transmission élevée à l'utilisateur faible, qui est généralement situé au bord de la cellule de la cellule. Cela peut introduire plus d'interférences intercellulaires dans l'ensemble du réseau [30].

II.9 Efficacité spectrale et efficacité énergétique

Dans cette section, nous introduisons les définitions de base de l'efficacité spectrale (SE) et efficacité énergétique (EE).

II.9.1 Efficacité spectrale :

L'amélioration de l'efficacité spectrale a été une recherche centrée et continue dans le domaine des communications sans fil depuis des décennies, en raison de la rareté et le cout des ressources spectrales.

L'efficacité spectrale quantifie le nombre de bits d'informations peuvent être fournis dans une unité de temps et de bande passante de système (bit/s/Hz). Par conséquent, sur la base de la célèbre formule atteinte par Shannon, le SE est défini comme :

$$SE = \log_2(1 + \frac{p|h|^2}{\sigma^2}) \text{ (bit/s/Hz)} \quad (II.4)$$

Où σ^2 désigne la puissance de bruit, représente la puissance d'émission, et $|h|^2$ désigne le gain du canal.

II.9.2 Efficacité énergétique :

L'efficacité énergétique s'est imposée comme une nouvelle figure marquante et fondamentale du mérite pour les systèmes de communication sans fil. En général, EE se présente essentiellement sous la forme d'un rapport avantages-coûts pour évaluer la quantité de données livrée en utilisant la ressource énergétique limitée du système (bits/Joule). L'EE est défini comme :

$$EE = \frac{W \cdot SE}{\delta p + PC} \quad (II.5)$$

Où PC désigne la consommation d'énergie du circuit statique associée aux communications et $\delta > 1$ capture l'inefficacité de l'amplificateur de puissance d'émission [17]. La bande passante (w).

II.9.3 Compromis entre l'efficacité spectrale et l'efficacité énergétique

Selon la théorie de Shannon, la dépendance de l'efficacité énergétique en fonction de l'efficacité spectrale est monotone car elle ne prend pas en compte la consommation d'énergie des circuits, où une EE minimale est garantie dans le cas où SE est élevée et lorsque celle-ci tend vers zéro, l'EE est maximale. Mais en réalité, l'EE d'un système de communication dépend aussi de la consommation d'énergie des circuits. Dans ce cas, l'EE augmente dans la région SE basse et diminue dans la région SE élevée. Le point où le système atteint une efficacité énergétique maximale est nommé « point vert » [23] [25].

II.10 Champs d'application du NOMA

Les champs d'application de la technique NOMA sont multiples, on peut en citer quelques-uns.

✓ Coopérative NOMA (C-NOMA)

La transmission NOMA coopérative repose sur la coopération entre les utilisateurs de NOMA, d'une manière à ce que les utilisateurs avec de fortes conditions de canal agissent comme étant des relais dans le but d'aider les utilisateurs avec des conditions de canal plus faibles. Après avoir effectué le SIC par l'utilisateur proche de la BS pour décoder le signal de l'utilisateur éloigné, ce dernier va recevoir deux copies des messages via des canaux différents.

✓ Li-Fi (Light Fidelity ou Visible Light Communications, VLC)

Est une technologie qui se développe autour des éclairages à base de LED. Elle fait partie des communications optiques sans fil (Optical Wireless Communications, OWC) avec la caractéristique de ne transmettre que sur des distances de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. NOMA dans ce cas avec un gain de performance similaire à ce qui est observé dans

le cas RF, le décodage sera plus simple et le canal ne change pas la plupart de temps [36] [27].

✓ **Accès multiple défini par logiciel (SoDeMA)**

L'accès multiple défini par logiciel est un domaine de recherche actif où le meilleur schéma d'accès multiple est sélectionné en fonction des conditions du système. Par exemple, si nous n'avons qu'un petit nombre d'utilisateurs et qu'ils n'ont pas une grande variance du SNR, OMA serait préférable à NOMA [35].

✓ **Internet des objets**

Les scénarios de l'IoT consiste en une connectivité massive désigne l'ensemble des infrastructures et technologies mises en place pour faire fonctionner des objets divers par le biais d'une connexion Internet. L'exploitation de ressource non orthogonale comme moyen d'améliorer la connectivité fait l'objet de recherche actuelle [37] [27].

✓ **MIMO-NOMA**

NOMA est une technologie polyvalente car elle peut être combinée avec de nombreuses autres techniques comme la communication coopérative, SWIPT, MIMO, etc. Cette combinaison permet de conduire à une grande capacité d'un système.

II.11 Comparaison de l'OMA avec NOMA

Le tableau II.1 suivant représente une comparaison entre les deux types d'accès NOMA et OMA :

Caractéristique	NOMA	OMA
Efficacité spectrale	Dans le NOMA, plusieurs Utilisateurs utilisent la même ressource avec de bonnes et de mauvaises conditions de canal en même temps. Les codes attribués à l'utilisateur faible sont également utilisés pour l'utilisateur fort, ce qui entraîne des interférences qui sont traitées par le SIC.	Chaque utilisateur se voit attribué à une ressource sans tenir compte de l'état du canal, qu'il soit bon ou mauvais, et par conséquent, une diminution de l'efficacité spectrale et donc de débit est enregistrée dans le système.
Équité pour l'utilisateur,	NOMA sert de nombreux	Dans OMA, l'utilisateur

faible latence et connectivité massive	utilisateurs en même temps selon différentes conditions de canal, ce qui offre une équité pour l'utilisateur, un temps de réponse réduit et une connectivité élevée.	avec un bon état de canal a une priorité plus élevée à se servir tandis que l'utilisateur avec un mauvais état de canal doit attendre l'accès, ce qui entraîne un problème d'équité et une latence relativement élevée. Cette approche ne peut pas supporter une connectivité massive.
Complexité du récepteur	Élevée	Faible
Consommation d'énergie	Plus	Moins
Nombre d'utilisateurs/cluster	Inférieur	Supérieur
Nombre de paires d'utilisateurs	Moins	Plus

Tableau II.1 : comparaison entre les techniques NOMA et OMA [38] [39].

II.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons discuté du concept et des technologies clés du NOMA, qui est considéré comme l'une des technologies les plus prometteuses pour les futurs systèmes de communication. Le gain de diversité du NOMA provient du champ de puissance des signaux qui sont transmis en superposition, utilisant la liaison descendante ou montante. Les performances du NOMA ont été comparées à celles de l'OMA.

Le prochain chapitre se concentrera sur la vérification des performances du NOMA sur liaison montante par rapport à l'OMA en liaison montante traditionnelle.

**Chapitre III :
Simulation de NOMA
Sur la liaison
montante**

III.1. Introduction

D'après le chapitre précédent, l'avantage de la NOMA réside dans l'augmentation de l'efficacité spectrale. La plupart des études se sont concentrées sur la liaison descendante en NOMA, tandis que la liaison montante en NOMA n'a pas fait l'objet d'une grande attention. Dans ce chapitre, nous supposons que nous étudions et évaluons les performances de la liaison montante en NOMA. Nous évaluons la probabilité d'interruption, la capacité et le débit du système en utilisant des résultats de simulation. Nous comparons nos résultats à ceux de l'OMA en liaison montante traditionnelle.

III.2. Modèle de système

Nous considérons un système NOMA de liaison montante composé d'une station de base (BS) et de deux utilisateurs 1 (U1) et 2 (U2). U1 est éloigné et U2 est proche de la station de base, comme le montre la figure 1. Le canal d'évanouissement de Rayleigh est supposé être entre les nœuds.

Les utilisateurs transmettent leur signal en même temps à la station de base. Le signal reçu à la station de base est donné par

$$y = \sqrt{P_S}(\sqrt{\alpha_1}x_1)h_1 + \sqrt{P_S}(\sqrt{\alpha_2}x_2)h_2 + n, \text{ où } i = 1,2 \quad (\text{III.1})$$

Où $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$. $\alpha_1 < \alpha_2$. α_1 et α_2 sont les coefficients d'allocation de puissance de U1 et U2, respectivement. x_1 et x_2 sont les signaux de U1 et U2, respectivement. p_s est la puissance d'émission totale. $n \sim \text{CN}(0, \sigma^2)$ à l'AWGN. h_1 et h_2 sont le canal à évanouissement de Rayleigh entre U1-BS et U2-BS, où $h_1 \sim \text{CN}(0, \sigma_1^2)$, $h_2 \sim \text{CN}(0, \sigma_2^2)$. $\sigma_1^2 = d_1^{-\alpha}$, et $\sigma_2^2 = d_2^{-\alpha}$ où d_1 et d_2 représentent les distances entre U1-BS et U2-BS, respectivement, et α est l'exposant de perte de chemin.

La station de base décode d'abord x_2 sans SIC. Ensuite, en utilisant le processus SIC, elle décode le signal x_1 . Le relais SINR est donné par

$$\gamma^2 = \frac{a_2 P_S |h_2|^2}{a_1 P_S |h_1|^2 + \sigma^2} \quad (\text{III.2})$$

$$\gamma^1 = \frac{a_1 P_S |h_1|^2}{\sigma^2} \quad (\text{III.3})$$

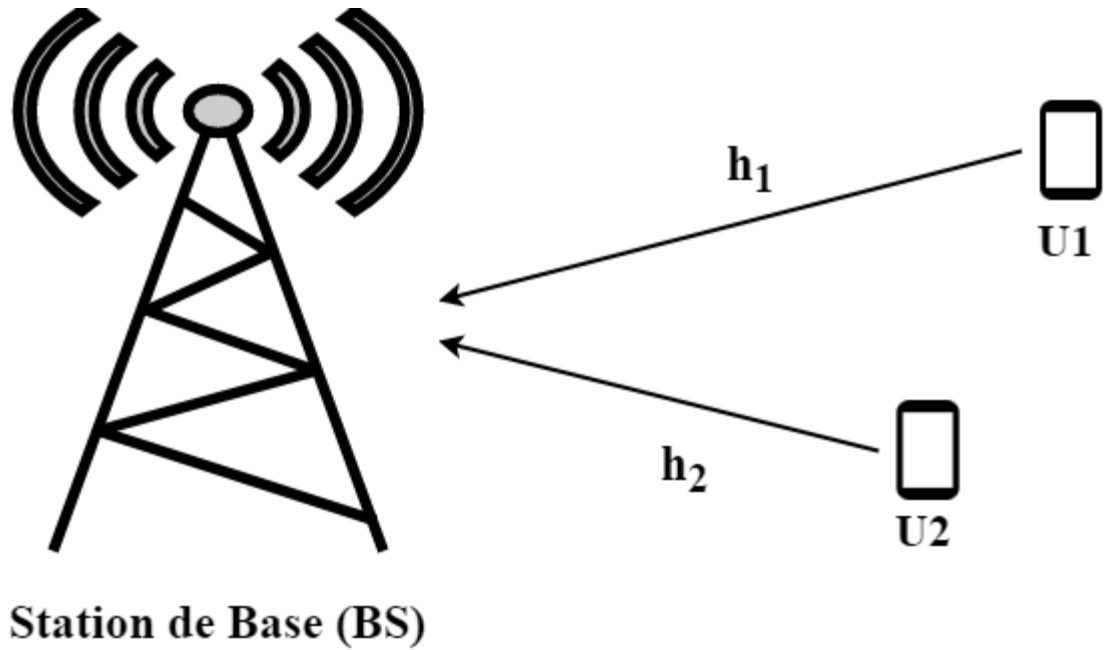


Figure III.1 : NOMA sur la liaison montante.

III.3. Simulation et résultats

Dans cette section, nous simulons le taux d'erreur binaire (TEB), la probabilité d'interruption et la capacité d'un système NOMA coopératif avec une liaison directe.

III.3.1. Paramètres de simulation

Dans les simulations, nous utilisons les paramètres suivants :

Paramètres	Values
Distance entre la station de base BS et U1	2 m
Distance entre la station de base BS et U2	1 m
Perte sur le trajet	4
SNR [dB]	-80:5:80
Coefficient d'attribution de puissance de U1	$\alpha_1=0.2$
Coefficient d'attribution de puissance de U2	$\alpha_2=0.8$
Taux de transmission des utilisateurs	$R_2 = 0.1$ bps/Hz et $R_1 = 0.5$ bps/Hz
Canal	Rayleigh

Tableau III.1 : Paramètres de simulation.

III.3.2. Capacité du système

Dans cette sous-section, nous effectuons une simulation de la capacité de la liaison montante en NOMA. Nous comparons la capacité de la liaison montante en NOMA avec celle de l'OMA en liaison montante.

La capacité de U1 et U2 du NOMA de liaison montante est donnée par

$$C_{U1} = \log_2(1 + \gamma^1) \quad (\text{III.4})$$

$$C_{U2} = \log_2(1 + \gamma^2) \quad (\text{III.5})$$

La capacité de U1 et U2 de l'OMA sur la liaison montante est donnée par la formule suivante

$$C_{U1,OMA} = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{P_S |h_1|^2}{\sigma^2} \right) \quad (\text{III.6})$$

$$C_{U2,OMA} = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{P_S |h_2|^2}{\sigma^2} \right) \quad (\text{III.7})$$

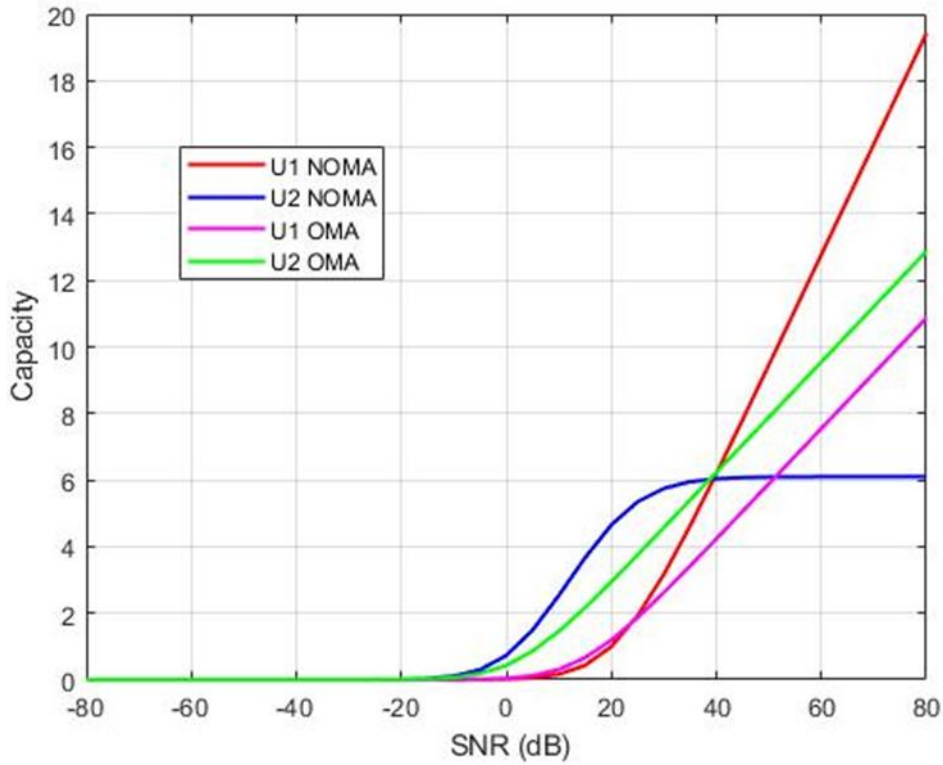


Figure III.2 : Capacité de U1 et U2 de la liaison montante NOMA par rapport à la liaison montante OMA.

La figure III.2 présente la capacité des deux utilisateurs en liaison montante pour la NOMA et l'OMA. On observe que la capacité de U1 est supérieure à celle de U2 lorsque le rapport signal/bruit est élevé. Cela est dû à une allocation de puissance différente. On remarque également que la capacité de U1 et U2 dans la liaison montante NOMA est plus élevée que

celle de la liaison montante OMA. En revanche, dans la liaison montante OMA, U2 offre une meilleure capacité lorsque le rapport signal/bruit est supérieur à 40 dB.

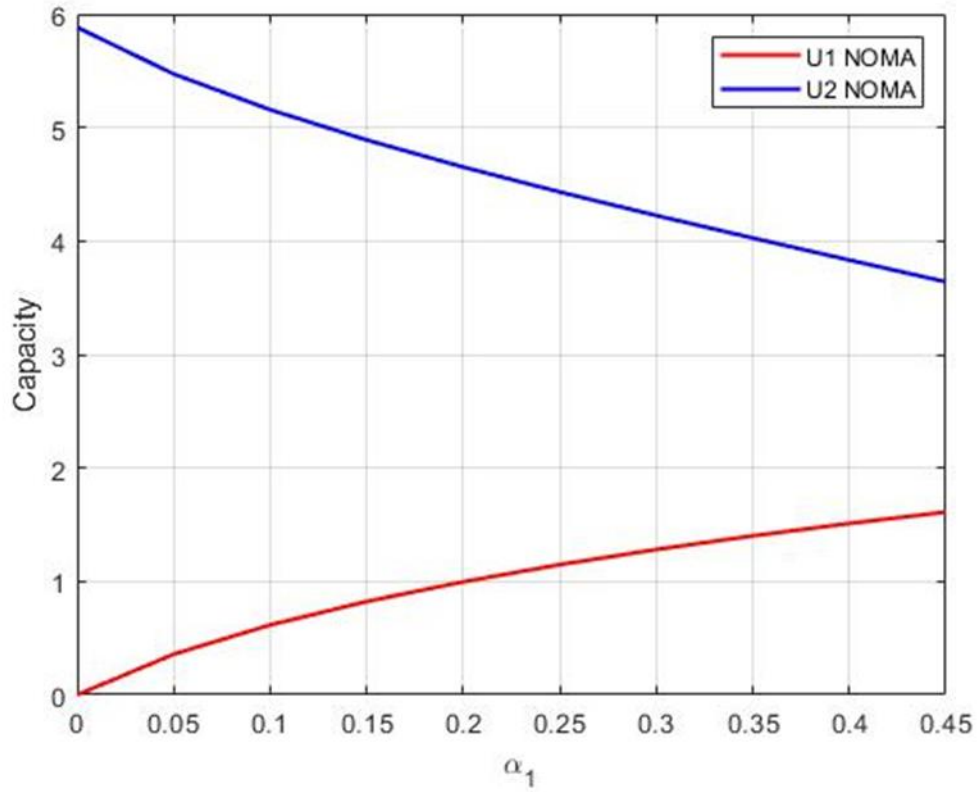


Figure III.3 : Capacité des utilisateurs U1 et U2 de la liaison montante NOMA en fonction de α_1 .

La figure III.3 présente la capacité des deux utilisateurs en liaison montante pour la NOMA en fonction de α_1 , lorsque le rapport signal/bruit est de 20 dB. Nous constatons que l'augmentation de α_1 entraîne une diminution de la capacité de U1 et une augmentation de la capacité de U2. Le changement de α_1 affecte le processus de SIC et la détection des signaux des utilisateurs.

III.3.3. Probabilité d'interruption (OP)

Dans cette sous-section, nous effectuons une simulation de la probabilité d'interruption (OP) d'une liaison directe et d'une liaison NOMA coopérative avec une liaison directe. Nous comparons la probabilité d'interruption de la liaison directe avec celle de la liaison NOMA coopérative avec une liaison directe.

La probabilité d'interruption (OP) de U2 est définie comme étant inférieure au taux R_2 et est équivalente à la capacité C_{U1} de U1, c'est-à-dire :

$$P_{out,U2} = P(C_{U2} < R_2) \quad (III.8)$$

La probabilité d'interruption (OP) de U1 est définie comme la somme de : Lorsque x_2 est détecté par erreur et correctement. Ainsi, la probabilité d'interruption (OP) du signal U1 à la station de base peut être exprimée comme suit

$$P_{out,U1} = P(C_{U2} < R_2, C_{U1} < R_1) \quad (III.9)$$

De même, dans l'OMA de la liaison montante, la probabilité d'interruption (OP) de U2 et U1 est définie comme suit

$$P_{out,U2,OMA} = P(C_{U2} < R_2) \quad (III.10)$$

$$P_{out,U1,OMA} = P(C_{U1} < R_1) \quad (III.11)$$

La figure III.4 présente la probabilité d'interruption (OP) des deux utilisateurs de la liaison montante par rapport à la liaison montante OMA. Nous observons que U2 bénéficie d'un gain de performance supérieur à celui de U1 et atteint un plancher d'erreur à SNR élevé. Il est également notable que U2 de la liaison montante NOMA présente de meilleures performances que U2 de la liaison montante OMA, tandis que U1 de la liaison montante OMA est meilleure que la liaison montante NOMA. Nous pouvons constater que l'OMA ne présente pas de plancher d'erreur à SNR élevé par rapport à la NOMA. Le plancher d'erreur se produit à SNR élevé dans la liaison montante NOMA en raison de l'interférence des canaux des utilisateurs à la station de base.

La figure III.5 présente la probabilité d'interruption (OP) des deux utilisateurs de la liaison montante NOMA en fonction de α_1 , lorsque SNR=20 dB. Nous observons que l'augmentation de α_1 réduit la probabilité de panne de U1 et augmente la probabilité d'interruption (OP) de U2. Le changement de α_1 affecte la suppression successive d'interférence (SIC) et la détection des signaux des utilisateurs.

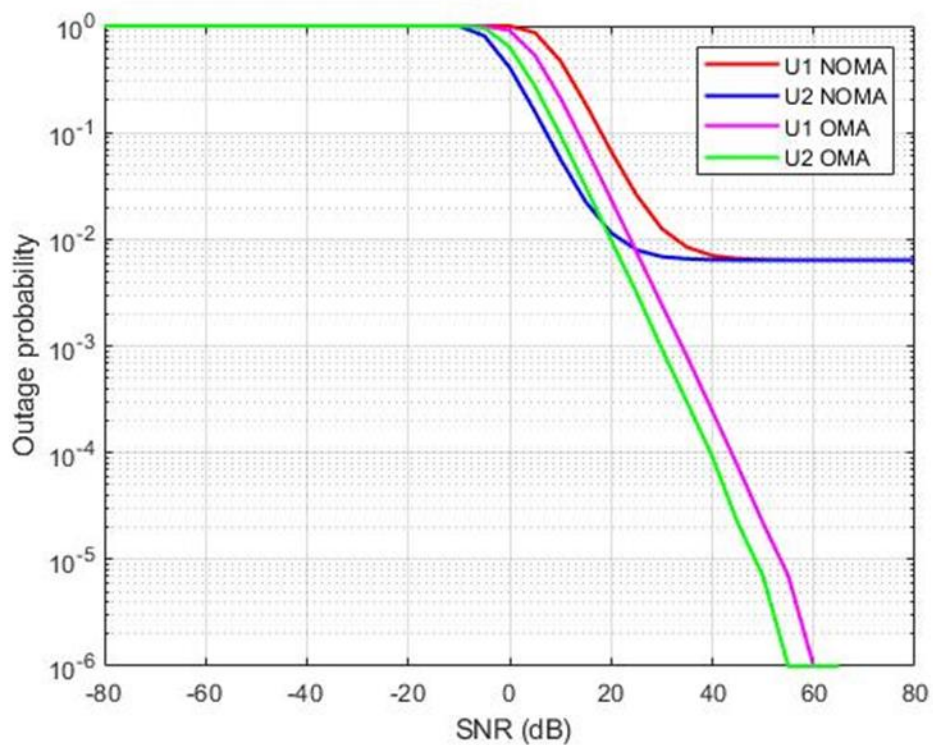


Figure III.4 : Probabilité d'interruption(OP) de U1 et U2 pour la liaison montante NOMA par rapport à la liaison montante OMA.

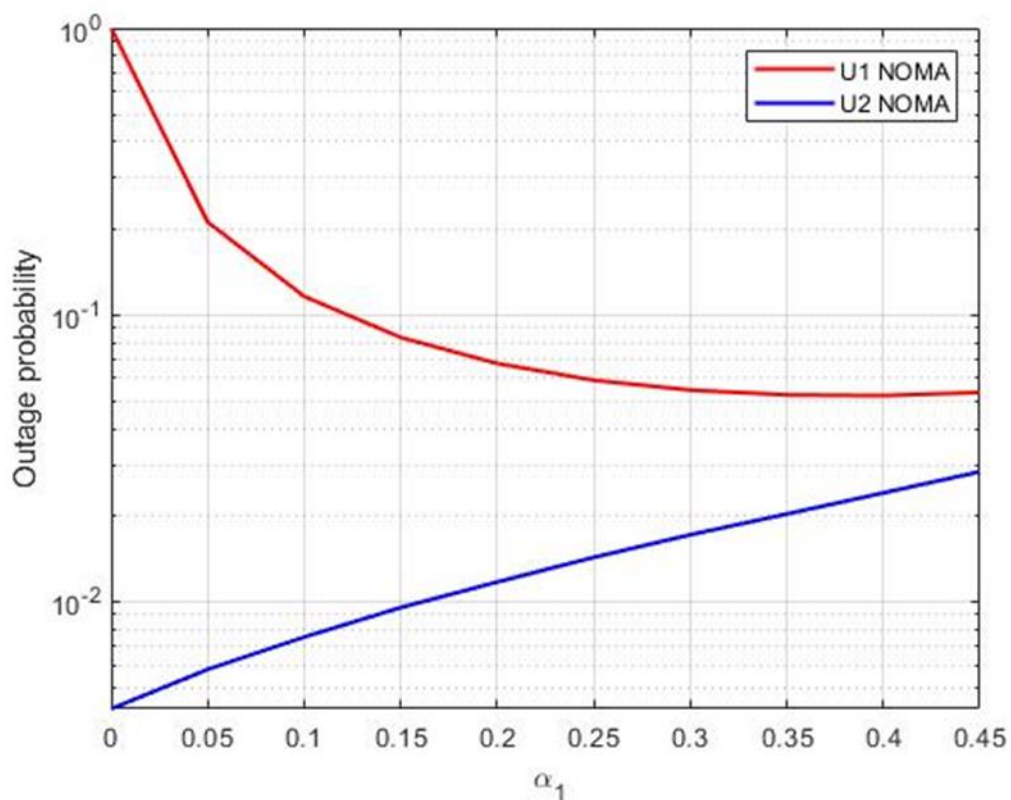


Figure III.5 : Probabilité d'interruption(OP) de U1 et U2 de la liaison montante NOMA en fonction de α_1 .

III.3.4. Débit

$$Th = (1 - op_1)R_1 + (1 - op_2)R_2 \quad (III.12)$$

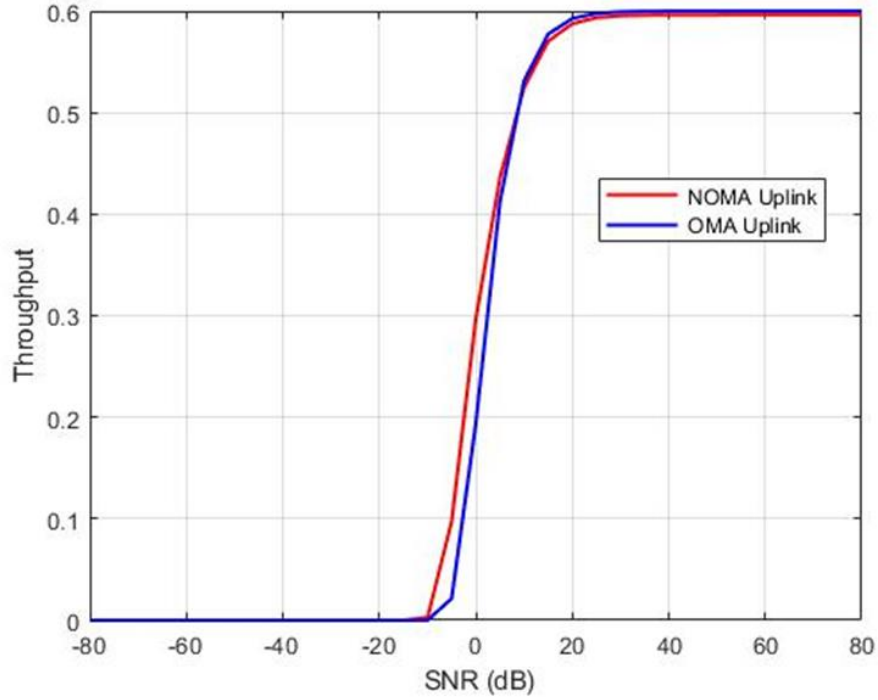


Figure III.6 : Débit de U1 et U2 de la liaison montante NOMA par rapport à la liaison montante OMA.

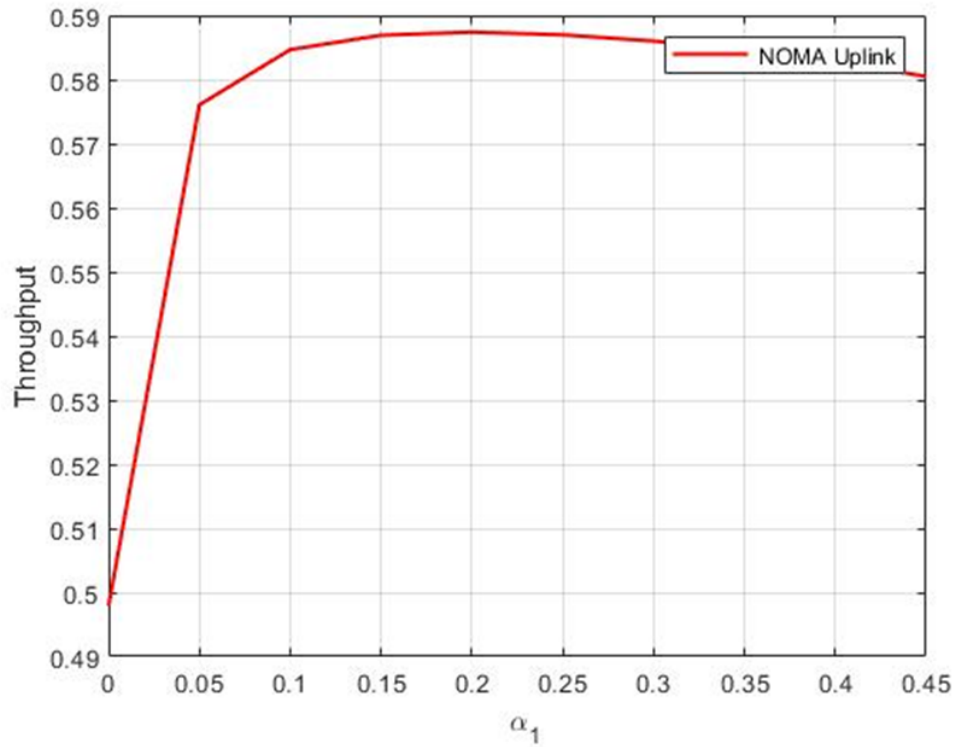


Figure III.7 : Débit de la liaison montante NOMA en fonction de α_1 .

La figure III.6 présente le débit des deux utilisateurs de la liaison montante NOMA par rapport à la liaison montante OMA. On observe que l'augmentation du rapport signal/bruit (SNR) augmente le débit tant pour le NOMA que pour l'OMA. De plus, on constate que le débit de la liaison montante NOMA est supérieur à celui de la liaison montante OMA.

La figure III.7 présente le débit de la liaison montante NOMA en fonction de α_1 , lorsque SNR=20 dB. Nous observons que l'augmentation de α_1 entraîne une augmentation du débit. Le changement de α_1 a un impact sur la SIC et la détection des signaux des utilisateurs.

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons effectué des simulations de la liaison montante NOMA et comparé nos résultats avec ceux de l'OMA de liaison montante traditionnelle. Nous avons évalué la probabilité d'interruption, la capacité et le débit de notre système. Les résultats de la simulation démontrent que la probabilité d'interruption (OP), la capacité et le débit de la liaison montante NOMA sont supérieurs à ceux de l'OMA de liaison montante traditionnelle. De plus, nous avons observé que la modification de l'attribution de puissance a un impact sur le processus de SIC et la détection des utilisateurs.

Conclusion générale

Conclusion générale

.

Récemment, l'étude des technologies d'accès est devenue l'une des recherches les plus importantes dans le domaine des communications, en particulier la technologie NOMA qui est considérée comme une solution prometteuse pour les réseaux au-delà de la cinquième génération. Le concept fondamental de NOMA est de servir plusieurs utilisateurs simultanément en utilisant la même ressource, mais avec des coefficients d'allocation de puissance différents. Le NOMA repose sur deux techniques essentielles : le multiplexage de spectre (SC) en émission et la suppression des interférences (SIC) en réception. Cependant, le NOMA présente un point faible, car il n'est pas toujours possible d'éliminer complètement les interférences.

L'objectif de ce mémoire était d'analyser les performances du NOMA sur liaison montante par comparaison avec l'OMA en liaison montante traditionnelle en termes de capacité et de probabilité d'interruption.

Dans ce mémoire, nous avons commencé par étudier la technologie 5G, puis nous nous sommes penchés sur la technique NOMA tant en liaison montante qu'en liaison descendante. Enfin, nous avons effectué des simulations du NOMA en liaison montante et comparé nos résultats à ceux de l'OMA de liaison montante traditionnelle. Nous avons simulé la probabilité d'interruption, la capacité et le débit de notre système. Les résultats de la simulation démontrent que le NOMA en liaison montante offre de meilleures performances que l'OMA de liaison montante traditionnel.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] J. P. Damiano, Université Côte d'Azur, Publication : de la 5G à la 6G_contexte et enjeux, Société des Ingénieurs et Scientifiques de France (IESF), décembre 2021
- [2] P. Thouverez, zoom sur ...la 5G, Technique de l'ingénieur(TI), 17/05/2019
- [3] Christophe, la première a la cinquième génération, le passé et l'avenir des normes de télécommunications, Testing Labs(SICOM), 05/06/ 2021
- [4] Y. Bouguen, É. Hardouin, F. X. Wolff, Les Différentes Générations, <https://www.scribd.com/document/375038760/Les-Differentes-Generations> Groupe Eyrolles, 2012, ISBN : 978-2-212-12990-8, 28 Mars 2018
- [5] Ph. Follenfant, P. Aballea, H. Havard, Ph. Distler, J. M. Nataf, L. Ch. Viossat, V. Menuet, B. Legait, F. M. Robineau, Ch. A. Calvet, Déploiement de la 5G en France et dans le monde : aspects techniques et sanitaires, Agence nationale des fréquences (ANFR), SEPTEMBRE 2020
- [6] R. Ando, 6G : guide complet sur la sixième génération de réseau sans fil, Livres blancs, 22 septembre 2021
- [7] H. Tharaka, K. Anshuman, G. Gürkan, A. Braeke, The Role of Blockchain in 6G: Challenges, Opportunities and Research Directions Conference Paper, School of Computing and Information Technology , March 2020
- [8] M. Latva-aho, K. Leppänen (eds.), key drivers and research challenges for 6g ubiquitous wireless intelligence, 6G Flagship, University of Oulu, Finland September 2019
- [9] A. Biral, M. Centenaro, A. Zanellan , L. Vangelista, M. Zorzi, The Challenges of M2M Massive Access in Wireless Cellular Networks, Digital Communications and Networks, 2015
- [10] Groupe de travail de l'Académie des sciences sur les réseaux du futur, rapport sur la 5g et les réseaux de communications mobiles, institut de France Académie des sciences, 12 juillet 2021
- [11] V. Blanchot, Samsung affirme que la 6G sera disponible dès 2028, Siècle Digital, 10 février 2021
- [12] H. Tataria, M. Shafi, M. Dohler, Sh. Sun, Six Critical Challenges for 6G Wireless Systems, IEEE Vehicular Technology Magazine 1, Avril 2022
- [13] Ray Le Maistre, 12 challenges for 6G, 5gworldpro, September 29, 2021
- [14] V. Breton, Ph. Boniface, Télécommunications et réseaux, Memotech, Eyrolles, 2014
- [15] A. mehaoua, Réseaux Et Telecommunications, Université Paris Descartes UFR de Mathématiques et Informatique ,5 mai 2021

- [16] J. Toledano, Les enjeux des blockchains Présidente du groupe de travail Rapporteur Lionel, France stratégie Juin 2018
- [17] M. Vaezi, G. A. A. Baduge, Y. Liu, A. Arafa, F. Fang, and Z. Ding, "Interplay between NOMA and Other Emerging Technologies: A Survey," *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.*, vol. 5, no. 4, pp. 900–919, 2019, doi: 10.1109/TCCN.2019.2933835
- [18] S. M. R. Islam, N. Avazov, O. A. Dobre, K. S. Kwak, "Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G Systems: Potentials and Challenges," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 721–742, 2017, doi: 10.1109/COMST.2016.2621116
- [19] J. Zhao, Y. Liu, K. K. Chai, A. Nallanathan, Y. Chen, and Z. Han, "Spectrum Allocation and Power Control for Non-Orthogonal Multiple Access in HetNets," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 16, no. 9, pp. 5825–5837, 2017, doi: 10.1109/TWC.2017.2716921
- [20] Z. Ali, G. A. S. Sidhu, M. Waqas, F. Gao, "On fair power optimization in nonorthogonal multiple access multiuser networks," *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.*, vol. 29, no. 12, pp. 1–16, 2018, doi: 10.1002/ett.3540
- [21] Y. Liu, Z. Qin, M. Elkashlan, Z. Ding, A. Nallanathan, and L. Hanzo, "Non-orthogonal multiple access for 5g and beyond," *arXiv*, vol. 105, no. 12, pp. 2347–2381, 2018
- [22] [https://www.semanticscholar.org/paper/Power-Domain-Non-Orthogonal-Multiple-Access-\(NOMA\)-Islam-Avazov/b641ea7978dc6f08df9f25e52c465b2fba184263/20/05/2023](https://www.semanticscholar.org/paper/Power-Domain-Non-Orthogonal-Multiple-Access-(NOMA)-Islam-Avazov/b641ea7978dc6f08df9f25e52c465b2fba184263/20/05/2023)
- [23] C. Xiong, G. Y. Li, S. Zhang, Y. Chen, S. Xu, "Energy-and Spectral-Efficiency Tradeoff in Downlink OFDMA Networks," *IEEE transactions on wireless communications*, 10(11), pp.3874–3886, 2011
- [24] W. U. Khan, F. Jameel, T. Ristaniemi, B. M. Elhalawany, J. Liu, "Efficient power allocation for multi-cell uplink NOMA network," *IEEE Veh. Technol. Conf.*, vol. 2019- April, pp. 1–5, 2019, doi: 10.1109/VTCSpring.2019.8746316
- [25] I. Ch. Lin, C. Rowell, S. Han, Z. Xu, G. Li, Z. Pan, "Toward Green and Soft : A 5G Perspective," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 66–73, 2014
- [26] S. Timotheou, I. Krikidis, "Fairness for Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 22, no. 10, pp. 1647–1651, 2015, doi: 10.1109/LSP.2015.2417119
- [27] T. T. Abir, M. Rabia, S. M. Redouane. "Évaluation des performances d'un système NOMA-MIMO", Université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued, Année universitaire : 2020/2021.JUIN, 2014
- [28] M. Shirvanimoghaddam, M. Dohler, S. J. Johnson, "Massive Non-Orthogonal Multiple Access for Cellular IoT: Potentials and Limitations," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55,

no. 9, pp. 55–61, 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600618

[29] Z. Chen, Z. Ding, X. Dai, and R. Zhang, “An Optimization Perspective of the Superiority of NOMA Compared to Conventional OMA,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 65, no. 19, pp. 5191–5202, 2017, doi: 10.1109/TSP.2017.2725223

[30] L. Dai, B. Wang, Y. Yuan, S. Han, C. L. I, Z. Wang, “Non-orthogonal multiple access for 5G: Solutions, challenges, opportunities, and future research trends,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 9, pp. 74–81, 2015, doi: 10.1109/MCOM.2015.7263349

[31] A. Li, Y. Lan, X. Chen, H. Jiang, “Non-orthogonal multiple access (NOMA) for future downlink radio access of 5G,” *China Commun.*, vol. 12, pp. 28–37, 2015, doi: 10.1109/CC.2015.7386168

[32] <https://www.intechopen.com/chapters/52822/26/05/2023>

[33] R. C. Kizilirmak, “Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for 5G Networks,” *Toward 5G Wirel. Networks - A Phys. Layer Perspect*, 2016, doi: 10.5772/66048

[34] S. M. R. Islam, M. Zeng, O. A. Dobre, K. S. Kwak, “Non-orthogonal multiple access (NOMA): How it meets 5g and beyond,” *arXiv*, 2019, doi: 10.1002/9781119471509.w5gref032

[35] Y. Yuan, L. Dai, Y. Yuan, S. Han, C. I, Z. Wang, "Non-orthogonal multiple access for 5G: Solutions, Challenges, Opportunities, and Future Research Trends," vol. 53, no. 9, *IEEE Communications Magazine*, pp. 74–81, 2015

[36] G. Marquez, S. Topsu, “Les Communications par lumière visible : le Li-Fi ”

[37] H. Chehri. “Etude et caractérisation d'un canal de propagation pour les réseaux VANET”, Université du Québec en Abitibi- Témiscamingue

[38] <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/NOMA-vs-OMA.html/24/05/2023>

[39] <https://itnspotlight.com/non-orthogonal-multiple-access/24/05/2023>