

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE A. MIRA-BEJAIA  
FACULTE DE TECHNOLOGIE



**MEMOIRE**  
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE  
**Master**  
**Département : GENIE ELECTRIQUE**  
**Filière : Télécommunications**  
**Option : Réseaux et Télécommunications**  
Présentée par  
**CHAOU WISSEM et DJOUADI FELLA**  
**Thème**

**Etude de la Technique d'Accès Multiple Non Orthogonal  
NOMA**

Soutenu le 13/10/2020, devant le jury composé de :

Mr A. MEKHMOUKH,	MCA U.A.M. Béjaia	Président
Mme N. MEZHOUD,	MAA U.A.M Béjaia	Examinatrice
Mr M. TOUNSI,	MCB U.A.M. Béjaia	Encadrant

**Année Universitaire : 2019/2020**

# Remerciements

*Nous remercions d'abord DIEU le tout puissant miséricordieux de nous avoir accordé la santé et le courage pour accomplir ce travail.*

*Nous remercions particulièrement nos chères familles respectives qui n'ont pas cessé de nous encourager et de nous motiver durant tout notre parcours éducatif.*

*Nous remercions notre encadreur Mr **TOUNSI MOHAMED**, Maître de conférences au département de Génie Électrique de l'Université A. MIRA de Bejaia pour son encadrement qui nous été précieux afin de mener notre travail à terme.*

*Nous remercions également les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail.*

*Nous remercions nos chers amis de nous avoir soutenu durant tout la phase de préparation.*

# Dédicaces

*C'est avec beaucoup de reconnaissance que je dédie ce modeste travail :*

*À celle qui m'a donné la vie, au vrai sens de la tendresse, mon soleil ma raison  
d'exister, à ma très chère **maman**. Que dieu te garde pour moi*

*À celui qui ne cesse de se sacrifier pour moi, à ma fierté et mon bonheur, à mon  
espoir et ma sécurité, à mon très cher **papa**. Que dieu garde son âme*

*À ma chère sœur **Yasmina***

*À mes deux frères **Hossem** et **Idris***

*À mon cher époux **Abderrezak***

*À mes deux grandes familles **Chaou** et **Annani***

*À ma belle-famille **Benyahia***

*À ma chère binôme et sa famille, surtout à sa mère affable, honorable et aimable*

*À tous mes amis (es).*

*Wissem*

# Dédicaces

*C'est avec un grand honneur que Je dédie ce travail :*

*À mes très chers parents **Mourad** et **Leila** : Autant de phrases aussi expressives soient-elles ne sauraient exprimer ma gratitude et ma reconnaissance. Ils ont su m'inculquer le sens de la responsabilité, de l'optimisme et de la confiance en soi face aux difficultés de la vie. Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.*

*À mes frères **Brahim** et **Adlane** : qui m'ont toujours encouragé et soutenu dans mes études.*

*À ma sœur **Hanane** : grâce à sa bonne humeur elle a su gérer mon stress et me donner de l'énergie pour avancer quotidiennement.*

*À mon grand-père, oncles, tantes et cousins/es : reconnaissante du soutien que j'ai reçu de leurs part.*

*À toute ma grande familles : **DJOUADI** et **HASSANI**.*

*À ma chère binôme **Wissem** : pour le respect, le sérieux, et l'effort fournis durant toute les périodes des préparations et présentations de nos travaux et surtout durant la préparation de ce mémoire, Merci !*

*À tous mes amis/es proches et spécialement à l'équipe "**Princesses**".*

*À la mémoire de mon oncle Mr **ALI DJOUADI** et de tout ce que j'ai perdu qui me sont si chère, paix à leurs âmes.*

*Que DIEU vous accorde santé et prospérité !*

***Fella Djouadi***

---

## *Table des matières*

---

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des acronymes

Introduction Générale.....1

### **Chapitre 1 : Techniques d'accès multiple des réseaux mobiles**

1.1 Introduction.....4

1.2 Evolution des réseaux mobiles.....4

    1.2.1 Les réseaux de première génération (1G).....4

    1.2.2 Les réseaux de seconde génération (2G).....4

    1.2.3 Les réseaux de troisième génération (3G).....5

    1.2.4 Les réseaux de quatrième génération (4G).....6

    1.2.5 Les réseaux de cinquième génération (5G).....8

        1.2.5.1 Apports attendus de la 5G.....8

        1.2.5.2 Innovations techniques de la 5G.....10

1.3 Techniques d'accès multiple.....12

    1.3.1 Accès multiple par répartition en fréquence(FDMA).....12

    1.3.2 Accès Multiple à Répartition dans le Temps (TDMA).....12

    1.3.3 Accès multiple par répartition de code (CDMA).....13

    1.3.4 Accès multiple par répartition en fréquence orthogonale (OFDMA).....15

    1.3.5 Accès multiple non orthogonal (NOMA).....19

        1.3.5.1 Domaine de puissance NOMA (PD-NOMA).....19

        1.3.5.2 Domaine de code NOMA (CD-NOMA).....20

1.4 Conclusion.....25

### **Chapitre2 : Technique d'accès multiple non orthogonal NOMA**

2.1 Introduction.....27

2.2 Concepts de la NOMA.....27

---

2.2.1 Codage de superposition SC.....	27
2.2.2 Annulation d'interférences successives SIC.....	28
2.2.3 NOMA en liaison descendante.....	28
2.2.3.1 Rapport signal sur bruit (SNR).....	29
2.2.3.2 Débit de transmission.....	30
2.2.4 NOMA en liaison montante.....	31
2.2.4.1 Rapport signal sur bruit.....	31
2.2.4.2 Débit de transmission.....	32
2.3 Efficacité spectrale et efficacité énergétique de NOMA.....	32
2.3.1 Efficacité spectrale (SE).....	32
2.3.2 Efficacité énergétique (EE).....	32
2.3.3 Compromis entre l'efficacité spectrale et l'efficacité énergétique.....	33
2.4 Avantages et inconvénients de la NOMA.....	33
2.5 Applications de NOMA.....	34
2.5.1 Coopérative NOMA (C-NOMA).....	34
2.5.2 MIMO-NOMA.....	34
2.5.3 Communication par lumière visible (VLC).....	34
2.5.4 Accès multiple défini par logiciel (SoDeMA).....	35
2.5.5 Internet des objets (IOT).....	35
2.6 Conclusion.....	35
<b>Chapitre 3 : Evaluation des performances de la NOMA</b>	
3.1 Introduction.....	37
3.2 Performances de NOMA en liaison descendante.....	37
3.2.1 Comparaison de NOMA avec OFDMA/OMA.....	38
3.2.2 Application numérique.....	38
3.2.3 Impact d'une annulation imparfaite.....	41
3.2.4 Compromis SE-EE avec NOMA.....	42

3.2.5 Estimation du BER de NOMA dans un canal AWGN.....	42
3.3 Performances de NOMA en liaison montante.....	43
3.3.1 Comparaison de NOMA avec SC-FDMA/OMA.....	45
3.3.2 Application numérique.....	45
3.4 Conclusion.....	49
Conclusion générale.....	50
Bibliographie.....	51

---

## *Liste des figures*

---

<b>Figure 1.1 :</b> <i>Scénarios d'utilisation des IMT pour 2020 et au-delà</i> .....	9
<b>Figure 1.2:</b> <i>Comparaison Antenne sectorielle 4G/Antenne MU-MIMO 5G</i> .....	11
<b>Figure 1.3 :</b> <i>Principe du Beamforming</i> .....	11
<b>Figure 1.4 :</b> <i>Schéma de partage FDMA avec bande de garde</i> .....	12
<b>Figure 1.5 :</b> <i>Principe de fonctionnement TDMA</i> .....	13
<b>Figure 1.6 :</b> <i>Technique d'accès multiple CDMA</i> .....	13
<b>Figure 1.7 :</b> <i>Effet de l'étalement de spectre</i> .....	14
<b>Figure 1.8 :</b> <i>Schéma d'un modulateur OFDM</i> .....	16
<b>Figure 1.9 :</b> <i>Spectre d'un signal OFDM composé de quatre sous-porteuses</i> .....	16
<b>Figure 1.10 :</b> <i>Le schéma d'un démodulateur OFDM</i> .....	17
<b>Figure 1.11 :</b> <i>Schéma comparatif OFDM /OFDMA</i> .....	18
<b>Figure 1.12 :</b> <i>Différence entre l'accès OMA et l'accès NOMA</i> .....	19
<b>Figure 1.13 :</b> <i>NOMA en Liaison descendante dans une cellule à deux utilisateurs</i> .....	20
<b>Figure 1.14 :</b> <i>Exemple de LDS-CDMA avec 6 utilisateurs et 4 chips</i> .....	21
<b>Figure 1.15 :</b> <i>Exemple de SCMA avec six utilisateurs</i> .....	22
<b>Figure 1.16 :</b> <i>Emetteur IDMA</i> .....	23
<b>Figure 1.17 :</b> <i>Fonctionnalités de base de MUSA</i> .....	24
<b>Figure 1.18 :</b> <i>Mappage des ressources du modèle PDMA pour 6 UE sur 4 RE</i> .....	25
<b>Figure 2.1 :</b> <i>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</i> .....	27
<b>Figure 2.2 :</b> <i>Principe de base du SIC</i> .....	28
<b>Figure 2.3 :</b> <i>NOMA en liaison descendante pour K utilisateurs</i> .....	29
<b>Figure 2.4 :</b> <i>NOMA en liaison montante pour K utilisateurs</i> .....	31
<b>Figure 3.1 :</b> <i>Comparaison simple entre NOMA et OFDMA par liaison descendante</i> .....	39

**Figure 3.2 :** Débits DL en OFDMA et NOMA avec  $\frac{|g_2|^2}{N_{0,2}} = 0 \text{ dB}$  et  $\frac{|g_1|^2}{N_{0,1}} = 20\text{dB}$ .....40

**Figure 3.3 :** Débits DL en OFDMA et NOMA avec  $\frac{|g_1|^2}{N_{0,1}} = \frac{|g_2|^2}{N_{0,2}} = 10 \text{ dB}$ .....40

**Figure 3.4 :** L'effet d'une annulation imparfaite sur les récepteurs SIC.....41

**Figure 3.5 :** Courbes de compromis EE-SE pour NOMA et OFDMA.....42

**Figure 3.6 :** Graphique BER pour NOMA dans le canal AWGN.....43

**Figure 3.7 :** NOMA en Liaison montante avec SIC à la station de base.....44

**Figure 3.8 :** Comparaison simple entre NOMA et SC-FDMA par liaison montante.....46

**Figure 3.9 :** Débits UL d'SC-FDMA et de NOMA pour :  $\frac{|g_2|^2}{N_{0,2}} = 0 \text{ dB}$  et  $\frac{|g_1|^2}{N_{0,1}} = 20\text{dB}$ .....46

**Figure 3.10 :** Débits UL d'SC-FDMA et de NOMA pour :  $\frac{|g_1|^2}{N_{0,1}} = \frac{|g_2|^2}{N_{0,2}} = 10 \text{ dB}$ .....47

**Figure 3.11 :** Débits UL d'SC-FDMA et de NOMA pour :  $\frac{|g_2|^2}{N_{0,2}} = 0 \text{ dB}$  et  $\frac{|g_1|^2}{N_{0,1}} = 20\text{dB}$ .....48

**Figure 3.12 :** Débits UL d'SC-FDMA et de NOMA pour :  $\frac{|g_1|^2}{N_{0,1}} = \frac{|g_2|^2}{N_{0,2}} = 10 \text{ dB}$ .....49

---

## *Liste des tableaux*

---

**Tableau 1.1** : *Comparaison entre les performances de la 4G et de la 5G.....10*

---

## *Liste des acronymes*

---

1G: First Generation.

2G: Second Generation.

3G: Third Generation.

3GPP: 3rd Generation Partnership Project.

4G: Fourth Generation.

5G: Fifth Generation.

6G: Sixth Generation.

### <<A>>

AMPS: Advanced Mobile Phone System.

AWGN: Additive White Gaussian Noise.

### <<B>>

BER: Bit Error Rate.

BPSK: Binary phase-shift keying.

BS: Base Station.

### <<C>>

CDMA: Code Division Multiple Access.

CD-NOMA: Code Domain Non-Orthogonal Multiple Access.

C-NOMA: Coopérative Non-Orthogonal Multiple Access.

CP: Cyclic Prefix.

CSI: Channel State Information.

CSIT: Channel State Information at the Transmitter.

### <<D>>

DC-HSDPA: Dual Carrier High-Speed Downlink Packet Access.

D-OMA: Delta-Orthogonal Multiple Access.

DS: Direct-Sequence.

DS-CDMA: Direct Sequence Code Division Multiple Access.

DSP: Densité Spectrale de Puissance.

<<E>>

EDGE: Enhanced Data Rates for GSM Evolution.

EE: Energy-Efficiency.

eMBB: Enhanced Mobile Broadband.

<<F>>

FDD: Frequency Division Duplex.

FDMA: Frequency Division Multiple Access.

FH: Frequency Hopping.

FH-CDMA: Frequency Hopping Code Division Multiple Access.

<<G>>

GMSK: Gaussian Minimum Shift Keying.

GPRS: General Packet Radio Service.

GSM: Global System for Mobile.

<<H>>

HSPA: High Speed Packet Access.

HSDPA: High Speed Downlink Packet Access.

HARQ: Hybrid Automatic Repeat Request.

HSUPA: High Speed Uplink Packet Access.

<<I>>

IAM: Interférences d'Accès Multiple.

ICI: Inter-Carrier Interference.

IDMA: Interleave Division Multiple access.

IMT-2020: International Mobile Telecommunications-2020.

IOT: Internet Of Things. ISI: Inter-Symbol Interference.

IS-95: Interim Standard 95.

IP: Internet Protocole.

<<K>>

KPI: Key performance indicators.

<<L>>

LDS: Low Density Spreading.

LDS-CDMA: Low Density Spreading-Code Division Multiple Access.

LDS-OFDM: Low Density Spreading-Orthogonal Frequency Division Multiplexing.

LTE: Long Term Evolution.

LTE-A: Long Term Evolution Advanced.

<<M>>

MAI: Multiple Access Interference.

MIMO: Multiple-Input Multiple-Output.

MISO: Multi-Input Single-Output.

mMTC: Massive Machine Communications.

MPA: Message Passing Algorithm.

MUD: Multi-User Detection.

MU-MIMO: Multi User Multi-Input Single-Output.

MUSA: Multi-User Shared Access.

<<N>>

NMT: Nordic Mobile Telephone.

NOMA: Non-Orthogonal Multiple Access.

<<O>>

OFDMA: Orthogonal Frequency-Division Multiple Access.

OFDM: Orthogonal Frequency-Division Multiplexing.

OMA: Orthogonal Multiple Access.

<<P>>

8-PSK : 8 phase-shift keying.

PAPR : Peak to Average Power Ratio.

PDC : Personal Digital Cellular.

PDMA : Pattern Division Multiple Access.

PD-NOMA : Power Domaine Non-Orthogonal Multiple Access.

PRB : Physical Resource Block.

#### <<Q>>

QAM: Quadrature amplitude modulation.

QoS: Quality of Service.

QPSK: Quadrature phase shift keying.

#### <<R>>

RB: Resource block.

RF: Radio Frequency.

RS: Rate-Splitting.

RSMA: Rate-Splitting Multiple Access.

#### <<S>>

SC: Superposition Coding.

SC-FDMA: single-carrier frequency division multiple access.

SCMA: Sparse Code Multiple Access.

SDMA: Sparse Division Multiple Access.

SE: Spectral-Efficiency.

SIC: Successive Interference Cancellation.

SMS: Short Message Service.

SNR: Signal to Noise Ration.

SoDeMA: Software Defined Multiple Access.

SU-MIMO: Single User Multiple-Input Multiple-Output.

#### <<T>>

TACS: Total Access Communication System.

TDD: Time Division Duplex.

TDMA: Time Division Multiple Access.

TH: Time Hopping.

TH-CDMA: Time Hopping Code Division Multiple Access.

TTI: Transmission Time Interval.

<<U>>

UE: User Equipment.

UHD: Ultra Haute Définition.

UIT: Union Internationale des Télécommunications.

UL: UpLink.

URLLC: Ultra-Reliable and Low-Latency Communications.

UMTS: Universal Mobile Telecommunications System.

<<V>>

VLC: Visible Light Communications.

<<W>>

W-CDMA: Wideband Code Division Multiple Access.

**D**urant les dernières décennies, les systèmes de radiocommunication ont connu une évolution continue. Des innovations technologiques ont ainsi rythmé l'apparition de générations successives de systèmes de plus en plus performants, capables de répondre aux besoins variés des utilisateurs et à leurs exigences croissantes en termes de disponibilité, de débits, de rapidité et de fiabilité des services. C'est ainsi que nous sommes passés des services voix des réseaux GSM aux communications M2M (Machine to Machine) et à l'IoT (Internet of Things) des réseaux 4G.

L'avènement actuel d'une nouvelle génération 5G vient répondre à de futures catégories d'usages impliquant pour les uns un ultra haut débit mobile, et pour d'autres une réactivité accrue du réseau et une très grande fiabilité, ou encore une densification des communications M2M et de l'IoT. Cela implique de nombreux développements techniques et technologiques à même de construire un réseau reconfigurable à la demande pour divers besoins.

Notre intérêt se rapporte au réseau d'accès pour lequel plusieurs développements ont été entrepris afin d'augmenter la capacité du réseau et de faciliter ainsi la cohabitation de nombreux utilisateurs. Traditionnellement, l'accès multiple repose sur des techniques qui permettent d'exploiter des ressources radio orthogonales soit dans un créneau horaire, une bande de fréquences ou un code spécifique pour éviter les interférences entre utilisateurs. Récemment, de nouvelles techniques ont retenu l'attention des chercheurs, notamment celles reconsidérant une non-orthogonalité entre les ressources allouées aux utilisateurs. Il s'agit des techniques d'accès multiple non-orthogonal NOMA, objet de notre travail dans ce mémoire.

Bien que l'OFDMA ait été reconduite pour le déploiement initial de la 5G, la technique d'accès NOMA est très prometteuse vu qu'elle autorise une plus haute efficacité spectrale, nécessaire pour augmenter la capacité du système et permettre une connectivité massive, un très haut débit et une faible latence. Beaucoup d'opérateurs ont influencé un déploiement du réseau d'accès NR 5G (New Radio) avant la disponibilité du réseau cœur 5GC pour une colocalisation avec les eNodeB et une intégration au réseau cœur 4G. Dans ce mode de déploiement, dit NSA (non stand-alone), la radio 5G agit comme une radio secondaire dont le seul but est de booster le débit et la capacité. Il n'empêche que pour de futurs déploiements en

mode SA (stand-alone), la technique d'accès non-orthogonal pourrait être configurée pour certaines catégories de services vu ses nombreux atouts.

L'objectif de notre travail est justement d'évaluer les performances de l'accès NOMA à travers diverses métriques. Nos investigations sont synthétisées dans le présent mémoire, structuré comme suit :

- Le premier chapitre fixe les évolutions techniques des différentes générations de réseaux mobiles et réunit une revue des diverses techniques d'accès multiple utilisées dans de tels réseaux ;
- le deuxième chapitre définit les concepts de base de la technique NOMA et leurs formulations mathématiques ;
- le dernier chapitre est réservé à l'évaluation des performances de NOMA sur la base de simulations conduites sous Matlab ;
- nous terminons par une conclusion générale suivie des perspectives.

# *Chapitre 1*

---

*Techniques d'accès multiple des  
réseaux mobiles*

---

## 1.1 Introduction

Depuis les années 1990, les systèmes radiomobiles rythment les modes de communication de tous les peuples du monde. Malgré un spectre de fréquences aux ressources limitées, les opérateurs n'ont jamais cessé d'offrir des services variés, innovants et de qualité à tous leurs abonnés. Cela n'a pu être possible que grâce à un effort soutenu de recherches et de développements ingénieux au niveau de toutes les entités des systèmes que ce soit le réseau d'accès, le réseau cœur ou le réseau de transport.

Ce chapitre est réservé à la présentation des techniques d'accès multiple utilisées dans les réseaux mobiles. Commençons d'abord par rappeler quelques aspects des différentes générations de réseaux, déployées jusqu'à présent.

## 1.2 Evolution des réseaux mobiles

### 1.2.1 Les réseaux de première génération (1G) [1]

Cette génération du début des années 1980, visait un service de téléphonie en mobilité basé sur un codage et une modulation de type analogique et la technique d'accès FDMA. La capacité des systèmes était très limitée, de l'ordre de quelques appels voix simultanés par cellule. Cette limitation et d'autres contraintes comme les tarifs élevés de communication, les coûts élevés des terminaux ainsi que leurs dimensions importantes qui limitaient leur portabilité, ont restreint l'utilisation de la 1G à un très faible nombre d'utilisateurs.

Divers réseaux ont été déployés de par le monde (AMPS aux Etats-Unis, TACS au Japon et au Royaume-Uni, Radiocom2000 en France, NMT dans les pays scandinaves). L'itinérance entre ces systèmes était impossible vu leur incompatibilité du fait de cloisonnements nationaux en vigueur à l'époque, dans le domaine des télécommunications.

L'échec de cette première génération a permis néanmoins de mettre en évidence la nécessité de définir des normes de téléphonie mobile à l'échelle internationale.

### 1.2.2 Les réseaux de seconde génération (2G) [1]

Cette génération des années 1990, a consacré le passage à la transmission numérique. Divers réseaux mobiles ont été déployés comme le GSM en Europe, le PDC et l'IS-95 aux Etats-Unis. Ces systèmes donnaient initialement accès au service voix en mobilité, mais aussi aux messages textes courts ou SMS (Short Message Service). En complément, ces systèmes

permettaient des transferts de données à faible débit. Des progrès technologiques (conception de circuits hyperfréquences et de dispositifs de traitement numérique du signal) ont permis une réduction de la taille des terminaux, autorisant une réelle mobilité. La norme GSM a rencontré le plus large succès et a été déployée sur quasiment l'ensemble du globe.

D'un point de vue technique, les systèmes 2G utilisent des codages et des modulations de type numérique. GSM et PDC sont basés sur un duplexage fréquentiel, une répartition en fréquences FDMA entre les cellules, combinée à une répartition en temps TDMA sur la cellule. L'IS-95 utilise une répartition par codes appelée CDMA.

Le succès des systèmes 2G fut et demeure considérable. Toutefois, ils présentent des limites, d'ordre capacitaire impliquant des rejets d'appels aux heures de pointe, et d'ordre fonctionnel lié à un réseau cœur à commutation de circuit par lequel l'accès aux services de données était particulièrement lent. Pour accroître les débits, le réseau d'accès fut connecté à un réseau cœur amélioré appelé GPRS (General Packet Radio Service). En complément à cette évolution, la technologie d'accès EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution) rendit possible des débits de l'ordre de 240 Kbit/s par cellule, grâce à l'amélioration des techniques d'accès au canal radio avec l'utilisation d'une nouvelle modulation, 8-PSK, au lieu de la BPSK et GMSK précédentes. Toutefois, les débits fournis par les réseaux 2G sont restés trop limités pour que la transmission de données soit fluide. Une nouvelle génération s'imposait.

### 1.2.3 Les réseaux de troisième génération (3G) [2]

Cette génération regroupe deux familles de technologies ayant connu un large succès au niveau mondial : le CDMA2000, issu de l'IS-95 et surtout l'UMTS issu des systèmes GSM et qui nous intéresse ici. Les interfaces radio de ces deux familles reposent sur des caractéristiques techniques proches, notamment le CDMA.

La norme UMTS a été élaborée par le consortium 3GPP (3rd Generation Partnership Project), dans sa première version -Release 99- à la fin des années 1990. Les innovations ont principalement trait au réseau d'accès, celui-ci s'interfaçant avec le réseau cœur GPRS. Les objectifs de l'UMTS étaient d'accroître la capacité du système pour le service voix mais surtout d'améliorer le support des services de données.

L'UMTS supporte les deux modes de duplexage FDD et TDD et utilise la modulation BPSK pour la voie montante, la modulation QPSK pour la voie descendante, et la technique d'accès W-CDMA (Wideband CDMA). Cette dernière, basée sur le CDMA, autorise la connexion simultanée à plusieurs cellules, renforçant la qualité des communications lors du changement

de cellule en mobilité. Elle est limitée à un débit maximal de 384Kbits/s dans les sens montant et descendant.

L'UMTS compte deux évolutions majeures, le HSPA (High Speed Packet Access) et le HSPA+.

Les évolutions HSPA, connues commercialement sous le nom de 3G+, sont le HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) pour la voie descendante et le HSUPA (High Speed Uplink Packet Access) pour la voie montante, définies par le 3GPP, respectivement en Release 5 (2002) et en Release 6 (2005), afin d'accroître les débits possibles et de réduire la latence du système. L'innovation principale du HSPA concerne le passage d'une commutation circuit sur l'interface radio, où des ressources radio sont réservées à chaque UE pendant la durée de l'appel, à une commutation par paquets, où la station de base décide dynamiquement du partage des ressources entre les UE actifs. La modulation et le codage sont rendus adaptatifs afin de s'adapter aux conditions radio de l'UE au moment où il est servi, les débits instantanés étant accrus via l'utilisation de modulations à plus grand nombre d'états. La modulation 16 QAM est introduite pour la voie descendante en complément de la modulation QPSK. De même, la modulation QPSK est introduite pour la voie montante en complément de BPSK. De plus, un mécanisme de retransmission rapide des paquets erronés, appelé HARQ (Hybrid Automatic Repeat reQuest) est utilisé entre l'UE et la station de base afin de réduire la latence du système en cas de perte de paquets. Ces évolutions offrent aux utilisateurs des débits maximums de 14,4 Mbit/s en voie descendante et de 5,8 Mbit/s en voie montante, ainsi qu'une latence réduite.

Le HSPA+ a été normalisé par le 3GPP au cours des Releases 7 (en 2007) et 8 (en 2008). L'amélioration des débits et de la capacité est rendue possible par l'introduction de nouvelles modulations, 64QAM en voie descendante et 16QAM en voie montante. En complément, une cellule peut transmettre des données à un utilisateur sur deux porteuses simultanément en voie descendante, grâce à la fonctionnalité DC-HSDPA (Dual Carrier HSDPA). La technique MIMO est également, introduite pour améliorer les débits en voie descendante. Le HSPA+ intègre une architecture qui réduit la latence du système via la suppression du contrôleur de stations de base pour les services de données. Ces évolutions ont ainsi permis des gains significatifs en termes de débits, de capacité et de latence.

#### **1.2.4 Les réseaux de quatrième génération (4G) [3]**

La 4G a consacré le passage à une commutation tout IP grâce à un réseau cœur basé sur le protocole IP qui n'autorise plus de mode commuté (les communications téléphoniques

utiliseront la voix sur IP en mode paquet). Ces réseaux visent le « très haut débit mobile », c'est-à-dire des transmissions de données à des débits théoriques supérieurs à 100 Mbit/s, voire supérieurs à 1 Gbit/s et une haute qualité de streaming.

Les normes 4G nommées IMT-2000, ont spécifiées deux technologies très similaires : le LTE et le WiMAX. D'un point de vue technique et économique, les grands opérateurs cellulaires ont favorisé la technologie LTE, et délaissé sa rivale.

La norme LTE a été définie dans la Release 8 du 3GPP de décembre 2008. Du point de vue technique, la transmission en LTE est basée sur une modulation multi-porteuse appelée OFDM. Cette norme apporte de nombreuses modifications et améliorations, notamment :

- L'utilisation du codage OFDMA pour la liaison descendante et du SC-FDMA pour la liaison montante (au lieu du W-CDMA en UMTS) ;
- Des performances radio et des débits améliorés par l'utilisation de la technologie multi-antennes MIMO à la fois du côté terminal et du côté eNodeB ;
- Un débit descendant théorique allant jusqu'à 300 Mbit/s en mode MIMO 4X4 ;
- Un débit montant théorique allant jusqu'à 75 Mbit/s ;
- Une efficacité spectrale trois fois plus élevée que l'HSPA ;
- Un temps de latence d'environ 15 ms (contre 70 ms à 200 ms en HSPA et UMTS) ;
- L'utilisation de codes correcteur d'erreur de type « Turbo codes » associés aux algorithmes de retransmission HARQ ;
- La possibilité d'utiliser une bande de fréquence allouée à un opérateur variant de 1,4 MHz à 20 MHz, permet une plus grande souplesse.

La véritable norme 4G est une évolution du LTE à savoir le LTE-A (ou LTE-Advanced), normalisé par la Release 10 du 3GPP à la fin de l'année 2011, avec une compatibilité ascendante au niveau des terminaux (smartphones, tablettes, clés 4G), des fréquences et des codages radio utilisés dans le réseau d'accès. Les principales nouvelles fonctionnalités sont :

- L'agrégation de porteuses ;
- L'introduction du SU-MIMO (Single-User MIMO) en voie montante ;
- L'extension du MIMO à la configuration 8x8 en voie descendante ;
- L'amélioration du MU-MIMO (Multi-User MIMO) en voie descendante ;
- et les relais.

Les bénéfices suivants sont ainsi apportés par le LTE-A :

- Des débits plus élevés sur les liens montant et descendant, grâce à l'agrégation de porteuses qui permet d'utiliser un spectre hertzien jusqu'à 100 MHz de largeur ;
- Des performances radio accrues au niveau d'une cellule pour pouvoir servir plus de terminaux, grâce, entre autres, aux évolutions de la MIMO ;
- La possibilité de déployer des relais radio annexes à coûts plus faibles pour étendre la couverture d'une cellule principale ;
- et de meilleures performances dans les zones moyennes entre cellules grâce aux techniques de micro-synchronisation.

### 1.2.5 Les réseaux de cinquième génération (5G)

L'enjeu de l'avènement d'une nouvelle norme de téléphonie mobile n'est pas de répondre aux besoins d'aujourd'hui. C'est vers les utilisations du futur qu'est orientée la 5G et pour lesquelles les réseaux 3G et 4G sont inadaptés.

Si les générations précédentes se sont inscrites dans une continuité technologique, une véritable rupture est nécessaire avec la 5G car elle ne sera plus seulement un accès mobile très performant, mais un véritable réseau d'intégration comprenant un ensemble de technologies permettant d'offrir des services adaptés et transverses, comme la télémédecine, la ville intelligente, la voiture connectée, l'accès à Internet à très haut débit pour des applications de réalité virtuelle, etc...

La 5G vise un débit accru et de très faible latence, proche de celui de la fibre optique, permettant de proposer une connectivité performante là où la fibre est absente. Une nouvelle fonctionnalité de « virtualisation du réseau » permettra d'adresser différents marchés grâce à une configuration logicielle d'une infrastructure unique afin de servir pour différents types de réseaux et services. Les opérateurs pourront ainsi offrir un réseau selon la demande, tout en souplesse.

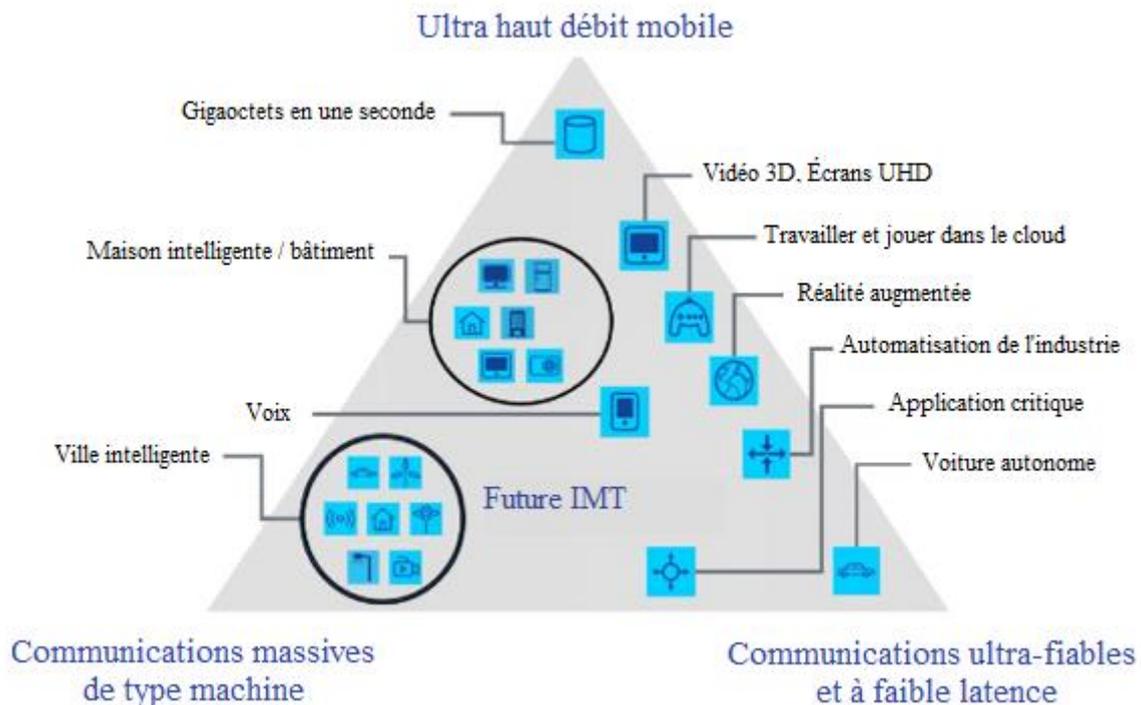
#### 1.2.5.1 Apports attendus de la 5G [4]

L'UIT a publié, en septembre 2015, le diagramme illustré à la figure 1.1 afin de définir les services qui doivent émerger de la 5G. On y voit trois grandes catégories d'usages, avec leurs exigences respectives et potentiellement incompatibles entre elles [4] :

- Communications entre une grande quantité d'objets *mMTC* (*Massive Machine Type Communications*) : cette catégorie vise une capacité à faire communiquer des objets

connectés répartis de manière très dense sur un territoire. En effet, on assiste ces dernières années à une très forte expansion des usages de l'IoT. Ces services exigent une couverture étendue, une faible consommation énergétique et des débits relativement restreints ;

- Ultra haut débit mobile *eMBB (Enhanced Mobile Broadband)* : applications et services nécessitant une connexion très rapide en outdoor et en indoor et avec une qualité de service uniforme même en bordure de cellule. Il s'agira par exemple de visionner des vidéos en UHD (8K) ou de « streamer » sans fil des applications de réalité virtuelle ou augmentée ;
- Communications ultra-fiables à très faible latence *uRLLC (Ultra-reliable and Low Latency Communications)* : applications nécessitant une réactivité très importante et une très forte garantie de transmission. Cette catégorie vise des besoins critiques comme dans les transports (temps de réaction en cas de risque d'accident, par exemple), dans la médecine (téléchirurgie), dans le contrôle industriel...



**Figure 1.1 :** Scénarios d'utilisation des IMT pour 2020 et au-delà

Afin de mettre en œuvre ces trois types d'usages, huit indicateurs de performance (KPI –Key performance indicators) ont été établis par l'UIT pour préciser, quantifier et mesurer les caractéristiques des systèmes 5G. Le tableau suivant compare la 5G par rapport à LTE-Advanced [4].

<i>Performances</i> / <i>Génération</i>	<i>4G</i>	<i>5G</i>	<i>Catégories d'usages</i>
1. Débit maximal (Gbit/s)	1	20	eMBB
2. Débit aperçu par l'utilisateur (Mbit/s)	10	100	eMBB
3. Efficacité spectrale	1x	3x	eMBB
4. Vitesse (km/h)	350	500	urLLC
5. Latence (ms)	10	1	urLLC
6. Nombre d'objets connectés sur une zone (quantité d'objets/km <sup>2</sup> )	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>	mMTC
7. Efficacité énergétique du réseau	1x	100x	mMTC
8. Débit sur une zone (Mbit/s/m <sup>2</sup> )	0.1	10	eMBB

**Tableau 1.1 :** Comparaison entre les performances de la 4G et de la 5G

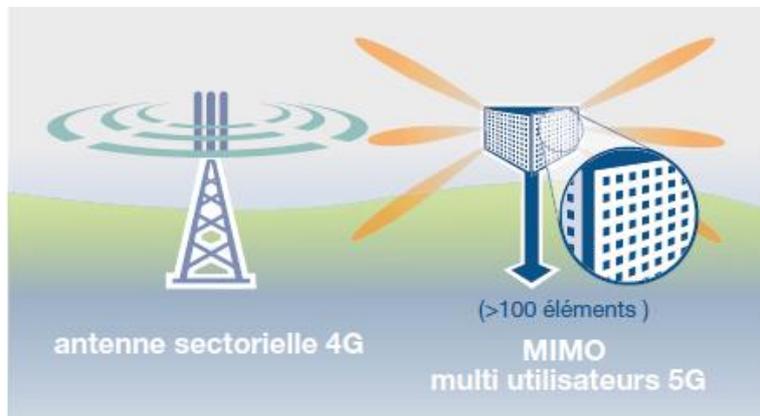
### 1.2.5.2 Innovations techniques de la 5G

Pour assurer les catégories de services relatés précédemment, la nouvelle norme 5G se base sur diverses innovations technologiques dont celles qui suivent.

- **Utilisation des bandes millimétriques [4] :** Avec la 5G, la contradiction entre les exigences de capacité et la pénurie de ressources spectrales, trouve son épilogue dans l'utilisation des ondes millimétriques (mmWave). Cela constitue l'une des technologies de rupture par rapport aux générations précédentes puisque ces ondes n'ont encore jamais été utilisées pour le déploiement des réseaux mobiles pour des raisons de maturité technologique et de qualité de propagation. Avec une bande passante énorme (28 GHz à 300 GHz), les communications à ondes millimétriques permettront d'atteindre les très hauts débits attendus avec la 5G. Les bandes pionnières sont les suivantes :
  - Fréquences moyennes ou "Coverage and Capacity Layer" dans la bande de 2 et 6GHz (e.g., 3400-3800 MHz) pour délivrer le meilleur compromis entre capacité et couverture ;
  - Fréquences hautes ou "Super Data Layer" au-dessus de 6 GHz (e.g., 24.25-29.5 GHz et 37-43.5 GHz) pour les cas d'usages spécifiques à débit très élevés ;
  - Fréquences basses ou "Coverage Layer" dans la bande sous 2 GHz (e.g. 700 MHz et 1400 MHz) fournissant une couverture très importante.
- **Densification du réseau [5] :** La faible propagation des ondes millimétriques impose une réduction de la taille des cellules. L'utilisation de femtocells (petites cellules) permettra de

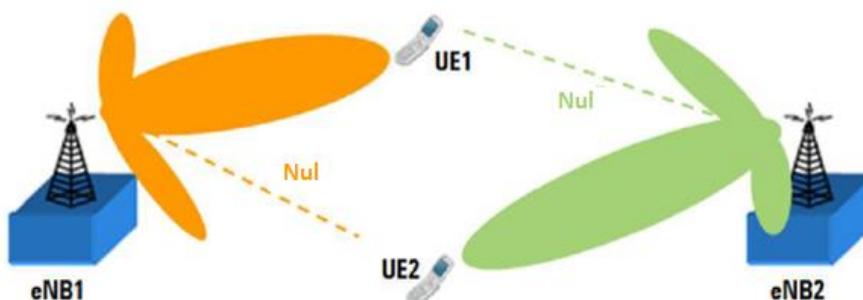
réaliser des déploiements denses de connexions qui devraient améliorer les débits, l'efficacité énergétique et une gestion plus efficace du spectre disponible.

- **Massive MIMO** : Massive MIMO (Multiple Inputs - Multiple Outputs) est une technologie qui consiste à équiper une station de base par un nombre très élevé d'antennes miniatures capables d'envoyer et de recevoir des données en même temps, et servir ainsi un nombre conséquent d'utilisateurs. La 5G exploite des systèmes Massive MIMO pour améliorer considérablement l'efficacité spectrale via un multiplexage spatial de nombreux terminaux, et augmenter l'efficacité énergétique en tirant parti des gains des grands réseaux d'antennes. La figure 1.2 nous illustre la différence de propagation entre une BS avec antenne sectorielle utilisée en 4G et une BS utilisée en 5G.



**Figure 1.2:** Comparaison Antenne sectorielle 4G/Antenne MU-MIMO 5G.

- **Beamforming** [6] : Pour optimiser l'efficacité énergétique et améliorer la couverture, des techniques de beamforming sont utilisées pour mieux focaliser l'énergie transmise par les antennes. Le principe consiste à diriger le lobe principal vers l'utilisateur cible et le lobe latéral ou le point zéro vers la direction d'interférence (cf. figure 1.3), améliorant le rapport signal / bruit (SNR) du système.



**Figure 1.3 :** Principe du Beamforming

- **Full duplex** : Les téléphones portables et les stations de base de nos jours reposent sur des émetteurs-récepteurs qui doivent à tour de rôle transmettre et recevoir des informations sur la même fréquence, ou fonctionner sur des fréquences différentes si un utilisateur souhaite transmettre et recevoir des informations simultanément. Avec la 5G, un mode full duplex donne à un émetteur-récepteur le pouvoir de transmettre et de recevoir simultanément sur les mêmes fréquences et au même endroit.

### 1.3 Techniques d'accès multiple

L'accès multiple est la façon la plus efficace de partager les ressources spectrales entre divers utilisateurs d'un système radio mobile. Ce partage doit être mis en œuvre sans créer des interférences nuisibles aux performances du système. Traditionnellement pour réaliser cette exigence, il est nécessaire que tous les signaux des différents utilisateurs soient orthogonaux.

#### 1.3.1 Accès multiple par répartition en fréquence(FDMA)

FDMA est la technique d'accès multiple la plus ancienne conçue pour les transmissions analogiques. La figure 1.4 illustre ce schéma de partage de la bande passante allouée en plusieurs canaux, chacun attribué à un seul utilisateur pour une communication en full-duplex. Cette technique est employée dans les systèmes radio-mobile 1G et 2G.

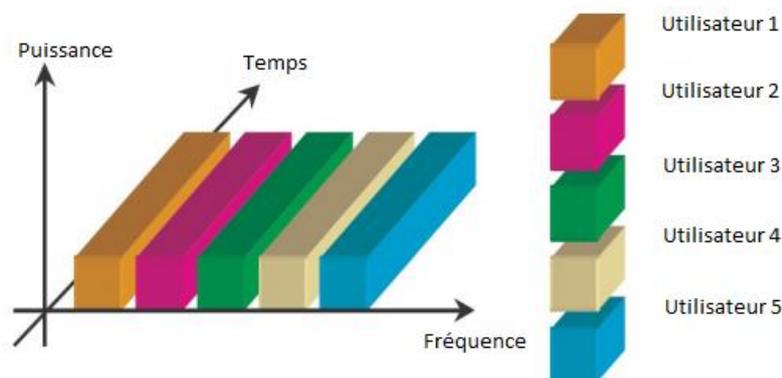
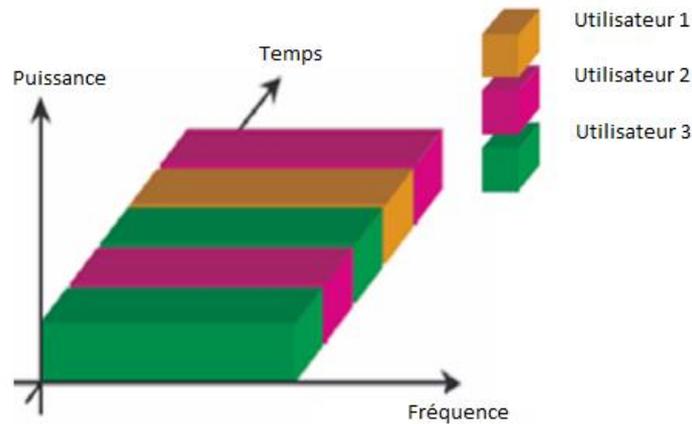


Figure 1.4 : Schéma de partage FDMA avec bande de garde

#### 1.3.2 . Accès Multiple à Répartition dans le Temps (TDMA)

Cette technique TDMA est une extension de la précédente pour permettre de partager chaque canal FDMA. Le principe, illustré sur figure 1.5, est d'octroyer la même bande de fréquence à plusieurs utilisateurs en divisant l'échelle de temps en différents intervalles de temps ou « slots » et les affecter périodiquement à chaque utilisateur.

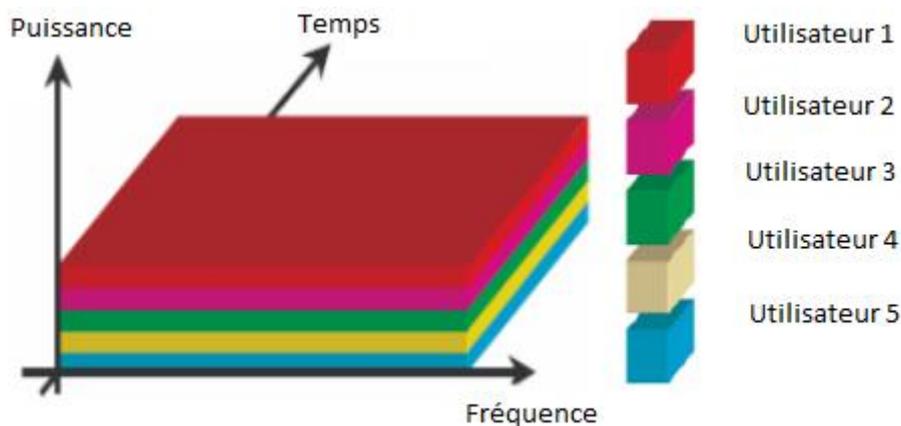


**Figure 1.5 :** *Principe de fonctionnement TDMA*

### 1.3.3 Accès multiple par répartition de code (CDMA)

L'accès multiple par répartition de code, ou CDMA est une méthode d'accès multiple basée sur des techniques d'étalement de spectre. Cette méthode est utilisée sur les réseaux 3G.

En CDMA, les utilisateurs partagent le même spectre et émettent simultanément. Dans ce cas, chaque utilisateur possède son propre code aussi appelé signature ou encore séquence de code, qui lui permet de coder ces données (figure 1.6). Cette caractéristique rend le CDMA différent des techniques d'accès décrites précédemment qui consistent à diviser une grandeur physique (la bande de passante allouée ou le temps qui s'écoule) en créneaux individuels.



**Figure 1.6 :** *Technique d'accès multiple CDMA*

Un système CDMA utilise une famille de codes orthogonaux c'est-à-dire des codes satisfassent des propriétés d'intercorrélacion et d'autocorrélacion afin de réduire les interférences d'accès multiple (IAM). Les séquences de codes sont constituées de N éléments nommés "Chips" au niveau de l'émetteur et du récepteur.

L'étalement de spectre est une des techniques avantageuses mises en avant pour l'utilisation du CDMA dans le domaine des communications RF. En effet, la puissance du signal utile est aplatie sur toute la bande de fréquence disponible. De ce fait plusieurs caractéristiques découlent :

- L'émission est noyée dans le bruit ; les applications à ce niveau sont d'ordre militaire.
- Une interférence en bande étroite verra son spectre étalé par l'opération de désétalement et sa densité spectrale de puissance (DSP) diminuée d'autant ; son influence sera alors extrêmement réduite.
- Une interférence en large bande, même de DSP supérieure au signal utile verra aussi son spectre étalé et sa DSP diminuée au niveau du récepteur, alors que le signal utile subira l'opération inverse.
- Lorsque le signal hertzien se propage sur des trajets multiples, les différents échos reçus au niveau du récepteur peuvent être vus comme une perturbation large bande, n'étant pas synchronisé avec la séquence du récepteur, ils subiront un étalement.

La figure 1.7 représente le signal reçu au niveau de l'antenne du récepteur, comprenant le signal utile, une perturbation en bande étroite et une interférence avec un autre utilisateur ; après le désétalement et la démodulation, on retrouve en bande de base le signal utile avec les signaux perturbateurs étalés par le code de récepteur.

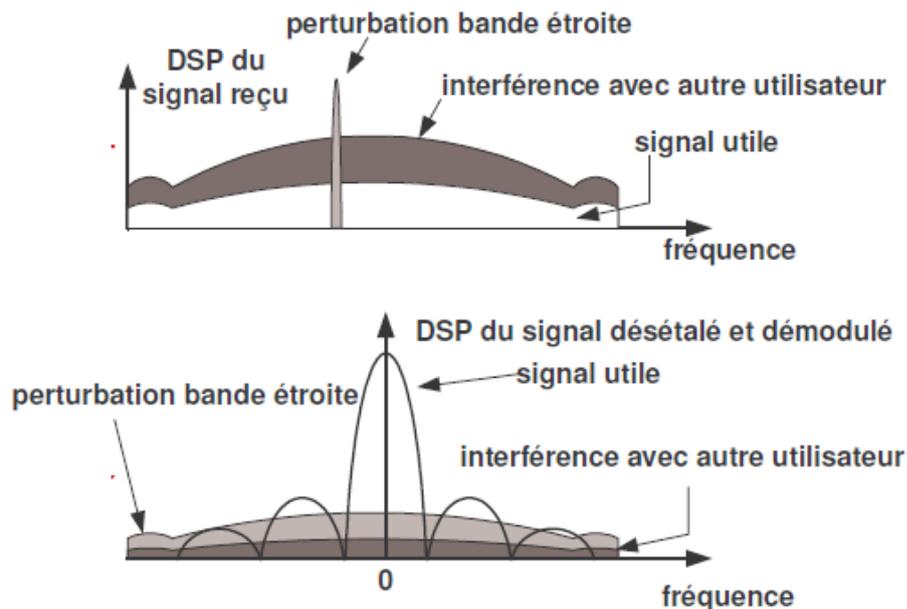


Figure 1.7 : Effet de l'étalement de spectre

Il existe trois techniques principales d'étalement de spectre pour le CDMA : séquence direct (DS), saut de fréquence (FH) et saut de temps (TH). En outre, une variété de techniques

hybrides utilisent différentes combinaisons de ces techniques de base, en plus on peut associer au CDMA l'une des méthodes d'accès précédentes (FDMA et TDMA). Dans le DS-CDMA (Direct Sequence CDMA), les données à transmettre sont directement multipliées par une séquence pseudo-aléatoire de fréquence plus élevée que la fréquence d'envoi des données. Dans le FH-CDMA (Frequency Hopping CDMA), les données sont émises sur des fréquences différentes qui changent périodiquement. Dans le TH-CDMA (Time Hopping CDMA), le signal est transmis pseudo-aléatoirement sur différents time slots.

### 1.3.4 Accès multiple par répartition en fréquence orthogonale (OFDMA)

L'OFDMA (Orthogonal Frequency division Multiple Access) est une technique d'accès en liaison descendante dans les réseaux téléphoniques mobiles de quatrième génération. Cette technique est fondée principalement sur la technologie OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

L'OFDM est une forme de modulation multi-porteuse où le flux de données à haut débit est divisé en un certain nombre de flux à faible débit qui sont transmis simultanément sur un certain nombre de sous-porteuses [7]. Afin de réduire les interférences ISI (inter-symbole), une copie de la fin du symbole OFDM est ajoutée au début de ce symbole-là, cette copie est nommé le préfixe cyclique (CP).

La procédure de modulation OFDM est faite afin d'obtenir un symbole OFDM à partir d'un nombre  $N_c$  de symboles  $(a_0^{(m)}, \dots, a_{N_c-1}^{(m)})$ , comme on peut le voir dans la figure 1.8, les symboles  $N_c$  subissent une conversion série-parallèle puis chacun d'eux sera multiplié par une sous-porteuse complexe  $(e^{j2\pi f_0 t}, \dots, e^{j2\pi f_{N_c-1} t})$ . En bande de base, un signal OFDM  $x(t)$ , en notation complexe, au cours de l'intervalle de temps  $(m T_u \leq t < (m+1) T_u)$  peut donc être exprimée par [8] :

$$x(t) = \sum_{k=0}^{N_c-1} x_k(t) = \sum_{k=0}^{N_c-1} a_k^{(m)} e^{j2\pi \Delta f t} \quad (1.1)$$

Où :

$x_k(t)$  est la  $k^{\text{ième}}$  sous-porteuse modulée avec la fréquence  $f_k = k \times \Delta f$  ;

$\Delta f = 1/T_u$  est l'espacement de sous-porteuses ;

$T_u$  est le temps de modulation d'un symbole par sous-porteuse ;

et  $a_k$  est le symbole de modulation, complexe en général, appliquée à la sous-porteuse  $k^{\text{ième}}$  durant l'intervalle  $m$  du symbole OFDM  $(m T_u \leq t < (m+1) T_u)$  .

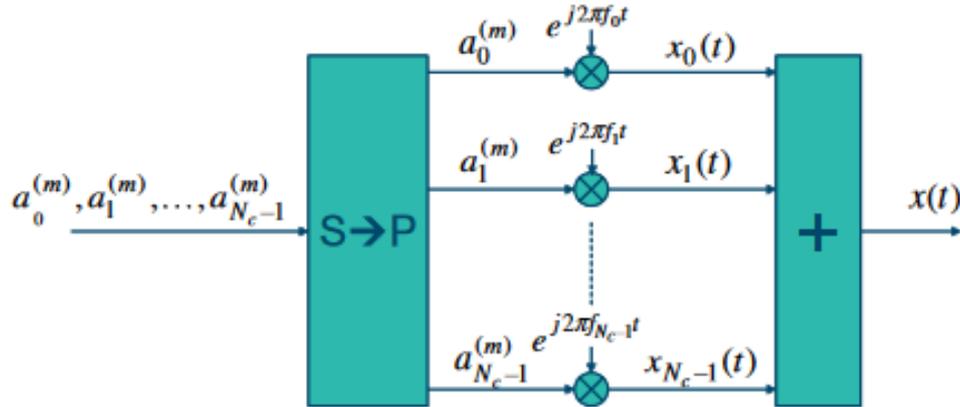


Figure 1.8 : Schéma d'un modulateur OFDM

Les sous-porteuses utilisées lors de la modulation d'un symbole OFDM doivent être mutuellement orthogonales. Par ce fait elles peuvent être placées très proches les unes des autres sans interférences mutuelles. Pour une paire de sous-porteuses  $f_1$  et  $f_2$ , le critère d'orthogonalité est exprimé par l'équation suivante :

$$\int_{mT_u}^{(m+1)T_u} e^{-j2\pi f_1 t} e^{j2\pi f_2 t} dt = 0, \text{ quand } f_1 \neq f_2 \quad (1.2)$$

Où :  $mT_u \leq t < (m+1)T_u$  est la durée d'un symbole OFDM, et  $m$  un nombre entier quelconque.

On peut voir dans la figure ci-dessous, quatre sous-porteuses séparées de  $\Delta f$  et arrangées, sur la durée d'un symbole OFDM, d'une manière à ce que le passage par zéro d'une sous-porteuse coïncide avec les pics de toutes les autres sous-porteuses.

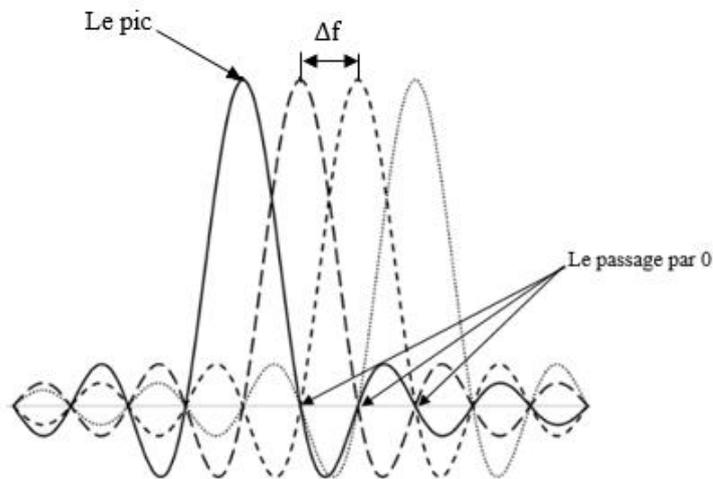


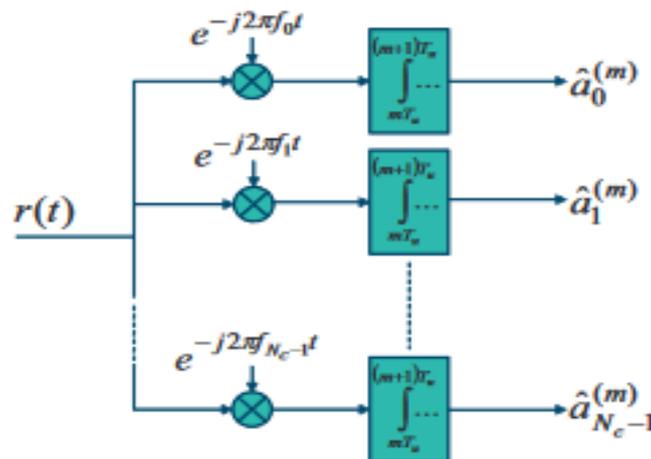
Figure 1.9 : Spectre d'un signal OFDM composé de quatre sous-porteuses

La procédure de démodulation OFDM nous permet de retrouver les symboles transmis comme illustré par étapes sur la figure 1.10. Ainsi on aura :

$$\begin{aligned}
 Y(k) &= \frac{1}{T_u} \int_0^{T_u} r(t) e^{-j2\pi k \Delta f t} dt = \frac{1}{T_u} \int_0^{T_u} \sum_{p=0}^{N_c-1} a_p e^{j2\pi p \Delta f t} e^{-j2\pi k \Delta f t} dt \\
 &= \sum_{p=0}^{N_c-1} \frac{a_p}{T_u} \int_0^{T_u} e^{j2\pi(p-k) \Delta f t} dt
 \end{aligned} \tag{1.3}$$

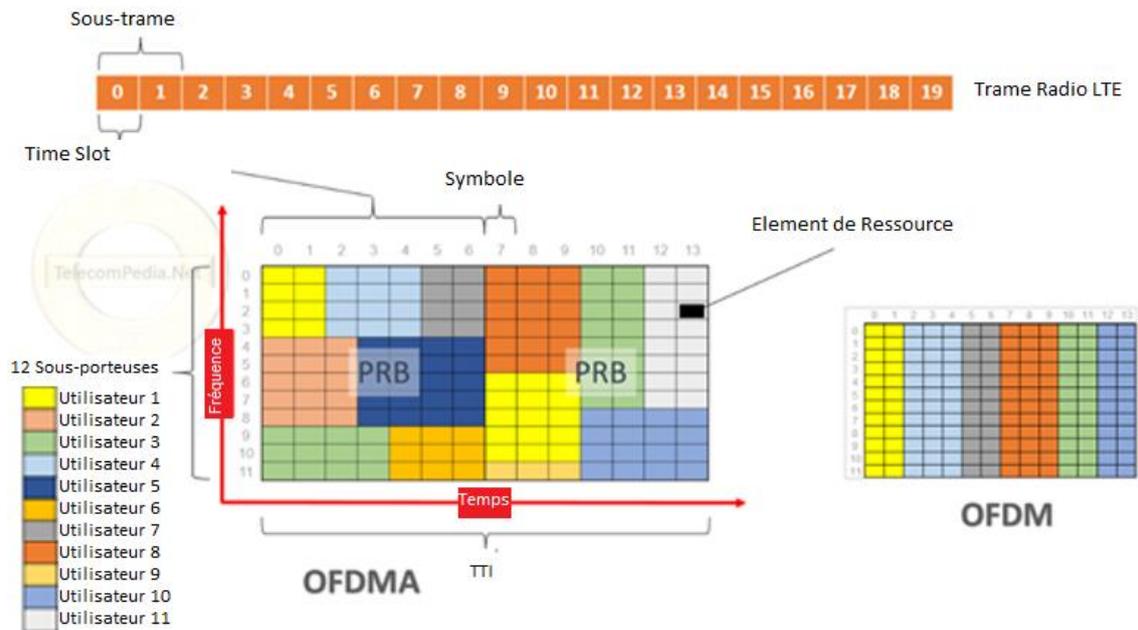
Ce qui donne :

$$Y(x) = \begin{cases} a_p & k = p \\ 0 & k \neq p \end{cases} \tag{1.4}$$



**Figure 1.10 :** Le schéma d'un démodulateur OFDM

La figure suivante illustre le fait que l'OFDMA dérive de l'OFDM. L'OFDM peut servir un utilisateur pendant un intervalle de temps bien défini, tandis que l'OFDMA peut servir plusieurs utilisateurs à la fois pendant ce même intervalle de temps. Dans les réseaux LTE utilisant la technique OFDMA, le temps de transmission est divisé en trames d'une longueur de 10 millisecondes (ms). Chaque trame est divisée en 10 sous-trames de 1ms, chacune correspondant à un intervalle de temps de transmission (TTI), formé de deux intervalles de temps égaux de 0,5 ms. La plus petite unité de ressources adoptée dans le LTE est un bloc de ressources (RB) de douze sous-porteuses et chaque tranche de temps est constituée de six ou sept symboles de multiplexage par répartition orthogonale en fréquence (OFDM) où les utilisateurs occupent un nombre bien précis de sous porteuse pour un times slot, chaque symbole on le nomme élément de ressource.



**Figure 1.11 : Schéma comparatif OFDM /OFDMA**

L'OFDMA offrent divers avantages dont on peut citer :

- Une meilleure gestion du spectre du fait de l'orthogonalité quasi-totale des sous-porteuses, autorisant une fine séparation entre-elles ;
- Une grande diversité de fréquences en répartissant les sous-porteuses sur tout le spectre disponible ;
- Les intervalles de garde limitent les interférences inter-symboles dues au multi-trajets.
- Des débits de données élevés.

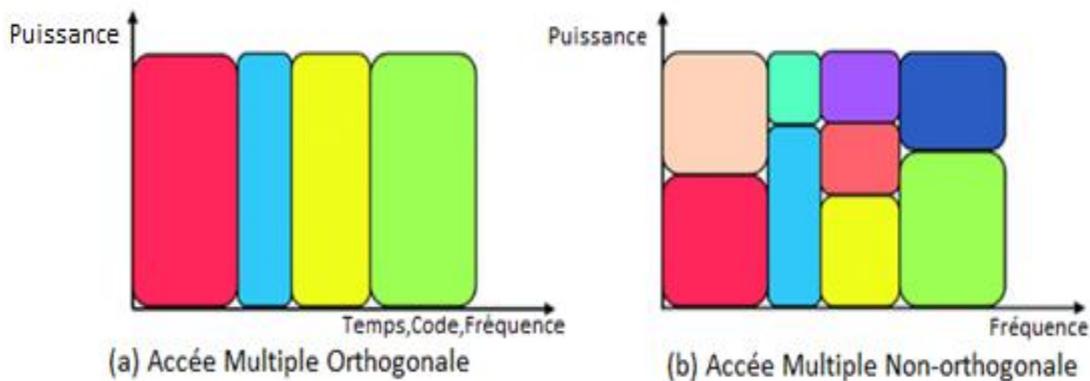
Parmi ses inconvénients, on peut citer :

- Le problème de PAPR (peak to average power ratio) qui représente le rapport entre la valeur maximale de la puissance électrique transmise et la puissance moyenne transmise, et qui se présente sous forme d'une fluctuation importante de l'enveloppe du signal OFDM ;
- Grande sensibilité aux décalages de fréquence qui causent des interférences inter-porteuses (Inter Carrier Interférences ICI), responsables d'une forte dégradation des performances du réseau ;
- Grande sensibilité au bruit de phase (le bruit de modulation de fréquence).

### 1.3.5 Accès multiple non orthogonal (NOMA)

L'accès multiple non orthogonal (NOMA) est une technique plus robuste que l'OFDMA et qui a été projetée comme l'une des technologies clés potentielles dans la transmission sans fil par le groupe de promotion IMT-2020 pour les réseaux 5G [9].

Le principe de l'accès NOMA se résume à servir plusieurs utilisateurs au sein de la même ressource (temps, fréquence, espace ou code). Ces utilisateurs sont multiplexés dans le domaine de puissance et/ou dans le domaine de code. A la réception des algorithmes de détection multi-utilisateurs (MUD) sont utilisés afin de les séparer, tels que l'annulation d'interférence successive (SIC).



**Figure 1.12 :** *Différence entre l'accès OMA et l'accès NOMA*

Il existe deux principaux schémas NOMA : NOMA dans le domaine de puissance et NOMA dans le domaine de code.

#### 1.3.5.1 Domaine de puissance NOMA (PD-NOMA)

Le multiplexage de domaine de puissance signifie que différents utilisateurs se voient attribuer différents niveaux de puissance en fonction des conditions de leur canal pour obtenir le gain maximal de performances du système [10].

Pour expliquer le principe de NOMA via le multiplexage de domaine de puissance, nous choisissons le cas, illustré par la figure 1.13, de deux utilisateurs desservis par la BS de leur cellule. Cette BS transmet un signal superposé aux deux utilisateurs simultanément. Le signal envoyé à l'UE éloigné se voit alloué plus de puissance, tandis que le signal envoyé à l'UE proche se voit alloué moins de puissance. Le récepteur de l'UE proche decode d'abord le signal de l'UE éloigné car c'est le plus puissant puis le soustrait du signal composite via par la technique d'annulation d'interférence successive (SIC) pour ne garder que son propre signal. Lorsque le signal composite atteint l'UE éloigné, le signal qui était destiné à l'UE proche

devient presque nul c'est à dire sa puissance, déjà faible, devient insignifiante à cause des pertes de trajet. Donc l'UE éloigné décode directement le signal composite comme si c'était son propre signal en considérant le signal de l'UE proche comme du bruit.

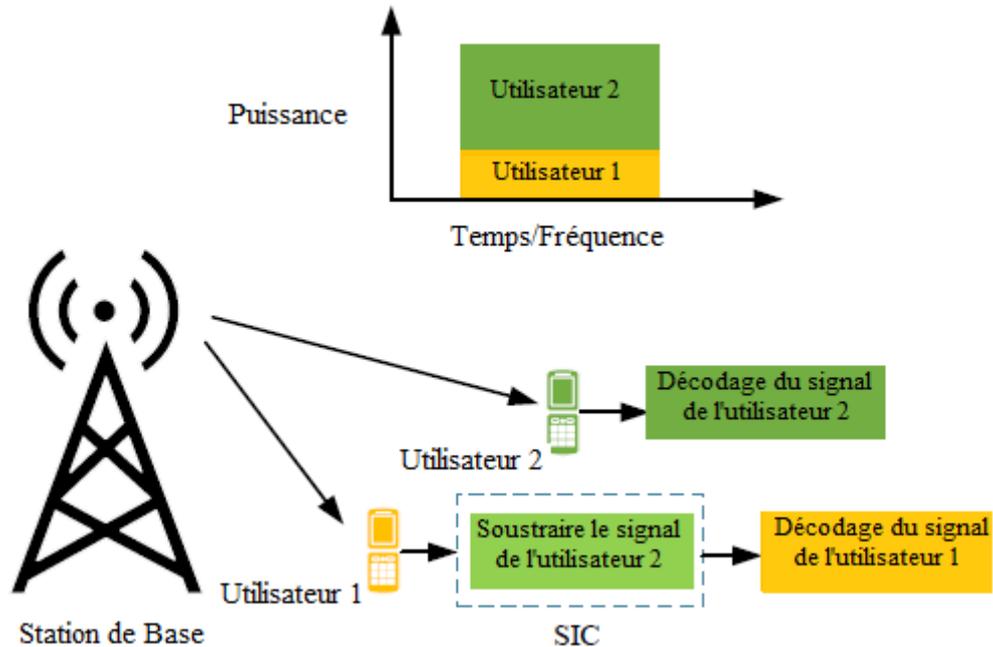


Figure 1.13 : Liaison descendante NOMA dans une cellule à deux utilisateurs

### 1.3.5.2 Domaine de code NOMA (CD-NOMA)

Contrairement au domaine de puissance NOMA, le domaine de code NOMA réalise le multiplexage dans le domaine de code. Cette notion dérive des systèmes CDMA classiques, dans lesquels plusieurs utilisateurs partagent les mêmes ressources temps-fréquence, en utilisant des séquences d'étalement orthogonales. La différence ici est que les séquences d'étalement utilisées, sont limitées à des séquences clairsemées (ou séquences de faible densité) ou à des séquences de faible corrélation croisée non orthogonales [11].

Le schéma NOMA dans le domaine de code offre de nombreuses solutions d'accès, dont on citera les suivantes.

- **CDMA à faible densité d'étalement (LDS-CDMA)** : cette technique utilise des séquences d'étalement à faible densité pour étaler les symboles des utilisateurs. L'objectif principal de ce nouveau type de CDMA est de réduire les interférences sur chaque chip.

Au niveau du récepteur, un algorithme de passage de message (MPA) est utilisé pour réaliser la détection multi-utilisateur (MUD). MPA est très efficace pour le graphe factoriel, qui est un graphe bipartite comprenant des nœuds variables et des nœuds

facteurs [12]. L'exemple illustré par la figure 1.14, est un schéma LDS-CDMA avec six utilisateurs ( $K=6$ ) et un facteur d'étalement  $N=4$ . Le symbole transmis  $x_k$  de l'utilisateur  $k$  est généré en mappant une séquence de bits d'informations indépendantes à un alphabet de constellation. Ensuite, le symbole transmis  $x_k$  est modulé sur une séquence d'étalement  $S_k$  qui est unique pour chaque utilisateur, puis tous les symboles sont combinés et transmis. À la réception, les messages sont transmis entre les nœuds variables et les nœuds de facteur via l'arête.

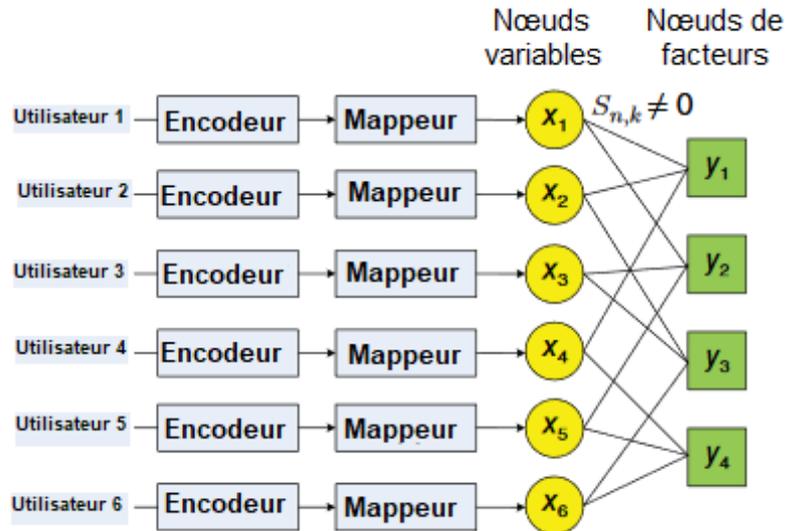


Figure 1.14 : Exemple de LDS-CDMA avec 6 utilisateurs et 4 chips

- **OFDM à faible densité d'étalement (LDS-OFDM)** : Ce multiplexage orthogonal par répartition en fréquence LDS peut être considéré comme une version combinée de LDS-CDMA et OFDM. Les symboles sont d'abord mappés à certaines séquences LDS, puis transmis sur différentes sous-porteuses OFDM. Le nombre de symboles peut être supérieur au nombre de sous-porteuses, c'est-à-dire que la surcharge est autorisée pour améliorer l'efficacité spectrale [13].
- **Accès multiple à code clairsemé (SCMA)** : cette solution est proposée comme une conception de livre de codes de constellation multidimensionnelle basée sur la technique d'étalement non orthogonal, qui peut être surchargée pour permettre une connectivité massive et prendre en charge un accès gratuit. SCMA mappe directement les flux binaires à différents mots de code clairsemés, et différents mots de code pour tous les utilisateurs sont multiplexés sur des ressources orthogonales partagées, par exemple, des sous-porteuses OFDM. Au niveau du récepteur, un algorithme de passage de messages (MPA) de faible complexité est utilisé pour détecter les données des utilisateurs [14].

La figure 1.15 illustre un exemple de SCMA avec six utilisateurs, où chaque utilisateur a son propre livre de codes. Dans un livre de codes, tous les mots de codes contiennent des zéros dans les deux mêmes dimensions, et les positions des zéros dans différents livres de codes sont distinctes pour éviter le chevauchement de deux utilisateurs. Pour chaque utilisateur, les bits sont mappés sur un mot de code complexe. Ensuite, les mots de codes pour tous les utilisateurs sont multiplexés sur quatre ressources orthogonales partagées, telles que les sous-porteuses OFDM.

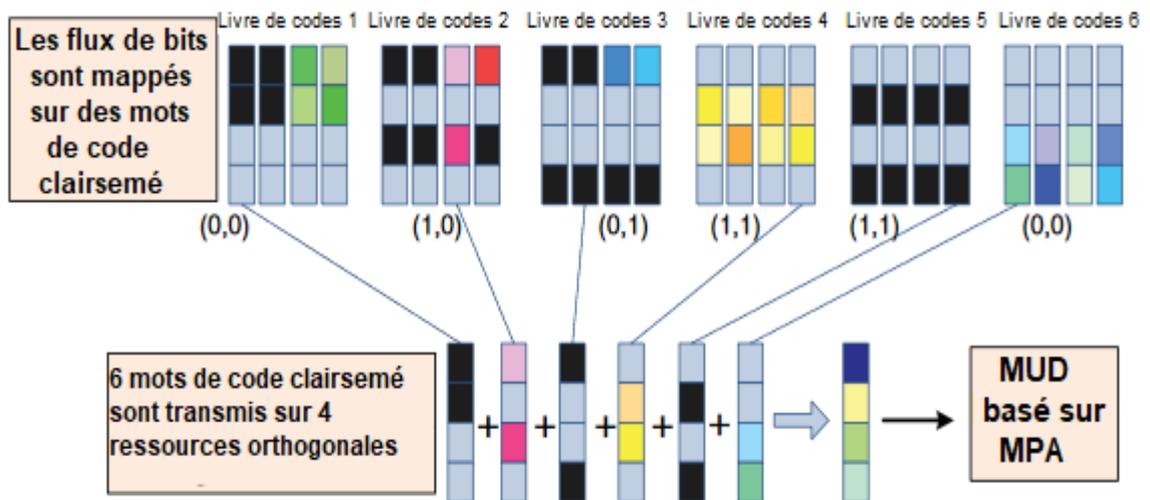


Figure 1.15 : Exemple de SCMA avec six utilisateurs

- **Accès multiple par division entrelacée (IDMA) :** cette solution est considérée comme un cas particulier de la technique d'accès multiple CDMA traditionnelle. Sa principale caractéristique est l'utilisation d'entrelaceurs pour séparer les signaux sur l'ensemble du spectre de la bande passante. Le code d'étalement est commun à tous les utilisateurs et un entrelaceur différent est utilisé par chaque utilisateur. Ce système utilise un récepteur basé sur le principe de la turbo-détection, qui permet d'éliminer itérativement les interférences MAI en associant à la détection un codage de canal et un entrelacement. Grâce aux entrelaceurs et le traitement itératif effectué au niveau du récepteur, le système IDMA peut contrôler les interférences d'accès multiple ainsi que les interférences intersymboles. Le modèle d'émetteur descriptif d'IDMA est présenté sur la figure 1.16.

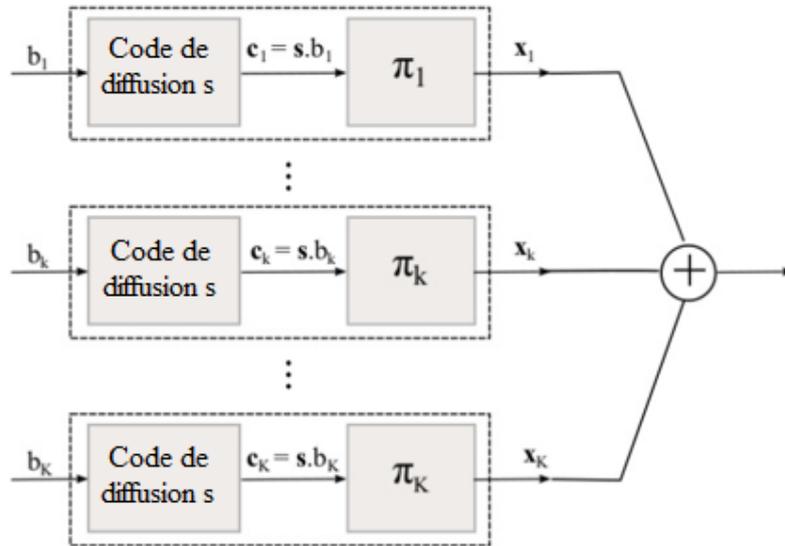


Figure 1.16 : *Emetteur IDMA*

- **Accès multiple à répartition de débit (RSMA) :** Le RSMA (Rate-Splitting Multiple Access) est un schéma d'accès multiple basé sur le concept de Rate-Splitting (RS) et de précodage linéaire pour les communications multi-utilisateurs multi-antennes. Il divise les messages des utilisateurs en parties communes et privées, et encode les parties communes en un ou plusieurs flux communs tout en codant les parties privées en flux séparés. Les flux sont précodés à l'aide des informations d'état de canal disponibles (parfaites ou imparfaites) au niveau de l'émetteur (CSIT), superposées et transmises via le canal MIMO ou MISO [15,16]. Les récepteurs décodent ensuite le(s) flux commun(s), effectuent des annulations successives d'interférences (SIC) puis décodent leurs flux privés respectifs. Chaque récepteur reconstruit son message d'origine à partir de la partie de son message intégrée dans le ou les flux communs et son flux privé prévu [16].

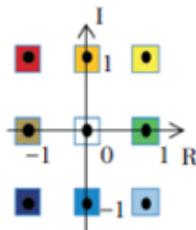
Le principal avantage de RSMA est de gérer les interférences de manière flexible en permettant aux interférences d'être partiellement décodées et partiellement traitées comme du bruit. Il a été démontré que RSMA relie et surpasse les schémas d'accès multiples existants, à savoir, l'accès multiple par division spatiale (SDMA), l'accès multiple non orthogonal (NOMA), l'accès multiple orthogonal (OMA) et la multidiffusion. Ainsi, RSMA est une technologie prometteuse pour la 5G et au-delà [16-20].

- **Accès partagé multi-utilisateurs (MUSA) :** L'intérêt de MUSA est la transmission non orthogonale et l'accès gratuit. Les symboles de données modulés de chaque utilisateur

sont répartis par une séquence d'étalement complexe qui doit être d'une courte durée, d'une faible corrélation croisée et de codage M-aires, dans le but de prendre en charge un grand nombre d'utilisateurs avec accès gratuit et minimiser l'impact de la collision des utilisateurs. La séquence d'étalement est spécialement conçue pour faciliter un SIC simple au niveau du signal superposé du côté du récepteur pour séparer les données des différents utilisateurs. De plus, chaque utilisateur peut choisir sa séquence d'étalement de manière autonome, éliminant ainsi le besoin de coordination des ressources par station de base. Grâce à ces deux atouts MUSA peut prendre en charge un grand nombre de connexions tout en minimisant les frais généraux de signalisation et la consommation d'énergie en même temps.

Comme illustré sur la figure 1.17, douze utilisateurs peuvent transmettre des données sur les mêmes ressources en utilisant des codes d'étalement complexes non orthogonaux sélectionnés de manière aléatoire et de courte longueur qui est de quatre dans notre cas. Ce qui fait que douze utilisateurs partagent chacun quatre blocs de ressources.

Les éléments de code d'étalement :



L'ensemble de codes d'étalement complexe :



Chaque utilisateur choisit au hasard un code à diffuser :

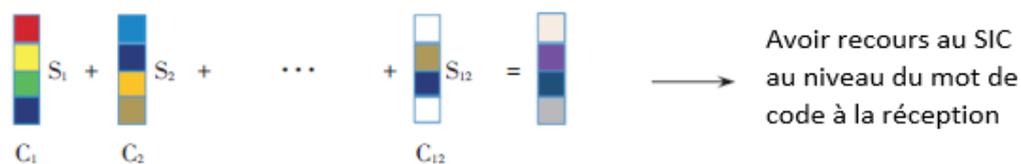
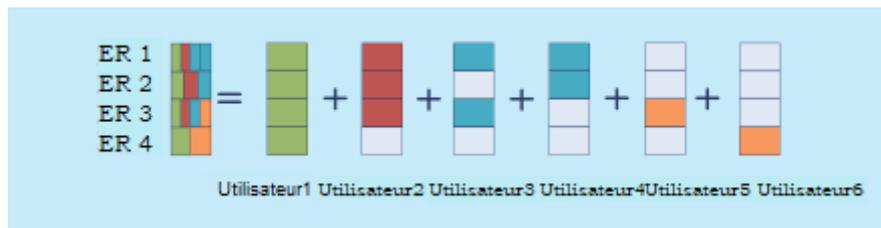


Figure 1.17 : Fonctionnalités de base de MUSA

- **Accès multiple par division de motifs (PDMA) :** Les motifs non orthogonaux sont conçus dans PDMA de telle sorte que la diversité est maximisée et le chevauchement de plusieurs utilisateurs est minimisé, ces motifs sont attribués à différents utilisateurs pour

effectuer le multiplexage dans le domaine du code, de la puissance et de l'espace ou leurs combinaisons, ce qui permet une grande flexibilité pour le codage et le décodage [14].

La matrice de motifs PDMA pour six UE multiplexés sur quatre RE (l'élément de ressource) est représentée sur la figure 1.18, où le motif PDMA définit la règle de mappage des données à la ressource radio et la matrice de motifs PDMA regroupe tous les motifs PDMA partagés des UE. Les données de l'UE1 sont mappées sur les quatre RE du groupe, et les données de l'UE2 sont mappées sur les trois premières RE, etc.



**Figure 1.18 :** Mappage des ressources du modèle PDMA pour 6 UE sur 4 RE

## 1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques traits de l'évolution continue des réseaux de téléphonie mobiles ainsi qu'une revue des différentes techniques d'accès multiple (FDMA, TDMA, CDMA, OFDMA et NOMA) utilisées par les diverses générations.

# *Chapitre 2*

---

*Technique d'accès multiple non  
orthogonal NOMA*

---

## 2.1 Introduction

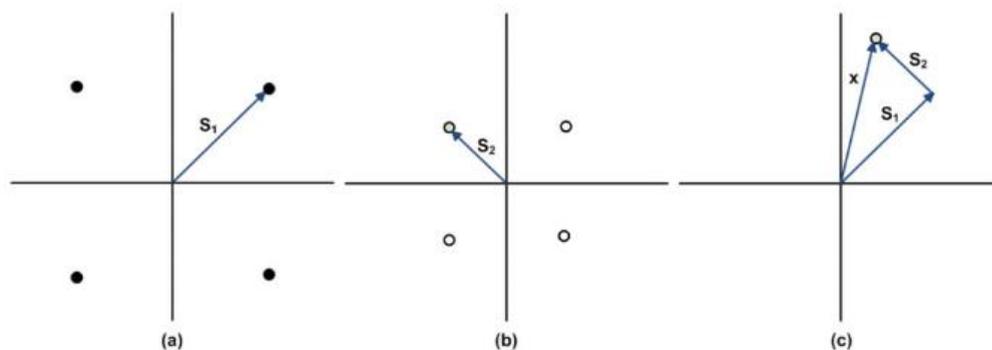
Ce chapitre est consacré à la formulation mathématique de la méthode d'accès NOMA tout en présentant ses concepts fondamentaux, ses avantages et inconvénients ainsi que ses applications. Nous introduirons de plus les métriques d'efficacité spectrale et d'efficacité énergétique des réseaux utilisant cette technique.

## 2.2 Concepts de la NOMA

Nous introduisons d'abord deux technologies clés de NOMA, le codage de superposition (SC) au niveau de l'émetteur et l'annulation des interférences au niveau du récepteur. Ensuite les principes de base du système NOMA à savoir la NOMA en liaison descendante (Downlink) et la NOMA en liaison montante (Uplink) sont abordés.

### 2.2.1 Codage de superposition SC

Le codage de superposition est une technique de communication qui permet à un émetteur de transmettre les données de plusieurs utilisateurs simultanément. 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 (le plus éloigné de la BS) avec une mauvaise qualité de canal. Afin de montrer comment SC est exécuté, un diagramme schématique est donné à la figure 2.1, 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 2.1 :** 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

### 2.2.2 Annulation d'interférences successives SIC

Dans cette technique divers signaux d'utilisateurs sont séparés successivement afin d'obtenir le signal voulu, appartenant à un utilisateur précis.

Le principe de base de l'annulation SIC est présenté dans la figure 2.2. Avant tout, les utilisateurs sont observés en fonction de leurs qualités de canal, de sorte que le premier utilisateur sera celui qui a une bonne qualité de canal (proche de la BS) et le dernier sera celui avec une qualité de canal médiocre (éloigné de la BS). Le principe SIC est de décoder en premier le signal de l'utilisateur fort (proche de la BS) tandis que les autres signaux sont considérés comme des interférences, puis il va le recoder et le soustraire du signal superposé. La même opération est répétée jusqu'à ce qu'il arrive à décoder le signal qu'il veut avoir.

Le SIC a pour but d'améliorer la capacité du système et le gain de performances, néanmoins la propagation des erreurs dans cette procédure, appelée SIC imparfait, peut entraîner une perte de performances réelle. Pour y remédier, le nombre d'utilisateurs doit être diminué.

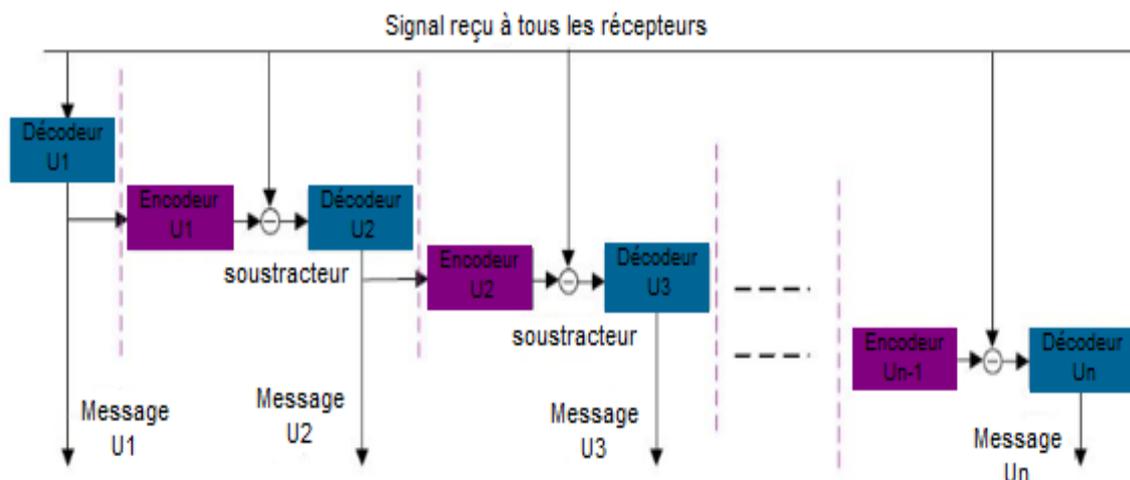


Figure 2.2 : Principe de base du SIC

### 2.2.3 NOMA en liaison descendante

Dans la liaison descendante du réseau NOMA, la station de base (BS) qui représente le côté émetteur transmet le signal combiné, qui est une superposition des signaux appartenant à plusieurs utilisateurs avec différents coefficients de puissance. Une fois le signal arrive au récepteur de chacun des utilisateurs, le SIC rentre en jeu et s'exécute successivement comme illustré dans la figure 2.3, jusqu'à ce que le signal propre à l'utilisateur soit récupéré.

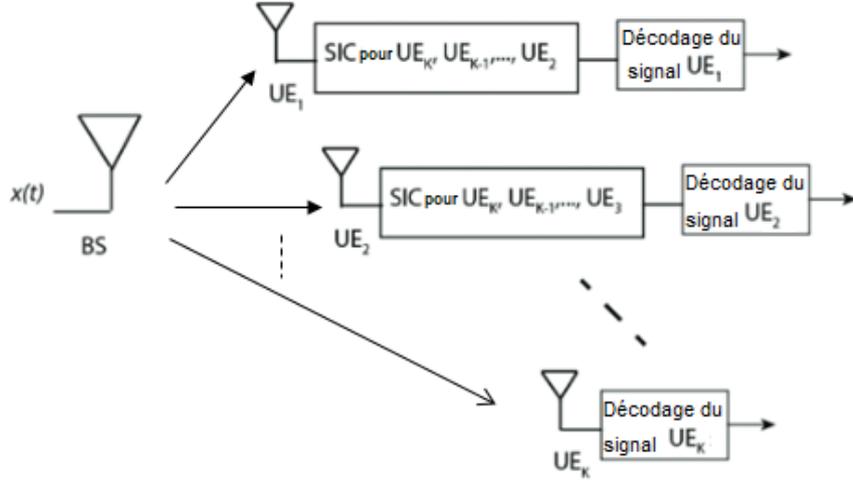


Figure 2.3 : NOMA en liaison descendante pour K utilisateurs

Le signal transmis par la BS peut être écrit comme suit :

$$x(t) = \sum_{k=1}^K \sqrt{\alpha_k P_T} x_k(t) \quad (2.1)$$

Où  $x_k(t)$  est l'information de l'utilisateur  $k$ ,  $\alpha_k$  est le coefficient de puissance alloué pour l' $UE_k$ , et  $P_T$  est la puissance d'émission à la BS. La puissance d'émission de chaque  $UE_k$  est donnée par  $P_k = \alpha_k P_T$ .

Le signal reçu au niveau de l' $UE_k$ , a pour expression :

$$y_k(t) = x(t)g_k + w_k(t) \quad (2.2)$$

Où  $g_k$  désigne le coefficient de canal complexe entre la BS et l' $UE_k$ , et le terme  $w_k(t)$  désigne le bruit gaussien blanc additif au niveau de l' $UE_k$  avec une moyenne de zéro et une densité spectrale de puissance  $N_0$  (W/Hz).

### 2.2.3.1 Rapport signal sur bruit (SNR)

Pour l' $UE_K$ , qui est l'utilisateur le plus éloigné de la BS, le signal qu'il décode en premier sera son propre signal car c'est le plus puissant par rapport aux autres. Le reste des signaux seront traités comme des interférences. Par conséquent, la relation du rapport signal sur bruit pour l' $UE_K$  peut-être écrite sous cette forme [21] :

$$SNR_K = \frac{P_K |g_K|^2}{N_0 W + \sum_{i=1}^{K-1} P_i |g_K|^2} \quad (2.3)$$

$W$  étant la bande passante de transmission. Par contre chez l'utilisateur le plus proche de la BS l' $UE_1$ , le dernier signal qu'il décode sera son propre signal. En supposant une annulation

d'interférences successive complète, le SNR pour l'UE<sub>1</sub> peut être calculé par l'équation suivante :

$$SNR_1 = \frac{P_1 |g_1|^2}{N_0 W} \quad (2.4)$$

Le rapport signal sur bruit pour tout utilisateur  $k$  est généralement exprimé comme suit :

$$SNR_k = \frac{P_k |g_k|^2}{N_0 W + \sum_{i=1}^{k-1} P_i |g_k|^2} \quad (2.5)$$

Ce qui précède suppose que les interférences peuvent être complètement annulées dans le récepteur SIC, mais il est extrêmement difficile de soustraire le signal détecté du signal reçu sans aucune erreur. Dans cette partie, nous reconsidérons le concept de NOMA avec une erreur d'annulation dans le récepteur SIC. Nous rappelons que le récepteur SIC décode les signaux des utilisateurs selon l'ordre décroissant de leur puissance afin d'obtenir le signal souhaité. Après chaque itération SIC, le signal décodé est recodé pour le soustraire du signal composite reçu. En théorie, ce processus peut être réalisé sans aucune erreur, mais en pratique, certaines erreurs sont attendues. En liaison descendante, le SNR pour l'utilisateur  $k$  avec une erreur d'annulation s'écrit comme suit [22] :

$$SNR_k = \frac{P_k |g_k|^2}{N_0 W + \sum_{i=1}^{k-1} P_i |g_k|^2 + \varepsilon \sum_{i=k+1}^K P_i |g_k|^2} \quad (2.6)$$

Où  $\varepsilon$  est le paramètre qui exprime l'erreur de l'annulation successive des interférences.

### 2.2.3.2 Débit de transmission

Le débit de transmission (en bps) pour tout utilisateur  $k$  dans un système NOMA est défini par la relation suivante :

$$D_k = W \log_2 \left( 1 + \frac{P_k |g_k|^2}{N_0 W + \sum_{i=1}^{k-1} P_i |g_k|^2} \right) \quad (2.7)$$

La bande passante et la puissance sont partagées en OFDMA de manière équitable, donc le débit de transmission est réécrit comme suit :

$$D_k = W_k \log_2 \left( 1 + \frac{P_k |g_k|^2}{N_k} \right) \quad (2.8)$$

Où  $W_k = \frac{W}{K}$  et  $N_k = N_0 W_k$ .

La relation de la capacité totale s'écrit comme suit :

$$D_T = \sum_{k=1}^K D_k \quad (2.9)$$

### 2.2.4 NOMA en liaison montante

Dans la liaison montante, comme illustré sur la figure 2.4, chaque utilisateur transmet son signal à la BS. Au niveau de la BS, des itérations SIC sont effectuées afin de séparer les signaux des utilisateurs.

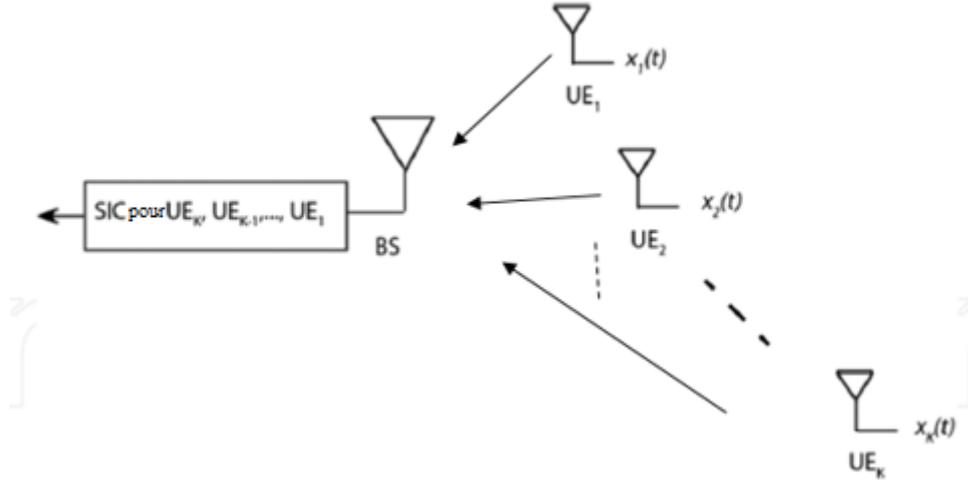


Figure 2.4 : NOMA en liaison montante pour K utilisateurs

Le signal reçu à la BS comprend ici tous les signaux des utilisateurs et s'écrit comme suit :

$$y(t) = \sum_{k=1}^K x_k(t)g_k + w(t) \quad (2.10)$$

Où  $g_k$  désigne le coefficient de canal entre la BS et l' $UE_k$ ,  $x_k(t)$  l'information de l'utilisateur  $k$ , et  $w(t)$  le bruit AWGN à la BS avec une moyenne zéro et une densité spectrale de puissance  $N_0$ (W/Hz).

#### 2.2.4.1 Rapport signal sur bruit

Le premier signal à détecter provient de l'utilisateur le plus proche de la BS ( $UE_1$ ), son rapport signal sur bruit sera donc :

$$SNR_1 = \frac{P_k |g_1|^2}{N + \sum_{i=2}^K P |g_i|^2} \quad (2.11)$$

Où  $P$  est la puissance d'émission des UEs et  $N = N_0 W$ .

Le dernier signal à détecter provient de l'utilisateur le plus éloigné de la BS ( $UE_K$ ), le rapport signal sur bruit sera donc :

$$SNR_K = \frac{P_k |g_K|^2}{N} \quad (2.12)$$

Le rapport signal sur bruit pour tout utilisateur  $k$ , vaut :

$$SNR_k = \frac{P_k |g_k|^2}{N + \sum_{i=k+1}^K P |g_i|^2} \quad (2.13)$$

#### 2.2.4.2 Débit de transmission

Le débit de transmission pour chaque utilisateur dans un système NOMA est défini comme suit :

$$D_k = W \log_2 \left( 1 + \frac{P_k |g_k|^2}{N + \sum_{i=k+1}^K P |g_i|^2} \right) \quad (2.14)$$

Dans un système OFDMA, la bande passante et la puissance sont partagées de manière égale. Le débit de transmission est défini comme suit :

$$D_k = W_k \log_2 \left( 1 + \frac{P_k |g_k|^2}{N_k} \right) \quad (2.15)$$

La relation de la capacité totale pour NOMA et OFDMA s'écrit comme suit :

$$D_T = \sum_{k=1}^K D_k \quad (2.16)$$

### 2.3 Efficacité spectrale et efficacité énergétique de NOMA

Dans les réseaux de nouvelles générations, il est primordial de chercher un compromis entre une efficacité spectrale et une efficacité énergétique.

#### 2.3.1 Efficacité spectrale (SE)

L'optimisation de l'efficacité spectrale est l'un des sujets de recherche actuels dans le domaine des communications numériques sans fil. L'efficacité spectrale est définie comme étant le nombre de bits par seconde par unité de bande passante pouvant être transmis dans un système de communication. Elle s'écrit alors comme suit :

$$SE = \frac{D_T}{W} \text{ (bps/Hz)} \quad (2.17)$$

#### 2.3.2 Efficacité énergétique (EE)

L'efficacité énergétique peut être définie de plusieurs manières. C'est le rapport entre le nombre maximum de bits qui peut être transmis par le réseau et l'énergie totale nécessaire consommée. Elle peut être définie aussi comme le rapport de la capacité sur la puissance totale utilisée par la station de base.

L'efficacité énergétique peut être définie comme suit :

$$EE = \frac{D_T \text{ (bits/s)}}{P_{totale} \text{ (W = joule/s)}} = SE \frac{W}{P_{totale}} \text{ (bits/joule)} \quad (2.18)$$

Où  $P_{totale}$  est la puissance d'émission totale de la BS qui est égale à la somme de la puissance consommée par le signal et la puissance consommée par les circuits.

### 2.3.3 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].

## 2.4 Avantages et inconvénients de la NOMA

La technique NOMA offre plusieurs avantages dont on peut citer :

- Une haute efficacité spectrale est l'un des principales caractéristiques de NOMA, puisqu'il peut servir plusieurs utilisateurs en utilisant le même bloc de ressource, ce qu'il lui donne le pouvoir d'être très efficaces en termes de spectre, par conséquent, le débit du system sera amélioré.
- Une réduction considérable de la latence de transmission peut être obtenue ainsi qu'une amélioration de l'équité de l'utilisateur, car plusieurs utilisateurs sont simultanément servis avec des conditions de canal différentes.
- En utilisant une allocation de ressources non orthogonales, NOMA peut potentiellement prendre en charge une connectivité massive, ce qui est idéal pour les milliards d'appareils intelligents.

Elle présente en revanche quelques inconvénients :

- Propagation des erreurs d'annulation successive des interférences (SIC), c'est-à-dire un décodage incorrect d'un message d'interférence peut propager une erreur vers le signal de message.
- L'utilisation de SIC au niveau de chaque utilisateur signifie que chacun des utilisateurs doit décoder les signaux de tous les autres utilisateurs pour obtenir le signal voulu. Par conséquent, la complexité dans le récepteur augmente, ce qui conduit à un délai plus long. De plus, la consommation d'énergie est considérable.

- Chacun des utilisateurs doit fournir les informations d'état de canal (CSI) à la BS afin qu'elle puisse organiser le processus SIC, ce qui augmente la surcharge de rétroaction des CSI.

## 2.5 Applications de NOMA

En raison de la compatibilité, NOMA peut être combinée avec de nombreuses technologies de communication, y compris la communication coopérative dite coopérative NOMA (C-NOMA), les entrées multiples et les sorties multiples (MIMO), la communication par lumière visible (VLC) et l'accès multiple défini par logiciel (SoDeMA), pour améliorer encore les performances du réseau.

### 2.5.1 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.

### 2.5.2 MIMO-NOMA

Le NOMA peut être utilisé conjointement avec les systèmes MIMO afin d'optimiser les performances du système. Le MIMO-NOMA permet à plusieurs utilisateurs situés dans la même direction de partager un seul faisceau commun.

### 2.5.3 Communication par lumière visible (VLC)

VLC est considéré comme étant un paradigme de communication prometteur pour les réseaux 5G sans fil et au-delà en exploitant le large spectre optique à des longueurs d'onde de 380 à 750 nm (spectre visible) et conçu pour fournir une connectivité omniprésente et une efficacité spectrale élevée. L'accès NOMA a été adaptée aux systèmes VLC pour diverses raisons, par exemple, le récepteur SIC qui fonctionne mieux avec moins d'utilisateurs ; c'est le cas pour VLC (l'utilisation de la modulation à bande étroite et de la détection non cohérente limite le nombre d'utilisateurs qui peuvent être pris en charge).

Toutefois, les caractéristiques de canal uniques de VLC signifient que les algorithmes et protocoles conçus à l'origine pour les réseaux basés sur les radiofréquences ne peuvent pas

être appliqués de façon optimale à VLC, et des conceptions adaptées aux canaux VLC sont nécessaires pour la combinaison de VLC et NOMA [26].

#### **2.5.4 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 [10].

#### **2.5.5 Internet des objets (IOT)**

Un nombre très important d'appareils connectés est dédié à l'IoT, ce qui exige des débits de données parfois haut ou bas. NOMA se présente comme un moyen pour gérer ce genre de situation en accordant une connectivité massive et en intégrant des appareils avec des exigences de QoS hétérogènes sur la même bande passante.

### **2.6 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons largement décrit la technique d'accès multiple non orthogonal afin de la caractériser par diverses métriques et de mettre en avant ses principaux atouts dans le but de faciliter la compréhension de nos simulations du chapitre suivant.

# *Chapitre 3*

---

## *Evaluation des performances de NOMA*

---

### 3.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'évaluation de performances de la technique NOMA en comparaison avec l'accès orthogonal multiples OMA en liaison descendante puis en liaison montante. Les simulations sont faites sous MATLAB 2014.

### 3.2 Performances de NOMA en liaison descendante

Pour simplifier l'analyse, nous considérons un système NOMA en liaison descendante qui possède une seule antenne d'émission et de réception. La largeur de la bande passante du système est supposée être de 1 Hz. La station de base envoie un signal  $x_k$  ( $k = 1,2$ ) à l' $UE_k$ , où  $E[|x_k|^2] = 1$ , avec une puissance d'émission  $P_k$  où  $\sum_{k=1,2} P_k = P$ . En liaison descendante, les deux signaux des deux équipements utilisateurs se superposent comme suit :

$$x = \sqrt{P_1}x_1 + \sqrt{P_2}x_2 \quad (3.1)$$

Où la puissance d'émission est limitée par  $P_1 + P_2 = 1$ . Le signal reçu à l'utilisateur  $k$  est donné comme suit :

$$y_k = g_k x + w_k, k = \{1,2\} \quad (3.2)$$

Nous rappelons que  $g_k$  est le coefficient de canal complexe entre l' $UE_k$  et la BS,  $w_k$  est le bruit AWGN à l' $UE_k$  avec une densité  $N_{0,k}$ .

Dans ce cas, nous supposons que l'utilisateur 1 est l'utilisateur fort avec une meilleure qualité de canal, tandis que l'utilisateur 2 est l'utilisateur faible avec un canal de mauvaise qualité, c'est-à-dire  $\frac{|g_1|^2}{N_{0,1}} > \frac{|g_2|^2}{N_{0,1}}$ . L' $UE_2$  n'effectue pas le décodage SIC car il vient en premier dans l'ordre de décodage. Donc L' $UE_2$  décode son propre signal directement en considérant le signal de l' $UE_1$  comme du bruit. D'autre part, l' $UE_1$  décode le signal  $x_2$  en premier et soustrait sa composante du signal reçu  $y_1$  avant de décoder son propre signal. En supposant que le décodage est parfait et qu'il n'y a pas de propagation d'erreur, le débit de l' $UE_k$  s'exprime comme suit :

$$D_1 = \log_2 \left( 1 + \frac{P_1 |g_1|^2}{N_{0,1}} \right) \quad (3.3)$$

$$D_2 = \log_2 \left( 1 + \frac{P_2 |g_2|^2}{P_1 |g_2|^2 + N_{0,2}} \right) \quad (3.4)$$

D'après ces deux équations, on peut constater que la puissance attribuée à chaque  $UE$  affecte considérablement le débit de l'utilisateur. En ajustant le rapport d'allocation de puissance  $P_1/P_2$ , la station de base peut contrôler avec précision le débit de transmission de chaque unité  $UE$  de sorte que le signal lié à chaque unité  $UE$  puisse être décodable au niveau de son récepteur correspondant.

Sachant que  $P_1 = \alpha P$  et donc  $P_2 = (1 - \alpha)P$ , la relation de débit de transmission est réécrite en fonction de  $\alpha$  :

$$D_1(\alpha) = \log_2 \left( 1 + \frac{\alpha P |g_1|^2}{N_{0,1}} \right) \quad (3.5)$$

$$D_2(\alpha) = \log_2 \left( 1 + \frac{(1 - \alpha)P |g_2|^2}{\alpha P |g_2|^2 + N_{0,2}} \right) \quad (3.6)$$

### 3.2.1 Comparaison de NOMA avec OFDMA/OMA

Dans le cas d'OFDMA, la bande passante totale doit être partagée entre les deux utilisateurs. Supposons qu'une fraction de la bande passante totale  $\alpha$  ( $0 < \alpha < 1$ )  $Hz$  soit allouée à l' $UE_1$  et que la bande restante  $(1 - \alpha)$  soit allouée à l' $UE_2$ . Le débit de l' $UE_k$  est donné par :

$$D_1 = \alpha \log_2 \left( 1 + \frac{P_1 |g_1|^2}{\alpha N_{0,1}} \right) \quad (3.7)$$

$$D_2 = (1 - \alpha) \log_2 \left( 1 + \frac{P_2 |g_2|^2}{(1 - \alpha)N_{0,2}} \right) \quad (3.8)$$

Sachant que  $P_1 = P_2 = \frac{1}{2}P$ . Par conséquent, nous écrivons la relation de débit de transmission du système OFDMA en fonction de  $\alpha$  pour chaque  $UE_k$  :

$$D_1 = \alpha \log_2 \left( 1 + \frac{0.5P |g_1|^2}{\alpha N_{0,1}} \right) \quad (3.9)$$

$$D_2 = (1 - \alpha) \log_2 \left( 1 + \frac{0.5P |g_2|^2}{(1 - \alpha)N_{0,2}} \right) \quad (3.10)$$

### 3.2.2 Application numérique

Nous supposons l'exemple de deux périphériques,  $UE_1$  au centre de la cellule et  $UE_2$  au bord de la cellule, avec  $\frac{|g_2|^2}{N_{0,2}} = 0 \text{ dB}$  et  $\frac{|g_1|^2}{N_{0,1}} = 20 \text{ dB}$ .

Dans le cas NOMA, pour  $P_1 = \frac{1}{5}P$  et  $P_2 = \frac{4}{5}P$ , le débit de transmission selon les expressions 3.5 et 3.6 vaut :

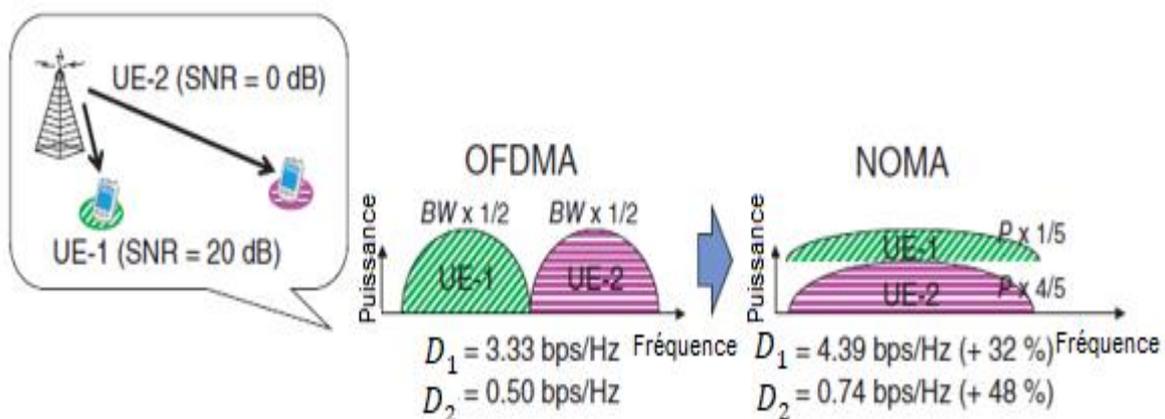
$$D_1 = 4.39 \text{ bps} , D_2 = 0.74 \text{ bps}$$

Dans le cas d'OFDMA/OMA, avec une largeur de bande égale entre les utilisateurs et une puissance d'émission égale ( $P_1 = P_2 = \frac{1}{2}P$ ), le débit de transmission selon les expressions 3.9 et 3.10 vaut :

$$D_1 = 3.33 \text{ bps} , D_2 = 0.50 \text{ bps}$$

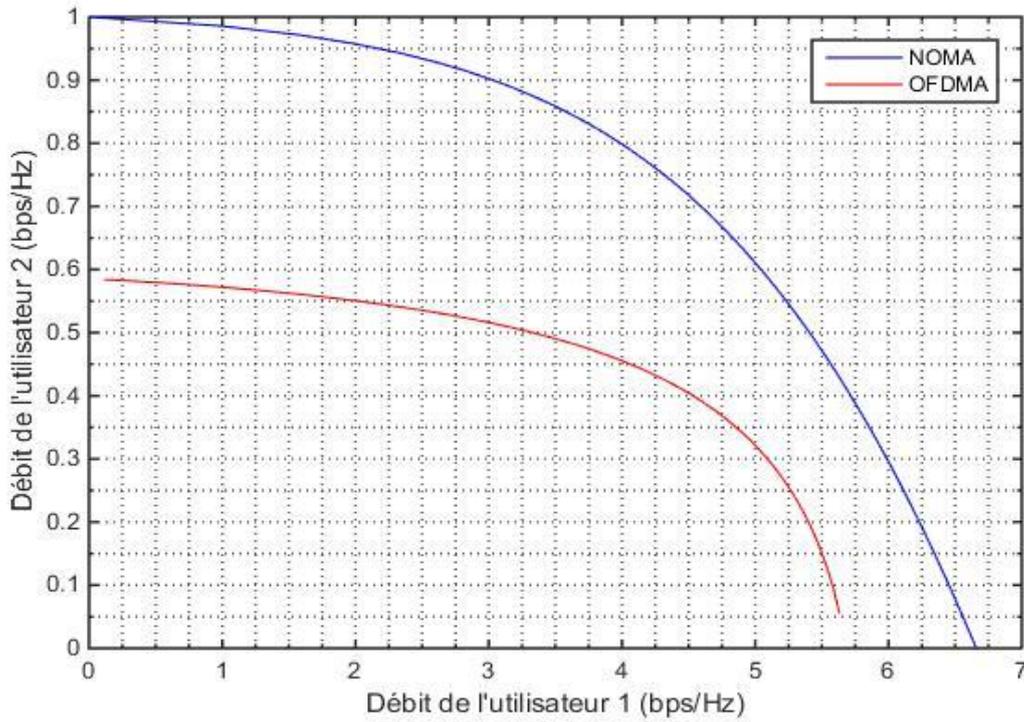
D'après ces résultats, on peut constater que les gains en débit correspondants de NOMA sur l'OFDMA sont 32% et 48% pour  $UE_1$  et  $UE_2$ , respectivement.

D'après ce cas simple de deux utilisateurs, on note que le système NOMA fournit une capacité plus élevée que le système OFDMA. En fait, l' $UE$  au centre de la cellule gagne en débit car il profite davantage de possibilité d'utiliser une double bande passante, malgré que sa puissance d'émission est très faible, de sorte qu'elle soit proportionnelle à la distance de l'utilisateur de la BS. De même, l' $UE$  au bord de la cellule gagne en terme de débit car sa puissance d'émission est légèrement réduite mais sa bande passante peut être doublée, Comme le montre la figure 3.1. Ces résultats peuvent être généralisés au cas d'équipements multiples et de planification multi-utilisateurs.



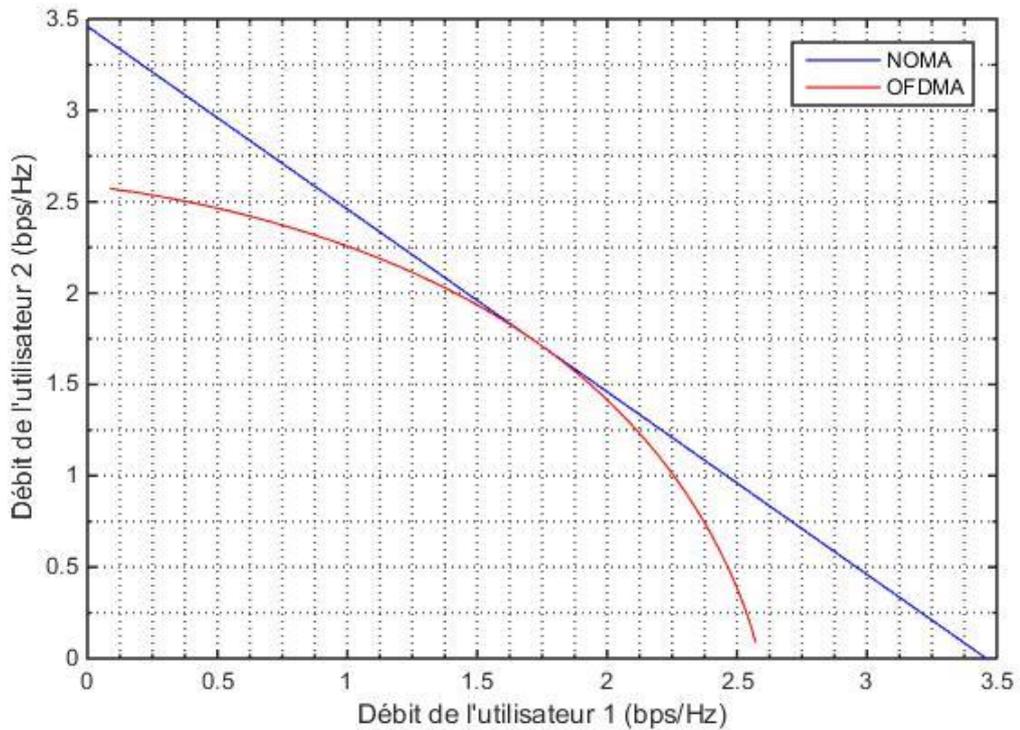
**Figure 3.1 :** Comparaison simple entre NOMA et OFDMA par liaison descendante

Pour différentes valeurs de  $\alpha \in [0,1]$ ,  $D_2(D_1)$  peut être évalué. Donc on dresse deux courbes représentatives de débit de transmission des systèmes NOMA et OFDMA. La différence de performance peut être vue sur la figure 3.2, où il est montré que NOMA est clairement supérieure à OFDMA.



**Figure 3.2 :** Débits DL en OFDMA et NOMA avec  $\frac{|g_2|^2}{N_{0,2}} = 0 \text{ dB}$  et  $\frac{|g_1|^2}{N_{0,1}} = 20 \text{ dB}$

Un autre exemple est proposé en supposant que les deux *UEs* sont à la même distance de la BS, où  $\frac{|g_1|^2}{N_{0,1}} = \frac{|g_2|^2}{N_{0,2}} = 10 \text{ dB}$ . La différence de performance est indiquée sur la figure 3.3.



**Figure 3.3 :** Débits DL en OFDMA et NOMA avec  $\frac{|g_1|^2}{N_{0,1}} = \frac{|g_2|^2}{N_{0,2}} = 10 \text{ dB}$

Il ressort de ces résultats que le gain de performance de NOMA par rapport à OMA augmente lorsque la différence des gains de canal entre les utilisateurs est grande.

### 3.2.3 Impact d'une annulation imparfaite

On garde les mêmes conditions que pour le cas d'un canal asymétrique avec une annulation parfaite pour ensuite, étudier l'effet de l'annulation incomplète des interférences en fixant le coefficient d'erreur d'annulation  $\epsilon$  à (1; 5; 10)% comme on peut le voir sur la figure 3.4. Par exemple, lorsque  $\epsilon = 1\%$ ,  $UE_1$  ne peut pas annuler le signal de  $UE_2$  complètement comme lors d'une annulation complète. Un pourcentage (1%) du deuxième signal reste sous forme d'une interférence. Le débit de transmission pour chaque  $UE$  devient comme suit :

$$D_1 = \frac{P_1 |g_1|^2}{N_{0,1} + \epsilon P_2 |g_1|^2} \quad (3.11)$$

$$D_2 = \log_2 \left( 1 + \frac{P_2 |g_2|^2}{P_1 |g_2|^2 + N_{0,2}} \right) \quad (3.12)$$

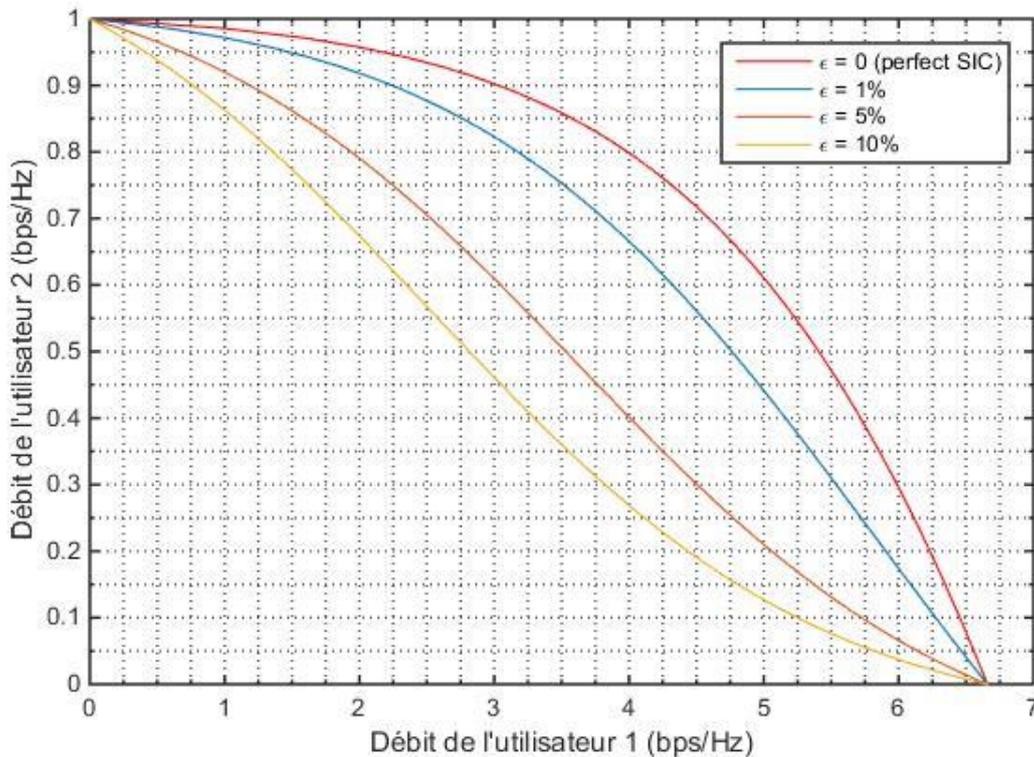


Figure 3.4 : L'effet d'une annulation imparfaite sur les récepteurs SIC

### 3.2.4 Compromis SE-EE avec NOMA

Nous allons à présent comparer l'efficacité énergétique et l'efficacité spectrale de NOMA avec ceux d'OFDMA. Nous fixons la densité de bruit  $N_0$  à -150 dBW, la bande passante à  $W=5$  MHz, la consommation d'énergie statique  $P_{static}$  de la BS à 100W et les gains de canal de  $UE_1$  et  $UE_2$  à -120dB et -140dB respectivement. La figure 3.5 montre parfaitement la supériorité de NOMA en atteignant des valeurs de SE et EE plus élevées qu'en OFDMA. Les deux points verts indiquent qu'une valeur maximale de EE est atteinte par les systèmes NOMA et OFDMA.

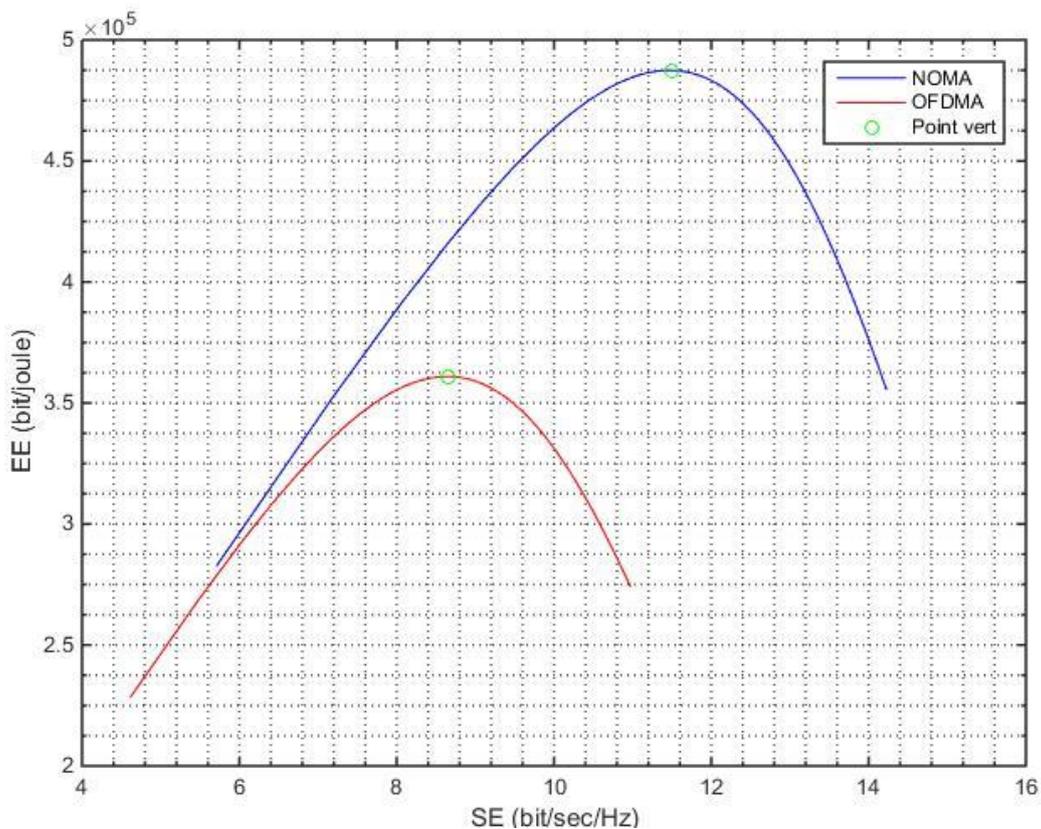
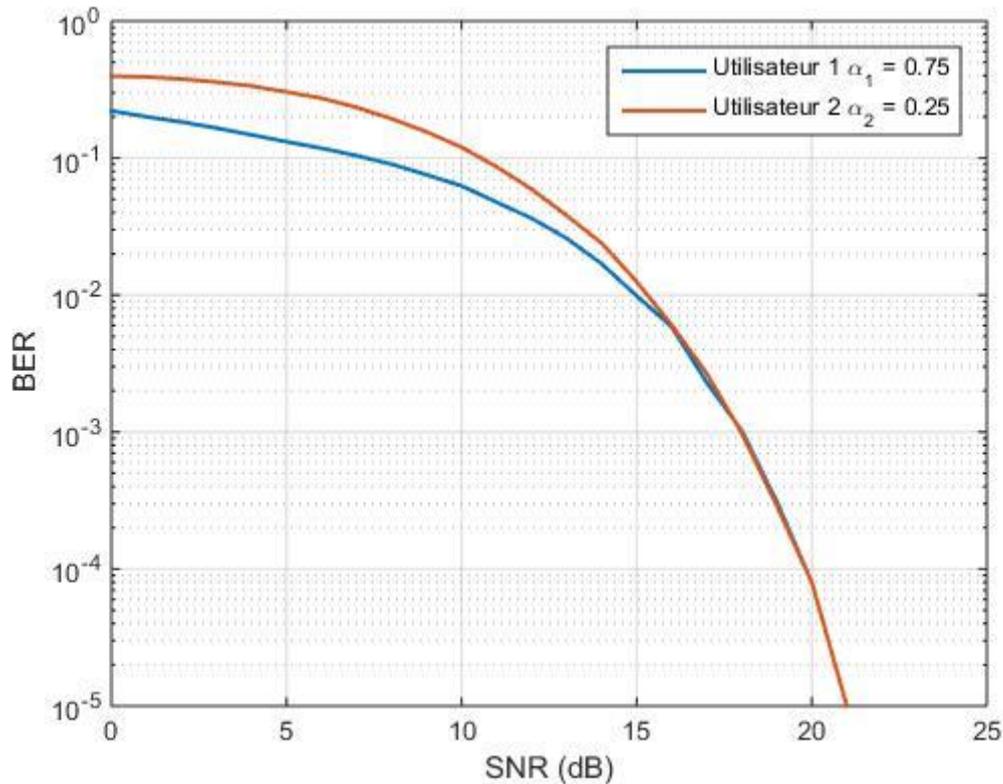


Figure 3.5 : Courbes de compromis EE-SE pour NOMA et OFDMA

### 3.2.5 Estimation du BER de NOMA dans un canal AWGN

Dans cette section, nous évaluons les performances BER de NOMA dans un canal à bruit AWGN. Nous considérons toujours une transmission en liaison descendante de la BS à deux utilisateurs. Nous supposons que les deux utilisateurs sont à la même distance de la BS avec des coefficients d'allocation de puissance  $\alpha_1 = 0.75$  et  $\alpha_2 = 0.25$ . Une modulation BPSK est considérée pour les deux utilisateurs, donc on retiendra que la composante en phase (réelle) de l'AWGN complexe.

Cette simulation est effectuée selon la technique de Monte-Carlo moyennant  $10^5$  essais indépendants pour chaque calcul. Les courbes BER obtenues sont dressées ci-après.



**Figure 3.6 :** Graphique BER pour NOMA dans le canal AWGN

Nous pouvons constater que l'utilisateur 2 a un BER légèrement plus élevé que l'utilisateur 1, en particulier dans la région à faible SNR. C'est parce que l'utilisateur 2 doit effectuer le décodage SIC. Lors de l'exécution du SIC, l'utilisateur 2 doit d'abord estimer les données de l'utilisateur 1 à partir de signal composite envoyé par la BS. Si cette estimation est erronée, alors l'erreur affectera le décodage de ses propres informations. Autrement dit, l'utilisateur 2 doit décoder à la fois les données de l'utilisateur 1 et ses propres données correctement. Toute erreur de décodage des données de l'utilisateur 1 ou de ses propres données aura un impact sur son BER. C'est pourquoi l'utilisateur 2 connaît un BER plus élevé que l'utilisateur 1.

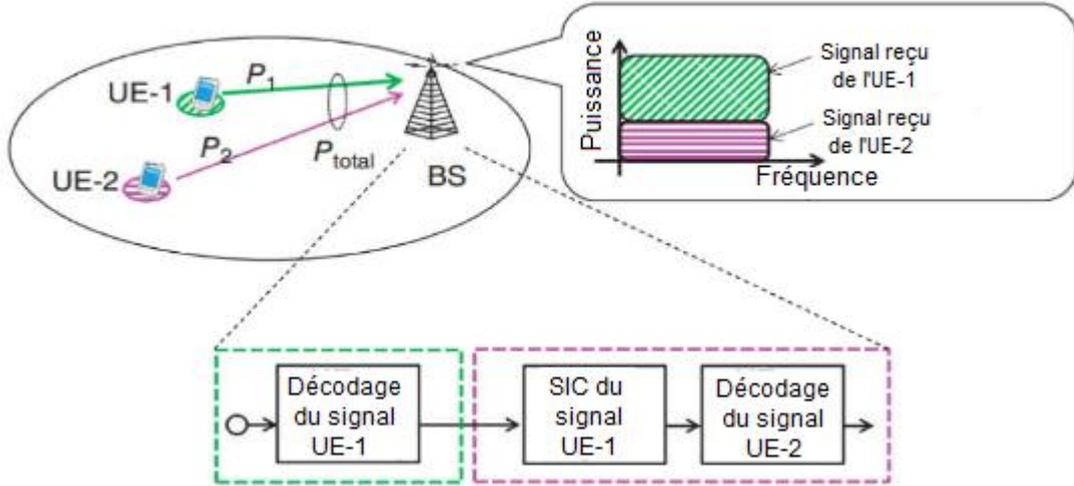
### 3.3 Performances NOMA en liaison montante

Le modèle de système générique pour NOMA de liaison montante est illustré à la figure 3.7 avec une BS et deux utilisateurs. Les deux utilisateurs envoient leurs signaux à la BS sur la même fréquence et en même temps, la BS utilise le décodage SIC pour séparer les signaux des utilisateurs. Comme pour la liaison descendante, nous supposons le cas d'une seule antenne émettrice et réceptrice et une largeur de la bande passante globale du système de 1Hz.

Pour le signal émis par  $UE_k$  ( $k = 1,2$ ), nous le symbolisons  $x_k$ , où  $E[|x_k|^2] = 1$ , avec une puissance d'émission  $P_k$ . Dans NOMA de la liaison montante, le signal reçu par la BS à la suite de la superposition de  $x_1$  et  $x_2$  est le suivant :

$$y = g_1\sqrt{P_1}x_1 + g_2\sqrt{P_2}x_2 + w \quad (3.13)$$

Où  $g_k$  est le coefficient de canal complexe entre l' $UE_k$  et la BS,  $w$  désigne l'AWGN à la BS avec une densité spectrale de puissance  $N_0$  (w/Hz).



**Figure 3.7 :** NOMA en Liaison montante avec SIC à la station de base

Nous supposons que l' $UE_1$  est l'utilisateur fort et l' $UE_2$  est l'utilisateur faible, c'est-à-dire que  $\frac{|g_1|^2}{N_0} > \frac{|g_2|^2}{N_0}$ . La BS effectue le décodage SIC selon l'ordre décroissant des gains de canal et sans aucune propagation d'erreur. En conséquence, nous pouvons obtenir le débit de donnée pour chaque  $UE_k$  comme suit :

$$D_1 = \log_2 \left( 1 + \frac{P_1|g_1|^2}{P_2|g_2|^2 + N_0} \right) \quad (3.14)$$

$$D_2 = \log_2 \left( 1 + \frac{P_2|g_2|^2}{N_0} \right) \quad (3.15)$$

Dans le cas où la BS applique le décodage SIC selon l'ordre croissant des gains de canal, le débit de transmission pour chaque utilisateur sera le suivant :

$$D_1 = \log_2 \left( 1 + \frac{P_1|g_1|^2}{N_0} \right) \quad (3.16)$$

$$D_2 = \log_2 \left( 1 + \frac{P_2|g_2|^2}{P_1|g_1|^2 + N_0} \right) \quad (3.17)$$

Il est à noter que le débit total est le même, que l'ordre de décodage SIC soit en fonction de l'augmentation ou de la diminutions du gain de canal :

$$D_1 + D_2 = \log_2 \left( 1 + \frac{P_1 |g_1|^2 + P_2 |g_2|^2}{N_0} \right) \quad (3.18)$$

Ainsi, lors de l'application du SIC, l'ordre n'est pas important si le système n'a pas de propagation d'erreur. Si c'est le cas contraire, l'ordre optimal est en fonction du gain décroissant du canal.

### 3.3.1 Comparaison de NOMA avec SC-FDMA/OMA

Dans le cas SC-FDMA/OMA, nous supposons qu'une fraction de la bande passante totale  $\alpha (0 < \alpha < 1)$  Hz soit allouée à l'UE<sub>1</sub> et le reste de la bande  $(1 - \alpha)$  soit allouée à l'UE<sub>2</sub>. Le débit de transmission de chaque utilisateur est :

$$D_1 = \alpha \log_2 \left( 1 + \frac{P_1 |g_1|^2}{\alpha N_0} \right) \quad (3.19)$$

$$D_2 = (1 - \alpha) \log_2 \left( 1 + \frac{P_2 |g_2|^2}{(1 - \alpha) N_0} \right) \quad (3.20)$$

### 3.3.2 Application numérique

La figure 3.8 montre une comparaison entre SC-FDMA et NOMA, en admettant qu'il y'a deux équipements utilisateurs UE, l'un au centre de la cellule et l'autre au bord de la cellule, où  $\frac{|g_2|^2}{N_{0,2}} = 0 \text{ dB}$  et  $\frac{|g_1|^2}{N_{0,1}} = 20 \text{ dB}$ .

Dans le système OMA, nous supposons qu'une largeur de bande égale est affectée pour chaque périphérique ( $\alpha = 0,5$ ), donc le débit des utilisateurs selon les expressions 3.19 et 3.20 sont les suivants :

$$D_1 = 3.33 \text{ bps} \quad D_2 = 0.50 \text{ bps}, \quad D_1 + D_2 = 3.83 \text{ bps}$$

Dans le système NOMA, en admettant que la puissance de transmission globale de chaque UE est identique à celle en OMA, ainsi les débits de UE<sub>1</sub> et UE<sub>2</sub> selon les expressions 3.14 et 3.15 sont comme suit :

$$D_1 = 5,10 \text{ bps} (+53\%), \quad D_2 = 0.59 \text{ bps} (+18\%)$$

$$D_1 + D_2 = 5.69 \text{ bps} (+49\%)$$

Il y'a un gain de débit de transmission total estimé à 49% dans le système NOMA au détriment du système OMA. Par conséquent, pour NOMA de liaison montante, nous pouvons obtenir des gains de performance identiques au cas de NOMA de la liaison descendante.

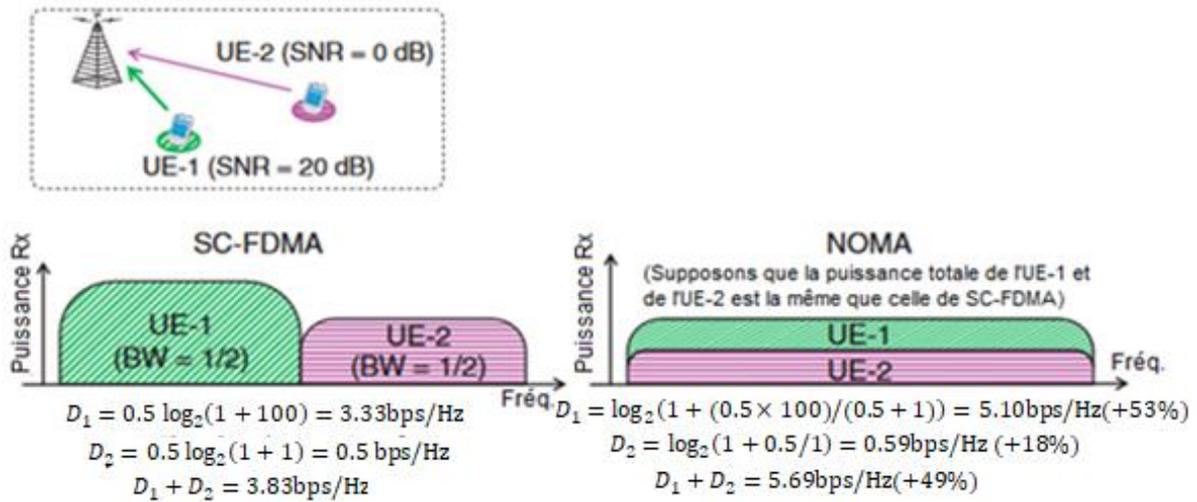


Figure 3.8 : Comparaison simple entre NOMA et SC-FDMA par liaison montante

- Cas d'un décodage SIC de la BS selon l'ordre décroissant des gains de canal.

La simulation est faite pour deux utilisateurs,  $UE_1$  au centre de la cellule et  $UE_2$  au bord de la cellule, avec  $\frac{|g_2|^2}{N_{0,2}} = 0 \text{ dB}$  et  $\frac{|g_1|^2}{N_{0,1}} = 20 \text{ dB}$ . On dresse une comparaison de débit  $D_2(D_1)$  pour différentes valeurs de  $\alpha \in [0, 1]$ . La différence de performances peut être visualisée sur la figure 3.9 qui montre que NOMA est supérieure à SC-FDMA. Le résultat est similaire à celui obtenu pour le lien descendant.

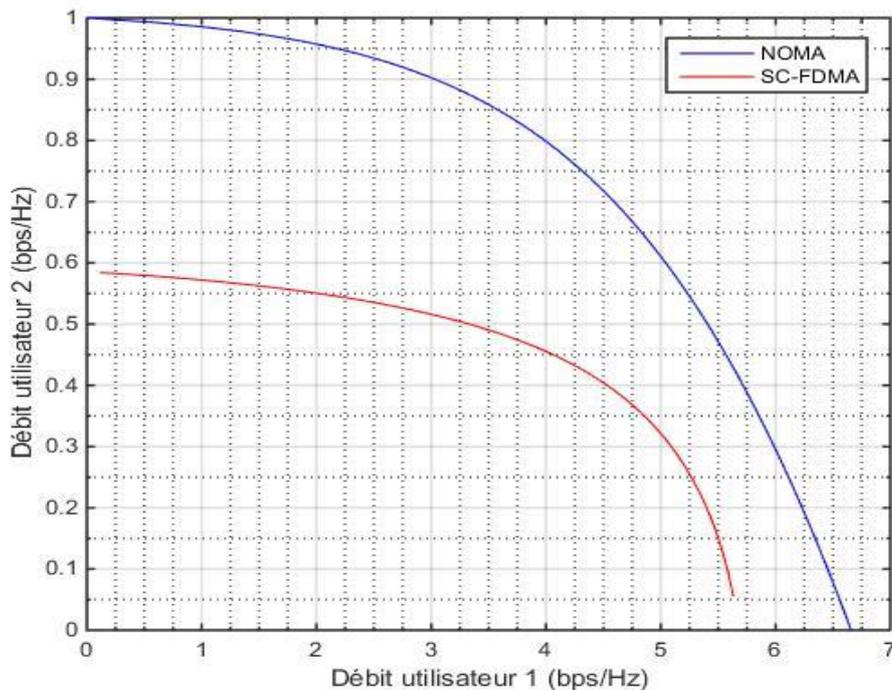
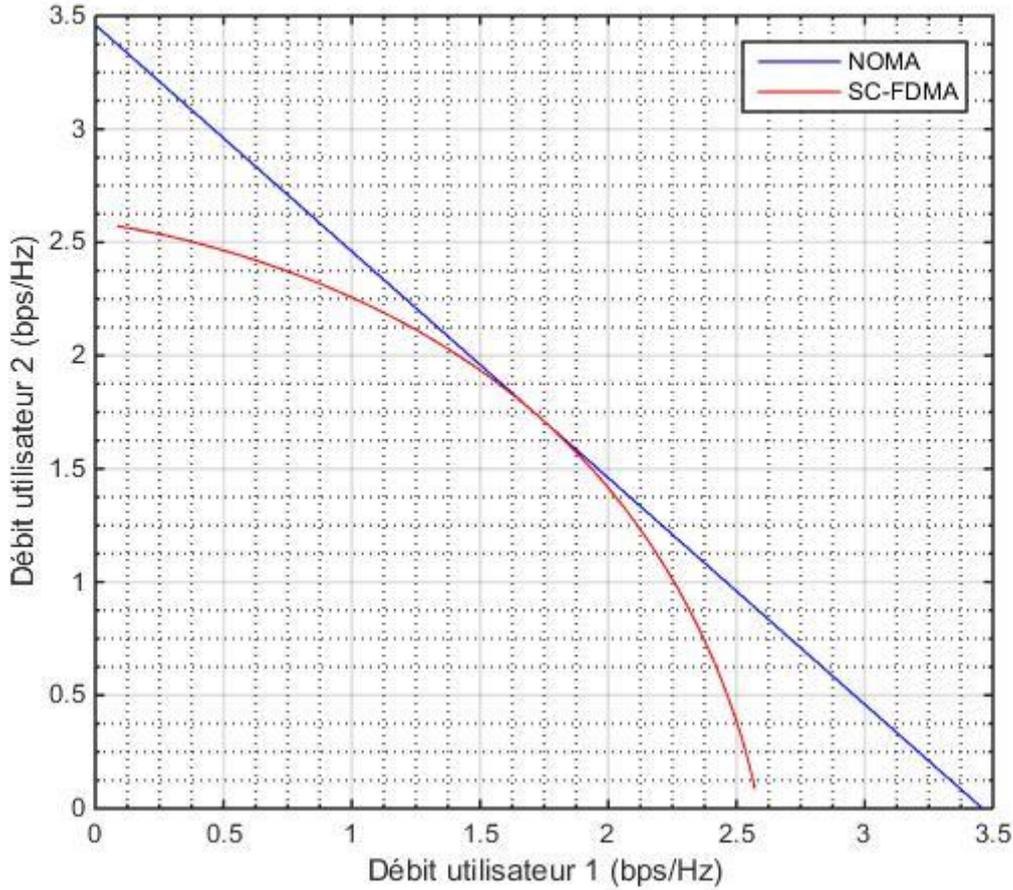


Figure 3.9 : Débits UL d'SC-FDMA et de NOMA pour :  $\frac{|g_2|^2}{N_{0,2}} = 0 \text{ dB}$  et  $\frac{|g_1|^2}{N_{0,1}} = 20 \text{ dB}$

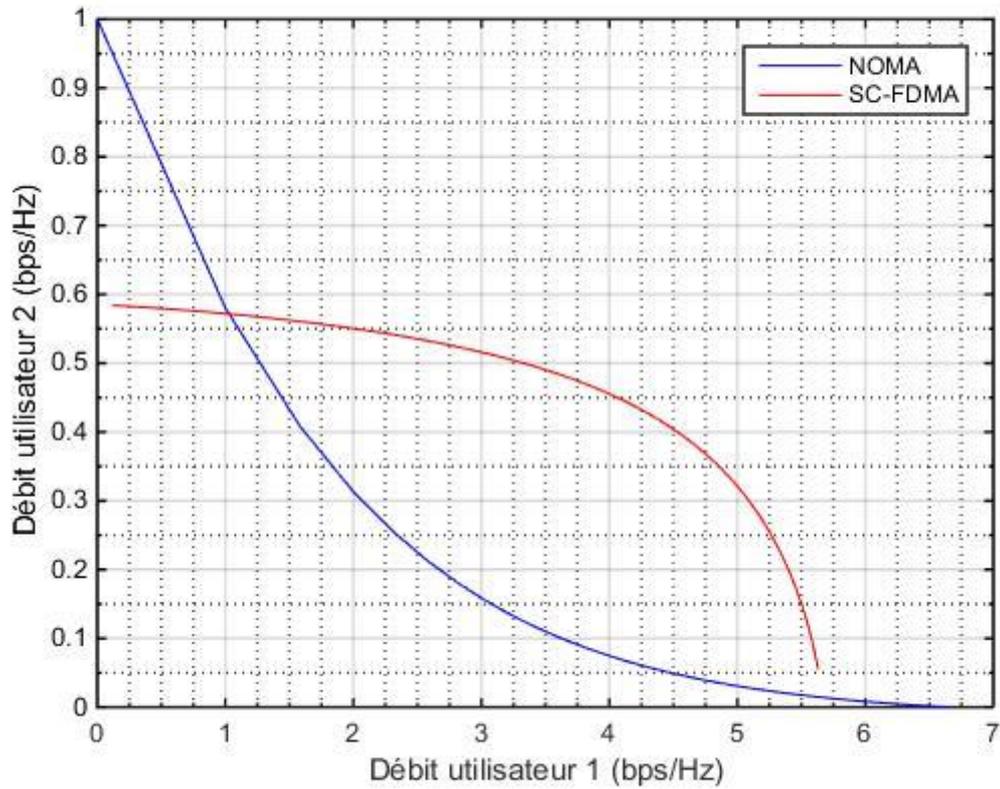
Dans le cas où nous supposons que les deux  $UEs$  sont à la même distance de la BS où  $\frac{|g_1|^2}{N_{0,1}} = \frac{|g_2|^2}{N_{0,2}} = 10 \text{ dB}$ , on obtient la différence de performance montrée sur la figure 3.10. Le résultat est similaire à celui obtenu pour le lien descendant.



**Figure 3.10 :** Débits UL d'SC-FDMA et de NOMA pour :  $\frac{|g_1|^2}{N_{0,1}} = \frac{|g_2|^2}{N_{0,2}} = 10 \text{ dB}$

- Cas d'un décodage SIC par la BS selon l'ordre croissant des gains de canal.

$UE_1$  est au centre de la cellule et  $UE_2$  au bord de la cellule, où  $\frac{|g_2|^2}{N_{0,2}} = 0 \text{ dB}$  et  $\frac{|g_1|^2}{N_{0,1}} = 20 \text{ dB}$  avec différentes valeur de  $\alpha \in [0,1]$ ,  $D_2(D_1)$  peut-être tracée. La figure 3.11 nous montre clairement la supériorité de SC-FDMA par rapport à NOMA sur une région (débit moyen de l'utilisateur 1 :  $[1,5,63)$ ) tandis que NOMA devance SC-FDMA sur certaines régions (faible et fort débit de l'utilisateur 1 :  $[0,123-1]$  et  $[5,63-6,66]$ ).



**Figure 3.11 :** Débits UL d'SC-FDMA et de NOMA pour :  $\frac{|g_2|^2}{N_{0,2}} = 0 \text{ dB}$  et  $\frac{|g_1|^2}{N_{0,1}} = 20 \text{ dB}$

Dans le cas où nous supposons que les deux *UEs* sont à la même distance de la BS avec  $\frac{|g_1|^2}{N_{0,1}} = \frac{|g_2|^2}{N_{0,2}} = 10 \text{ dB}$ , on aura la différence de performance montrée sur la figure 3.12. Le résultat est similaire ici aussi à celui obtenu pour le lien descendant.

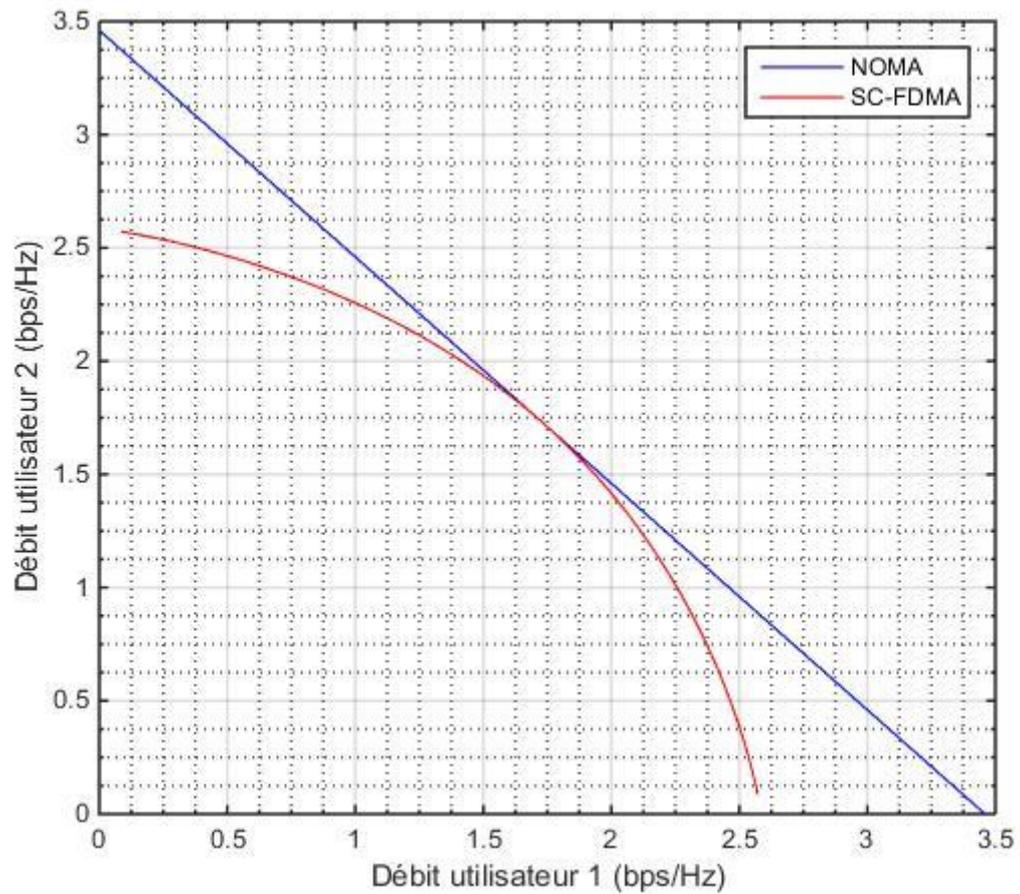


Figure 3.12 : Débits UL d'SC-FDMA et de NOMA pour :  $\frac{|g_1|^2}{N_{0,1}} = \frac{|g_2|^2}{N_{0,2}} = 10 \text{ dB}$

### 3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons évalué les performances de NOMA. D'après les résultats, les performances de NOMA sont meilleures que celles de OMA en termes de débit de données, d'efficacité énergétique, d'efficacité spectrale et on a évalué les performances du BER de NOMA. Nous avons aussi vu que l'imperfection au niveau des récepteurs SIC a un effet sur les performances du système NOMA.

---

## *Conclusion Générale*

---

Actuellement, de nombreuses recherches sont effectuées dans le domaine des technologies d'accès multiple provenant du milieu universitaire et de l'industrie afin de trouver des candidats potentiels pouvant être intégrés dans les réseaux futurs 5G et leurs successeurs. L'intérêt de notre étude s'est justement porté sur la technique NOMA, qui se démarque des modes d'accès traditionnelles et se présente comme étant une solution attrayante pour augmenter la capacité des réseaux, augmenter leurs débits et réduire leurs latences.

Nos simulations nous ont permises de prouver que l'accès multiple NOMA dans le domaine de puissance peut atteindre des performances bien plus élevées comparativement aux techniques OMA, en termes de débits, d'efficacité spectrale et d'efficacité énergétique aussi bien sur le lien descendant que sur le lien montant.

Pour atteindre les objectifs de l'IMT-2020, nous pensons qu'il y'aura de plus grandes percées dans les technologies des communications sans fil à mesure que les recherches et les développements progresseront.

Comme perspective d'avenir, on peut élargir l'étude dans le cas d'un système massif MIMO et même sur le système NOMA sans SIC.

Nous prévoyons aussi que les nouvelles techniques d'accès viendront promouvoir les systèmes cellulaires actuels. Parmi les nouvelles méthodes en cours d'étude, il serait judicieux d'explorer l'accès multiple Delta-orthogonal (D-OMA) déjà envisagée pour l'accès multiple massif dans les réseaux 6G.

- [10] Y. Yuan, L. Dai, Y. Yuan, S. Han, C. I, and 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.
- [11] Islam, S. M. R., Zeng, M., Dobre, O. A., & Kwak, K, "Nonorthogonal Multiple Access (NOMA) How It Meets 5G and Beyond," Wiley 5G Ref, 1–28, 2019.
- [12] Kschischang, F. R., Frey, B. J., & Loeliger, H.-A, "Factor graphs and the sum-product algorithm," IEEE Transactions on Information Theory, 47(2), 498–519, 2001.
- [13] M. Al-Imari, "Uplink non orthogonal multiple access for 5G wireless networks," In Proc. 11th Int. Symp. Wireless Commun. Syst, pp. 781–785 Aug. 2014.
- [14] Ding, Z., Liu, Y., Choi, J., Sun, Q., Elkashlan, M., I, C.-L., & Poor, H. V, " Application of Non-Orthogonal Multiple Access in LTE and 5G Networks," IEEE Communications Magazine, 55(2), 185–191, 2017.
- [15] B. Clerckx, H. Joudeh, C. Hao, M. Dai, and B. Rassouli, "Rate splitting for MIMO wireless networks : A promising PHY-layer strategy for LTE evolution," IEEE Commun. Mag, vol. 54, no. 5, pp. 98–105, May 2016.
- [16] O. Dizdar, Y. Mao, W. Han and B. Clerckx, "Rate-Splitting Multiple Access : A New Frontier for the PHY Layer of 6G". arXiv preprint arXiv :2006.01437, Jun 2020.
- [17] H. Joudeh and B. Clerckx, "Sum-rate maximization for linearly precoded downlink multiuser MISO systems with partial CSIT : a rate-splitting approach," IEEE Trans. Commun., vol. 64, no. 11, pp. 4847–4861, Nov. 2016.
- [18] B. Clerckx, Y. Mao, R. Schober and H. V. Poor, "Rate-splitting unifying SDMA, OMA, NOMA, and multicasting in MISO broadcast channel : a simple two-user rate analysis," IEEE Wireless Commun. Lett., vol. 9, no. 3, pp. 349–353, Mar. 2020.
- [19] Y. Mao and B. Clerckx, "Beyond dirty paper coding for multi-antenna broadcast channel with partial CSIT : A rate-splitting approach". arXiv preprint arXiv :1912.05409, 2019.
- [20] O. Dizdar, Y. Mao, W. Han and B. Clerckx, "Rate-Splitting Multiple Access for Downlink Multi-Antenna Communications : Physical Layer Design and Link-level Simulations". arXiv

preprint arXiv :2005.13257, May 2020.

[21] D. Tse and P. Vishwanathan, "Multiuser Capacity and Opportunistic Communication," *Fundamentals of Wireless Communication*, Cambridge University Press, 2005.

[22] J.G. Andrews and T.H. Meng, "Optimum Power Control for Successive Interference Cancellation with Imperfect Channel Estimation," *IEEE Trans. Wireless Comm.*, vol. 2, no. 2, pp. 375–383, 2003.

[23] C. Xiong, G.Y.Li, S. Zhang, Y.Chen, and S. Xu, "Energy-and Spectral-Efficiency Tradeoff in Downlink OFDMA Networks," *IEEE transactions on wireless communications*, 10(11), pp.3874–3886, 2011.

[24] S. Han, C.-H. I, Z. Xu, Q. Sun, "Energy Efficiency and Spectrum Efficiency Co-Design : From NOMA to Network NOMA," *IEEE COMSOC MMTTC E-Letter*, vol. 9, no. 5, pp.21–25, 2014

[25] I. Chih-Lin, C. Rowell, S. Han, Z. Xu, G. Li, and Z. Pan, "Toward Green and Soft : A 5G Perspective," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 66–73, 2014.

[26] Mojtaba Vaezi, Zhiguo Ding, H. Vincent Poor, "Multiple Access Techniques for 5g Wireless Networks and Beyond," Springer International Publishing AG, 2019.

[1] S. Tabbane, P. Godlewsk, Réseaux GSM-DCS, des principes à la norme. Eyrolles, 1997.

[2] X. Lagrange, Principes et évolutions de l'UMTS , Lavoisier, 2005

[3] P. Beaufils, Z. Choukair, S. Tabbane, Réseaux 4G , Technologies et services. Eyrolles, 2008.

[6] Saad Z. Asif, 5G Mobile Communications Concepts and Technologies. CRC Press,2018.

[7] Gottapu Sasibhushana Rao, Mobile Cellular Communication. Pearson Education,2013.

[8] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, 4G LTE/LTE-Advanced for mobile broadband. Elsevier, 2011.

[4] [http://www.efort.com/r\\_tutoriels/5G\\_EFORT.pdf](http://www.efort.com/r_tutoriels/5G_EFORT.pdf)

[5] <https://eena.org/document/5g-in-emergency-services>

[9][https://www.itu.int/dms\\_pub/itur/oth/0a/06/R0A0600005D0001PDFE.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itur/oth/0a/06/R0A0600005D0001PDFE.pdf)

---

## *Résumé*

---

Les réseaux sans fil de cinquième génération (5G) sont confrontés à divers défis tel que la rareté de spectre radio. Afin de relever certains de ces défis, de nouveaux schémas d'accès multiple sont en cours de développement. Ce cadre de recherche a récemment suscité l'attention des chercheurs. Dans ce travail nous introduisons d'abord les schémas d'accès multiple orthogonal (OMA). Ensuite, nous accordons une attention particulière à une nouvelle technique d'accès prometteuse, accès multiple non orthogonal, qui permet à plusieurs utilisateurs de partager le même bloc de ressources (temps, fréquence, code d'étalement), et nous divisons les schémas NOMA dominant existant en deux catégories : le multiplexage du domaine de puissance et le multiplexage du domaine de code. On s'intéresse particulièrement à l'accès multiple non orthogonal dans le domaine de puissance. De plus, nous discutons les avantages de cette technique et les défis à surmonter dans NOMA. Enfin, les performances de débit de données de l'OFDMA et de NOMA sont évaluées et montrent comment l'efficacité spectrale peut être augmentée avec NOMA.

**Mots clés :** Accès multiple non orthogonal (NOMA), accès multiple orthogonal (OMA), cinquième génération (5G), domaine de puissance NOMA (PD-NOMA), domaine de code (CD-NOMA), annulation d'interférence successive (SIC).

---

## *Abstract*

---

Fifth generation (5G) wireless networks face various challenges such as the scarcity of radio spectrum. In order to meet some of these challenges, new multiple access schemes are being developed. This research framework has recently attracted the attention of researchers. In this work we first introduce orthogonal multiple access (OMA) schemes. Next, we pay special attention to a promising new access technique, non-orthogonal multiple access, which allows multiple users to share the same block of resources (time, frequency, spreading code), and we divide the patterns Dominant NOMA existing in two categories: power domain multiplexing and code domain multiplexing. We are particularly interested in non-orthogonal multiple access in the power domain. Additionally, we discuss the benefits of this technique and the challenges to be overcome in NOMA. Finally, the data rate performance of OFDMA and NOMA is evaluated and shows how spectral efficiency can be increased with NOMA.

**Keyword:** NOMA, OMA, 5G, PD-NOMA, CD-NOMA, SIC.