

Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

## Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière :Télécommunications

Spécialité : Réseaux et télécommunications

### Thème

**Etude comparative des techniques d'accès multiple en communications  
radio Mobile en 5G**

**Préparé par :**

- MESSAOUDI Yasmina
- MESSAOUDENE Sarah

**Dirigé par :**

**Mr.BELLAHSENE Hocine**

**Examiné par :**

Mr.BOUALEM Mohammed

Mr.MEKHMOUKH Abdenour

# Remerciements

Au seuil de cette page, nous exprimons notre profonde reconnaissance envers **Dieu** Tout-Puissant, source de force et de persévérance, qui nous a accompagnés tout au long de ce parcours académique.

Nos remerciements les plus sincères vont à notre directeur de recherche, **Monsieur BELLAHSENE**, dont l'expertise, les conseils avisés et le dévouement sans faille ont été les piliers essentiels de notre travail.

Nous tenons également à remercier chaleureusement le président du jury, **Monsieur BOUALEM**, ainsi que l'examineur, **Monsieur MEKHMOUKH**, pour leur engagement à évaluer et à enrichir notre recherche.

À nos familles, nous exprimons une gratitude profonde pour leur soutien indéfectible, leur patience et leur encouragement constant, qui ont été des sources d'inspiration inestimables.

Enfin, nous souhaitons témoigner notre reconnaissance à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration de ce mémoire. Leur soutien, leurs conseils et leurs encouragements ont été d'une valeur inestimable dans la réalisation de ce travail.

# Dédicaces

À mon cher père, même si tu n'es plus physiquement parmi nous, ton esprit continue de briller dans chaque réussite que je réalise. Ton amour, ta sagesse et ta force m'ont guidé tout au long de ce parcours académique. Ce mémoire est un hommage à toi et à l'héritage que tu as laissé derrière toi. Tes valeurs et ton soutien indéfectible resteront à jamais gravés dans mon cœur. Je suis fier de pouvoir partager cette étape de ma vie avec toi en pensée, et je dédie ce travail à ta mémoire avec tout mon amour et ma gratitude.

Yasmina

# Dédicaces

À ma mère et mon père, les piliers solides de ma vie, dont les sacrifices et l'amour indéfectible ont tracé le chemin de mon parcours académique. À mes chers grands-parents, dont la sagesse et le soutien inconditionnel ont éclairé chaque étape de mon chemin. À ma sœur, complice de mes joies et confidente de mes peines, dont la présence et le soutien ont été une source de force et d'inspiration. À ma copine, dont la présence aimante et le soutien constant ont été mes réconforts. À vous tous, qui avez cru en moi et m'avez soutenu avec affection, je vous dédie ce mémoire avec une profonde gratitude. Votre soutien a été la clé de mes succès et de mes accomplissements.

Sarah

# Table des matières

Table des matières	I
Table des figures	V
Liste des tableaux	VIII
Liste des abréviations	IX
Introduction générale	1
<b>1 Généralités sur la technologie 5G</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction . . . . .	3
1.2 Présentation de la cinquième génération 5G . . . . .	3
1.3 Les caractéristiques de la 5G . . . . .	4
1.4 Les services de la 5G . . . . .	4
1.5 Allocation des fréquences . . . . .	5
1.6 Technologies émergentes pour réseaux 5G . . . . .	6
1.6.1 Les ondes millimétriques . . . . .	6
1.6.2 Les petites cellules . . . . .	7
1.6.3 Le massive MIMO (Multiple Inputs - Multiple Outputs) . . . . .	7
1.6.4 Le beamforming . . . . .	8
1.6.5 Le full duplex . . . . .	9
1.7 Architecture du réseau 5G . . . . .	9
1.8 Conclusion . . . . .	10
<b>2 Les techniques d'accès multiple dans la 5G</b>	<b>11</b>
2.1 Introduction . . . . .	11
2.2 L'accès multiple non orthogonal (NOMA) . . . . .	11
2.2.1 Domaine de puissance NOMA . . . . .	11
2.2.2 Domaine de code NOMA . . . . .	12

2.2.3	La NOMA en liaison descendante . . . . .	12
2.2.4	La NOMA en liaison montante . . . . .	13
2.2.5	La NOMA multi-antennes . . . . .	13
2.2.5.1	La technique SC-SIC . . . . .	14
2.2.5.2	SC-SIC par groupe . . . . .	15
2.3	L'accès multiple spatiale (SDMA) . . . . .	15
2.3.1	La technique MU-LP . . . . .	16
2.4	L'accès multiple avec répartition du débit (RSMA) . . . . .	17
2.4.1	La RSMA en la liaison montante . . . . .	17
2.4.2	RSMA en la liaison descendante . . . . .	18
2.4.3	RS généralisé . . . . .	20
2.4.4	1-layer RS . . . . .	21
2.4.5	2-layer HRS . . . . .	21
2.4.6	Comparaison des stratégies RSMA . . . . .	22
2.5	Conclusion . . . . .	23
<b>3</b>	<b>Caractéristiques essentielles du système et évaluation des performances des techniques d'accès</b>	<b>24</b>
3.1	Introduction . . . . .	24
3.2	Les caractéristiques des systèmes de communications 5G . . . . .	25
3.2.1	Le rapport signal sur bruit SNR . . . . .	25
3.2.2	La transmission conjointe unicast et multicast . . . . .	25
3.2.3	La précision du CSI (Channel State Information) . . . . .	25
3.3	évaluation des performances . . . . .	26
3.3.1	Région de débits . . . . .	26
3.3.2	La somme des débits pondérés WSR (Weighted Sum Rate) . . . . .	26
3.3.3	L'efficacité Energétique . . . . .	27
3.3.4	La région de DoF . . . . .	27
3.3.4.1	Le degré de liberté . . . . .	27
3.3.4.2	La somme de DoF (Sum-DoF) . . . . .	28
3.3.4.3	Le Max-Min Fairness (MMF) . . . . .	28
3.4	La comparaison des Sum-DoF et MMF-DoF pour NOMA, SDMA et RSMA . . . . .	28
3.5	Comparaison des stratégies d'accès multiple . . . . .	29
3.6	Conclusion . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Simulations &amp; interprétations des résultats</b>	<b>31</b>

4.1	Introduction . . . . .	31
4.2	Présentation de matlab . . . . .	31
4.2.1	CVX Toolbox . . . . .	32
4.2.2	YALMIP Toolbox . . . . .	32
4.3	Présentation et analyse des résultats . . . . .	32
4.3.1	La Région de débits réalisable . . . . .	32
4.3.1.1	Déploiement sous-chargé à 2 utilisateurs avec un CSIT parfait . . . . .	33
4.3.1.2	La Transmission conjointe unicast et multicast dans des déploiements sous-chargés de deux utilisateurs avec CSIT parfait . . . . .	36
4.3.1.3	Cas de deux utilisateurs sous-chargé avec un CSIT imparfait . . . . .	38
4.3.2	La somme de débits pondérés . . . . .	40
4.3.2.1	Un déploiement sous-chargé à trois utilisateurs avec CSIT parfait . . . . .	40
4.3.3	La région d'efficacité énergétique réalisable . . . . .	41
4.3.4	La région de degré de liberté . . . . .	43
4.4	Conclusion . . . . .	44
	<b>Conclusion générale</b>	<b>45</b>
	<b>A</b>	<b>46</b>
A.1	L'évolution des réseaux mobiles . . . . .	46
A.1.1	La technologie 1G . . . . .	46
A.1.2	La technologie 2G . . . . .	47
A.1.3	La technologie 3G . . . . .	47
A.1.4	La technologie 4G . . . . .	48
A.2	Les systèmes de communications 5G . . . . .	48
A.3	Déploiement des réseaux 5G . . . . .	49
	<b>B</b>	<b>50</b>
B.1	Les avantages du RSMA . . . . .	50
B.1.1	Universalité . . . . .	50
B.1.2	Flexibilité . . . . .	50
B.1.3	Robustesse . . . . .	50
B.1.4	efficacité spectrale . . . . .	51
B.1.5	Meilleure efficacité énergétique . . . . .	51

B.1.6	Amélioration de la qualité de service et de l'équité . . . . .	51
B.1.7	Réduction de la complexité . . . . .	51
B.1.8	Extension de la couverture . . . . .	52
B.1.9	Faible latence . . . . .	52

# Table des figures

1.1	Services de la 5G [Res]. . . . .	5
1.2	Allocation des fréquences [Dig24]. . . . .	6
1.3	Ondes millimétriques [Dig21]. . . . .	6
1.4	Mise en place des petites cellules [Lit23]. . . . .	7
1.5	Massive MIMO [Com23]. . . . .	8
1.6	La technologie beamforming [Aut24]. . . . .	8
1.7	La Technologie Full Duplex [CA20]. . . . .	9
1.8	Architecture du réseau 5G [Ano19]. . . . .	10
2.1	Le domaine de la puissance NOMA[Ell21]. . . . .	12
2.2	Modèle du système de liaison descendante à deux utilisateurs [préséa].	13
2.3	Modèle NOMA de liaison montante avec deux utilisateurs [préséb].	13
2.4	Architecture de l'émetteur-récepteur de K-user uplink RSMA [Mis22].	17
2.5	Modèle RS à 1 couche de K utilisateurs [MCL18b]. . . . .	21
2.6	HRS à 2 couches[MCL18b]. . . . .	22
3.1	Interprétation de $\alpha$ en termes de bits de rétroaction . . . . .	29
4.1	La région de débits réalisables pour les différentes stratégies dans un déploiement à 2 utilisateurs sous-chargé, avec un CSIT parfait, SNR= 20 dB, $\gamma = 0.5$ . . . . .	33
4.2	La région de débits réalisables pour les différentes stratégies dans un déploiement à 2 utilisateurs sous-chargé avec un CSIT parfait, SNR= 20 dB, $\gamma = 0.75$ . . . . .	34
4.3	La région de débits réalisables pour les différentes stratégies dans un déploiement à 2 utilisateurs sous-chargé avec un CSIT parfait, SNR= 20 dB, $\gamma = 1$ . . . . .	34
4.4	la région de débits réalisable pour les différentes stratégies dans un déploiement à 2 utilisateurs sous-chargé un CSIT parfait, $\gamma = 1$ , SNR= 10 dB. . . . .	35

4.5	la région de débits réalisable pour les différentes stratégies dans un déploiement à 2 utilisateurs sous-chargé un CSIT parfait, $\gamma = 1$ , $SNR = 5$ dB. . . . .	35
4.6	la région de débits réalisable pour les différentes stratégies dans un déploiement à 2 utilisateurs sous-chargé un CSIT parfait, $\gamma = 1$ , $SNR = -5$ dB. . . . .	36
4.7	la région de débits réalisable pour les différentes stratégies dans une transmission unicast et multicast avec un CSIT parfait, $\gamma = 1$ , $R_0^{th} = 0.5$ bit/s/Hz. . . . .	37
4.8	La région de débits réalisable pour les différentes stratégies dans une transmission unicast et multicast avec un CSIT parfait, $\gamma = 1$ , $R_0^{th} = 1.5$ bit/s/Hz. . . . .	37
4.9	la région de débits réalisable pour les différentes stratégies dans un déploiement à 2 utilisateurs sous-chargé un CSIT imparfait, $\gamma = 1$ , $SNR = 10$ dB. . . . .	38
4.10	la région de débits réalisable pour les différentes stratégies dans un déploiement à 2 utilisateurs sous-chargé un CSIT imparfait, $\gamma = 1$ , $SNR = 5$ dB. . . . .	38
4.11	la région de débits réalisable pour les différentes stratégies dans un déploiement à 2 utilisateurs sous-chargé un CSIT imparfait, $\gamma = 1$ , $SNR = -5$ dB. . . . .	39
4.12	la région de débits réalisable pour les différentes stratégies dans un déploiement à 2 utilisateurs sous-chargé un CSIT imparfait, $\gamma = 1$ , $SNR = 20$ dB. . . . .	39
4.13	WSR en fonction du SNR pour un déploiement sous-chargé à trois utilisateurs avec un CSIT parfait, $\gamma_1 = 1$ , $\gamma_2 = 0.3$ , $\mu_1 = 0.2$ , $\mu_2 = 0.3$ , $\mu_3 = 0.5$ , $N_c = 4$ , $SNR \in [0 - 30]$ dB. . . . .	40
4.14	WSR en fonction du SNR pour un déploiement sous-chargé à trois utilisateurs avec un CSIT parfait, $\gamma_1 = 1$ , $\gamma_2 = 0.3$ , $\mu_1 = 0.2$ , $\mu_2 = 0.3$ , $\mu_3 = 0.5$ , $N_c = 4$ , $SNR \in [-10 - 20]$ dB. . . . .	41
4.15	Comparaison des régions d'efficacité énergétique réalisables différentes schémas, $\gamma = 0.3$ , $P_{dyn} = 27$ dBm. . . . .	42
4.16	Comparaison des régions d'efficacité énergétique réalisables différentes schémas, $\gamma = 0.3$ , $P_{dyn} = 40$ dBm. . . . .	42
4.17	Comparaison des régions d'efficacité énergétique réalisables différentes schémas, $\gamma = 1$ , $P_{dyn} = 40$ dBm. . . . .	43
4.18	Gain de multiplexage total en fonction du nombre d'utilisateurs $K$ pour $M = 6$ . . . . .	43
4.19	Gain de multiplexage MMF en fonction du nombre d'utilisateurs $K$ pour $M = 6$ . . . . .	44
A.1	L'évolution des réseaux mobiles [BBN24]. . . . .	46
A.2	Connectivité dans la 5G [EMF24]. . . . .	48

A.3 Architecture 5G-NSA et 5G-SA [ <a href="#">Att+22</a> ]. . . . .	49
--	----

# Liste des tableaux

2.1	Comparaison des stratégies RSMA[Mao+22]. . . . .	23
3.1	Comparaison des Sum-DoF de différentes multiples d'accès avec une connaissance parfaite et imparfaite du canal (CSIT) [Cle+21]. . . . .	29
3.2	Comparaison des MMF-DoF de différentes multiples d'Accès avec une connaissance parfaite et imparfaite du canal (CSIT) [Cle+21]. . . . .	29
3.3	Comparaison qualitative de la complexité de différentes stratégies d'accès multiple [Mao+22]. . . . .	30

# Liste des abréviations

<b>G</b>	Génération
<b>1G</b>	Première Génération
<b>2G</b>	Deuxième Génération
<b>3G</b>	Troisième Génération
<b>4G</b>	Quatrième Génération
<b>5G</b>	Cinquième Génération
<b>6G</b>	Sixième Génération
<b>IP</b>	Internet Protocol
<b>UIT</b>	Union internationale des télécommunications
<b>MIMO</b>	Multiple-Input Multiple-Output
<b>MISO</b>	Multiple Input Single Output
<b>IoT</b>	Internet of Things
<b>eMBB</b>	Enhanced Mobile Broadband
<b>mMTC</b>	Massive Machine-Type Communications
<b>uRLLC</b>	Ultra-Reliable and Low-Latency Communication
<b>mmWave</b>	Millimeter Wave
<b>GHz</b>	GigaHertz
<b>MHz</b>	MégaHertz
<b>TCP/IP</b>	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
<b>PDU</b>	Protocol Data Unit
<b>Wwww</b>	World Wide Wireless Web
<b>HSPA</b>	High Speed Packet Access
<b>NG-RAN</b>	New Generation Of Radio Access Network
<b>NR</b>	New Radio
<b>AN</b>	Access Network
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
<b>AMPS</b>	Advanced Mobile Phone System
<b>FDMA</b>	Frequency Division Multiple Access
<b>TDMA</b>	Time Division Multiple Access
<b>CDMA</b>	Code Division Multiple Access
<b>GSM</b>	Global System for Mobile Communication
<b>SMS</b>	Short Message Service
<b>MMS</b>	Multimedia Messaging Service
<b>GPRS</b>	General Packet Radio System

<b>EDGE</b>	Enhanced Data Rate for Global Evolution
<b>W-CDMA</b>	Wideband Code Division Multiple Access
<b>LTE</b>	Long-Term Evolution
<b>Kbit/s</b>	kilobit par seconde
<b>Mbitps</b>	Mégabit par seconde
<b>SA</b>	Stand Alone
<b>NSA</b>	Non-Stand-Alone
<b>UE</b>	User Equipment
<b>5GC</b>	5G Core Network
<b>dB</b>	Décibel
<b>3GPP</b>	Third Generation Partnership Project
<b>IRS</b>	Intelligent Reflecting Surface
<b>OMA</b>	Orthogonal Multiple Access
<b>NOMA</b>	Non-Orthogonal Multiple Access
<b>SDMA</b>	Space Division Multiple Access
<b>RSMA</b>	Rate Splitting Multiple Access
<b>SC</b>	Superposition Coding
<b>SIC</b>	Successive Interference Cancellation
<b>BS</b>	Base Station
<b>CSI</b>	Channel State Information
<b>CSIT</b>	Channel State Information at the Transmitter
<b>SINR</b>	Signal Interference Noise Ratio
<b>WSR</b>	Weighted Sum Rate
<b>DPC</b>	Dirty Paper Coding
<b>MU-LP</b>	Multi User-Linear Precoding
<b>DoF</b>	Degree of Freedom
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>RS</b>	Rate Splitting
<b>AWGN</b>	Additive White Gaussian Noise
<b>HRS</b>	Hierarchical Rate Splitting
<b>MMSE</b>	Minimum Mean Square Error
<b>SNR</b>	Signal-to-Noise Ratio
<b>EE</b>	Energy Efficiency
<b>MMF</b>	Max-Min Fairness
<b>DL</b>	DownLink
<b>UL</b>	UpLink
<b>UMTS</b>	Universal Mobile Telecommunications System

# Introduction générale

L'arrivée de la 5G représente un saut technologique majeur par rapport à la 4G LTE, ouvrant la voie à une multitude de nouvelles possibilités pour les services existants et à l'émergence de l'Internet des objets (IoT). Pour répondre aux besoins croissants de cette ère digitale, des solutions innovantes sont indispensables afin d'atteindre des vitesses de transmission fulgurantes, une latence réduite, une capacité accrue et une meilleure utilisation du spectre. La nouvelle technologie 5G, basée sur un ensemble de technologies fondamentales, constitue la clé de voûte de cette révolution. Grâce à ces avancées, la 5G permettra de déployer des réseaux d'une performance inégalée, favorisant l'éclosion de services inédits, de nouveaux écosystèmes et de sources de revenus inexploitées.

Afin de satisfaire aux exigences de la 5G, il est crucial d'examiner diverses méthodes d'accès multiple et d'évaluer leurs résultats. Plusieurs utilisateurs peuvent accéder simultanément au même canal de communication grâce à l'accès multiple. Dans le cadre de la 5G, deux méthodes d'accès multiple sont couramment utilisées : l'accès non orthogonal (NOMA) et l'accès multiple par répartition dans l'espace (SDMA). Toutefois, la 5G met en place une nouvelle méthode connue sous le nom d'accès multiple à division de débit (RSMA). Le RSMA sépare un message en deux parties, c'est-à-dire commune et privée, et les transmet de façon parallèle. Le RSMA combine les bénéfices du NOMA et du SDMA en utilisant le précodage linéaire et l'annulation successive des interférences (SIC). Il gère les perturbations en les considérant comme du bruit (SDMA) et en les décodant entièrement (NOMA). Cette méthode unifiée permet d'améliorer les performances des réseaux 5G grâce à la RSMA.

Cette étude vise à approfondir l'étude et la simulation du RSMA afin de démontrer son caractère optimal pour les systèmes 5G et sa capacité à surpasser les limitations du NOMA et du SDMA. Les performances du RSMA sont évaluées en termes d'efficacité énergétique, de débit maximal et d'autres indicateurs clés de performance, ce qui souligne son potentiel d'amélioration des réseaux sans fil de cinquième génération.

Afin de concrétiser cet objectif, notre mémoire est organisée en quatre chapitres :

- Le premier chapitre introductif présente les généralités fondamentales de la technologie 5G en mettant l'accent sur ses caractéristiques, les services qu'elle offre et la répartition des fréquences allouées à son déploiement. Il explore également les technologies émergentes qui sous-tendent la 5G, telles que les ondes millimétriques, les petites cellules, le MIMO massif, le beamforming et le duplex intégral. Puis son architecture. Ces éléments essentiels posent les bases pour les chapitres suivants qui approfondissent les aspects techniques

et les applications de la 5G.

- Le deuxième chapitre s'aventure dans le domaine crucial des techniques d'accès multiple employées par la technologie 5G. Il explore en profondeur les concepts fondamentaux de NOMA, SDMA et RSMA, en mettant l'accent sur ce dernier. De plus, Il présente en détail la technique RSMA, à la fois sur la liaison descendante et montante. Enfin, il compare différentes stratégies RSMA telles que 1-layer RS, 2-layer HRS et RS généralisé.
- Le troisième chapitre explore les Caractéristiques essentielles du système et évaluation des performances des techniques d'accès. Il aborde des aspects tels que la qualité du canal (CSI), le rapport signal sur bruit (SNR). De plus, il présente les concepts de transmission unicast et multicast, et décrit différentes mesures de performance telles que, la région de débits, la somme des débits pondéré (WSR), l'efficacité énergétique et la région de degrés de liberté (DoF).
- Le dernier chapitre explore les résultats obtenus par simulation et les interprète en profondeur. Il détaille les résultats obtenus, en se concentrant sur différentes mesures de performance clés. Ces mesures incluent la région de débits, la région d'efficacité énergétique (EE) et la région de degrés de liberté (DoF). Les résultats sont analysés pour comparer les performances des techniques NOMA, SDMA et RSMA.

Nous terminons par une conclusion générale qui récapitule les résultats obtenus.

# Chapitre 1

## Généralités sur la technologie 5G

### 1.1 Introduction

De nos jours, dans un monde de très grande mobilité, la vitesse et la capacité des systèmes de transmission sont des éléments essentiels afin de pouvoir maintenir les gens du monde entier en communication. La première génération de communications mobiles (1G) utilisait la transmission analogique qui se limitait principalement à transmettre la voix. Alors que la deuxième génération (2G) a introduit des technologies numériques telles que la transmission de données par SMS, la troisième génération (3G) visait à fournir une transmission de données à haut débit. Lors de l'arrivée de la (4G) (quatrième génération), les services (IP) (Internet Protocol) ont été introduits. L'émergence des systèmes (5G)(cinquième génération) est certainement une véritable révolution.

La 5G est une nouvelle génération des standards de la téléphonie mobile qui va succéder à la 4G LTE. Cette évolution va s'étendre à chaque objet physique dans le monde. La 5G ne représente pas seulement une évolution des réseaux précédents, mais elle correspond à une nouvelle fondation technologique développée pour soutenir les demandes croissantes des clients. Elle répond également aux différents besoins, comme l'augmentation des débits pour les usages courants de la mobilité et une latence de 1 ms ou moins.

Dans ce chapitre, notre attention est principalement portée sur la cinquième génération de communications sans fil (5G), ses caractéristiques et ses principaux services. Puis, nous allons présenter ses fréquences et citer les technologies émergentes pour le réseau 5G telles que les ondes millimétriques, les micros-cellules, le Massive MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), le beamforming et le full duplex. Nous terminons par donner son architecture réseau.

### 1.2 Présentation de la cinquième génération 5G

La 5G est l'une des plus récentes avancées dans le domaine des communications sans fil. Cette technologie, développée en 2020, offre une latence extrêmement basse et une fiabilité extrêmement élevée [[Ahm+20](#)].

La 5G ne se limite plus à l'univers des opérateurs de téléphonie mobile et des communications grand public, mais offre de nouvelles opportunités et facilite la coexistence d'applications et d'usages diversifiés. Elle rend possible le transport et le traitement de gros volumes de données, la connexion d'un très grand nombre de dispositifs communicants, avec une fiabilité accrue [Dam20].

### 1.3 Les caractéristiques de la 5G

Les caractéristiques de cette technologie sont variées et couvrent de multiples domaines :

- **Couverture élevée** : La 5G vise une couverture élevée, permettant aux technologies de se connecter à partir de n'importe quel endroit. Avec une disponibilité du réseau pouvant atteindre 99,999% et une couverture proche de 100%, divers services peuvent accéder au réseau [Att+22].
- **Débit élevé** : la technologie 5G prendra en charge de nombreux services et applications nécessitant des débits de données élevés jusqu'à 10 Gbps, soit 10 fois plus rapide que le réseau 4G [Att+22].
- **Faible latence** : Un Temps de latence très faible est l'un des besoins les plus importants de la 5G la latence étant le temps qu'il faut à une demande pour effectuer un aller-retour de bout en bout, elle est réduite en 1 ms [Att+22].
- **Large bande passante** : La technologie 5G offre une bande passante 1000 fois supérieure par unité de surface, ce qui permet de relier de grands appareils dans de petites zones et d'augmenter la capacité jusqu'à 10 Gbps [Att+22].

### 1.4 Les services de la 5G

Plusieurs services d'application 5G ont été identifiés selon les normes de l'Union internationale des télécommunications (UIT). Elles se reposent sur trois principaux services expliqués dans ce qui suit et illustrés par la figure 1.1

- **Le service eMBB (enhanced Mobile Broadband)** : Offre aux utilisateurs la possibilité d'accéder à des contenus demandant un débit élevé. Il garantit aux utilisateurs finaux la possibilité de télécharger un film de grande qualité en seulement quelques instants [Alo21].
- **mMTC (massive machine-type communication)** : Ce service propose également la possibilité d'avoir une densité d'objets en 5G accrue. De cette manière, il serait possible d'installer 1 million d'appareils sur un mètre carré sans aucun souci (un Internet of Things plus robuste et fiable) [Alo21].
- **L'URLLC (Ultra Reliable and Low Latency Communications)** : est un service qui vise à réduire la latence de bout en bout et à renforcer la fiabilité des appareils de transmission. Il occupe une position cruciale dans la sécurité du véhicule autonome [Alo21].

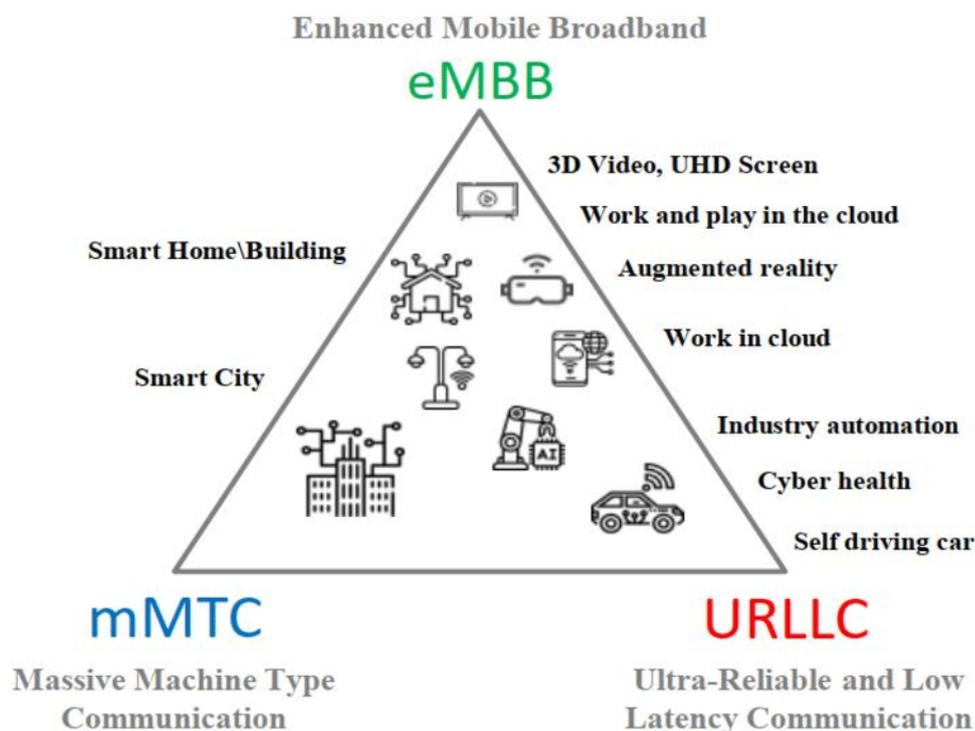


FIGURE 1.1 – Services de la 5G [Res].

## 1.5 Allocation des fréquences

Les autorités chargées de la régulation des télécommunications de chaque pays déterminent les fréquences pour la 5G. Elle a été développée pour être utilisée sur des fréquences radio allant de moins de 1 GHz à des fréquences extrêmement élevées, connues sous le nom " d'ondes millimétriques" (ou mmWave). À mesure que la fréquence diminue, le signal peut se déplacer sur de plus longues distances. À mesure que la fréquence augmente, le signal peut transporter plus de données.

Trois plages de fréquences pour les réseaux 5G comme montrer dans la figure 1.2 :

- **La large bande connue sous le nom de bandes millimétriques (mm-Wave) :** Les fréquences qu'il utilise vont de 24 Ghz à des fréquences bien plus élevées, allant jusqu'à 100 GHz. Cependant, en raison des obstacles auxquels les hautes fréquences sont confrontées, cette technologie est de courte durée par nature. Par conséquent, la diffusion de la 5G à haute bande est restreinte et requiert une infrastructure cellulaire plus étendue pour une couverture optimale.
- **La bande intermédiaire appelée "fréquence sub-6 GHz" :** se trouve en dessous des 6 GHz et au-dessus de 1 GHz. Elle a une portée plus étendue et est donc plus adaptée aux zones urbaines. Son débit peut atteindre plusieurs centaines de Mbps.
- **La bande basse 5G :** fonctionne à une fréquence inférieure à 2 GHz et propose une couverture étendue.

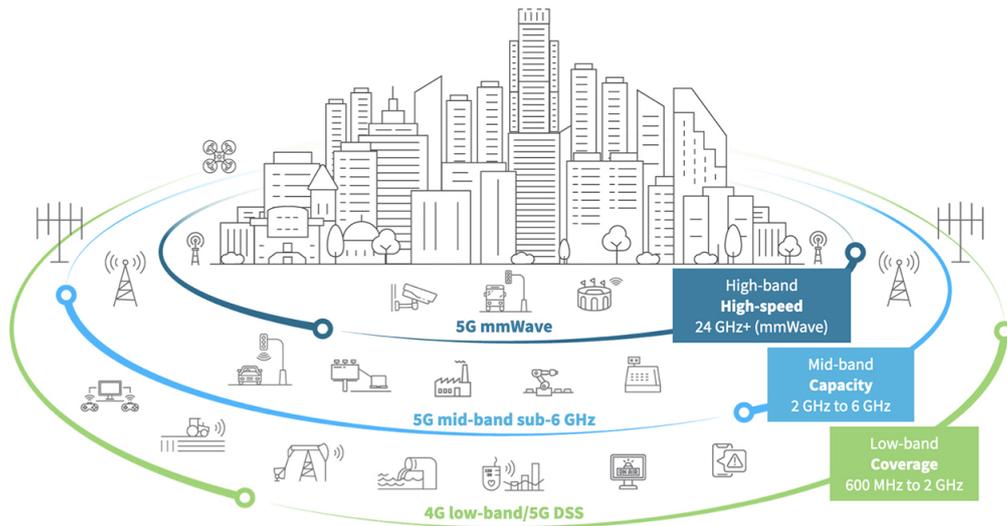


FIGURE 1.2 – Allocation des fréquences [Dig24].

## 1.6 Technologies émergentes pour réseaux 5G

### 1.6.1 Les ondes millimétriques

Les fréquences inférieures à 6 GHz sont utilisées pour les communications cellulaires, tandis que les fréquences supérieures sont réservées à d'autres services. Cependant, la demande croissante de données a entraîné une congestion du spectre des fréquences radio, limitant la bande passante et rendant la connexion plus lente et moins fiable. Une solution potentielle consiste à utiliser des fréquences supérieures à 6 GHz pour les communications sans fil. Appelées ondes millimétriques, caractérisées par une fréquence de 24 GHz à 300 GHz et une longueur d'onde allant de 1 à 10 mm. Comme les ondes millimétriques ont une longueur d'onde plus faible, elles ne conviennent pas aux applications à longue portée, ne peuvent pas pénétrer dans les bâtiments et sont absorbées par la pluie. Afin de résoudre ces problèmes, d'autres technologies sont nécessaires [CA20].

Le diagramme présenté sur la figure 1.3 illustre les Ondes millimétriques :

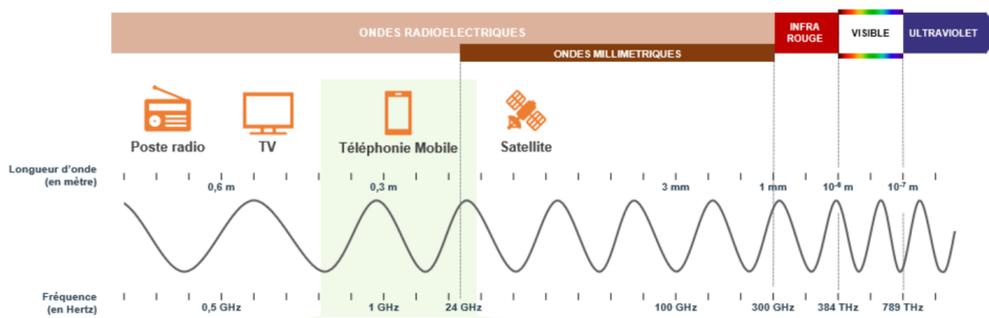


FIGURE 1.3 – Ondes millimétriques [Dig21].

## 1.6.2 Les petites cellules

Les petites cellules sont des stations de base à faible puissance comme montrer dans la figure 1.4, qui peuvent être placées tous les 100 mètres pour couvrir de petites zones géographiques. Elles joueront un rôle important dans la fourniture d'un haut débit mobile et d'une latence ultra-faible pour la 5G. Les petites cellules sont divisées en microcellules, femtocellules et picocellules, cela grâce à la zone de couverture et au nombre d'utilisateurs. Elles sont utilisées pour diminuer la charge sur le réseau en répartissant la capacité de chaque antenne entre moins d'utilisateurs, ce qui améliore l'expérience globale des utilisateurs [CA20].



FIGURE 1.4 – Mise en place des petites cellules [Lit23].

## 1.6.3 Le massive MIMO (Multiple Inputs - Multiple Outputs)

Le MIMO massif est la technologie la plus captivante pour la 5G . Comme on peut le voir dans la figure 1.5, Il s'agit d'équiper les stations de base avec des milliers d'antennes , ce qui permet de faciliter leur fonctionnement. De cette manière, il est possible de répondre simultanément à plusieurs utilisateurs à partir des mêmes ressources en temps et en fréquence. La focalisation spatiale des faisceaux d'antennes permet d'améliorer l'efficacité spectrale et le débit pour l'utilisateur désiré, tout en diminuant les interférences avec les utilisateurs à proximité. Cette technologie offre des avantages tels que l'amélioration de la fiabilité, la réduction de la latence et l'augmentation des débits [CA20].

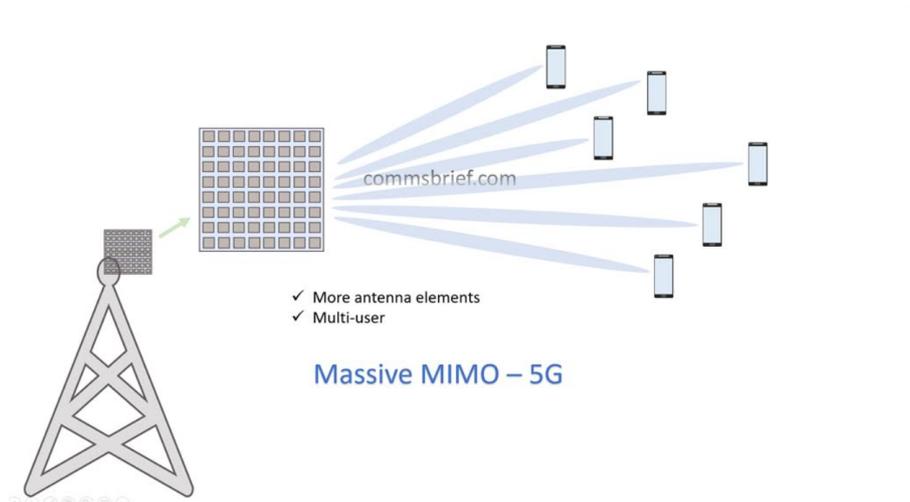


FIGURE 1.5 – Massive MIMO [[Com23](#)].

### 1.6.4 Le beamforming

La technologie du Beamforming repose sur l'utilisation d'antennes intelligentes pour l'émission et la réception. Comme illustré dans la figure 1.6, cette technique également connue sous le nom de filtrage spatial ou formation de faisceaux, aide les stations de base à trouver des chemins adaptés pour fournir des données aux utilisateurs. Elle permet de focaliser les signaux provenant de plusieurs antennes en un faisceau puissant, minimisant l'énergie dans les lobes latéraux à l'extrémité de l'émetteur. En ce qui concerne le récepteur, il regroupe les signaux reçus et les dirige dans une seule direction, tandis qu'il rejette les signaux provenant d'autres directions. Cette technologie présente plusieurs avantages pour les réseaux 5G [[HF17](#)].

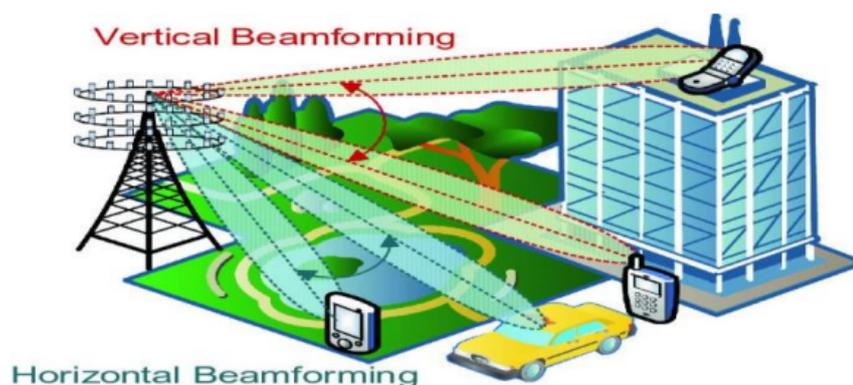


FIGURE 1.6 – La technologie beamforming [[Aut24](#)].

### 1.6.5 Le full duplex

Le full duplex est une technologie de plus en plus utilisée dans les réseaux de communication sans fil, permettant de transporter l'information dans les deux sens (bidirectionnel). Le concept full duplex 5G vise à émettre et recevoir simultanément l'information sur les mêmes fréquences. Cette méthode présente des avantages tels qu'elle peut doubler la capacité des réseaux sans fil au niveau de leur couche physique, mais elle peut également entraîner des interférences et des échos qui peuvent affecter la qualité de la communication (voir la figure 1.7) [IEE23].

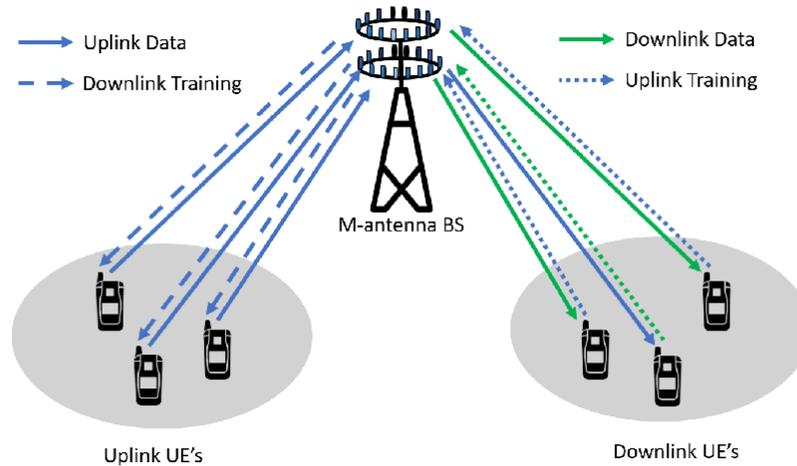


FIGURE 1.7 – La Technologie Full Duplex [CA20].

## 1.7 Architecture du réseau 5G

Un réseau 5G est composé d'un réseau d'accès 5G (AN) (Access Network) et d'un réseau central 5G (5GC) (Core Network). Comme on peut le voir dans la figure 1.8, Le réseau d'accès lui-même est constitué d'un réseau d'accès radio de nouvelle génération (NG-RAN) (New Generation of Radio Access Network), qui utilise la nouvelle interface radio 5G (NR) (New Radio), et/ou d'un AN non-3GPP (par exemple WiFi, xDSL, etc.) se connectant à un réseau central 5G. Les différentes entités du réseau sont connectées par un réseau de transport TCP/IP sous-jacent, qui prend en charge la qualité de service différenciée (QoS) (Quality Of Service) [Ano19].

Un réseau 5G connecte les équipements (UE) (User Equipment) aux réseaux de données externes. La session PDU représente le service de connectivité 5G, elle est constituée par une séquence de tunnels NG dans le 5GC plus un ou plusieurs porteurs radios sur l'interface radio. Cet ensemble de "tuyaux" relie finalement l'UE à ses fonctions de contrôle et au réseau de données externe pour l'échange de trafic utilisateur [Ano19].

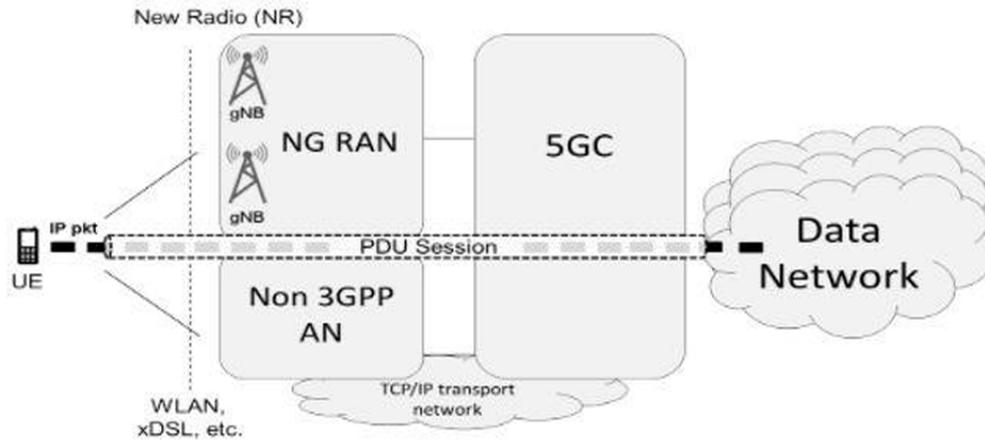


FIGURE 1.8 – Architecture du réseau 5G [Ano19].

## 1.8 Conclusion

Ce chapitre présente la nouvelle génération de technologie mobile la 5G. Elle répond aux besoins quotidiens grâce à une bande passante plus large qui permet la connexion d'un plus grand nombre de véhicules et de machines, et offre un faible temps de latence. Elle améliore les réseaux existants et développe de nouveaux services. Le prochain chapitre abordera les techniques d'accès multiples en communication radio mobile en 5G.

# Chapitre 2

## Les techniques d'accès multiple dans la 5G

### 2.1 Introduction

Les réseaux cellulaires, évoluant de la 1G à la 4G, ont traditionnellement utilisé des techniques d'accès multiple telles que le TDMA, le FDMA et le CDMA pour gérer les ressources radiofréquence. Cependant, ces méthodes sont devenues de plus en plus limitées face aux exigences croissantes des futurs systèmes d'accès radio, notamment en termes de bande passante, de latence et d'efficacité spectrale.

Dans ce chapitre nous introduisons une nouvelle génération de techniques d'accès multiple, spécifiquement conçues pour répondre aux défis de la 5G. Parmi elles, nous mettons en lumière le NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access), le SDMA (Space Division Multiple Access) et le RSMA (Resource Sharing Multiple Access). Ces approches représentent une transition vers des méthodes plus sophistiquées de gestion des ressources radio, visant à améliorer l'efficacité spectrale et la capacité des réseaux sans fil. Nous examinerons en détail leurs stratégies, expliquerons leurs principes de fonctionnement et décrirons les schémas de transmission utilisés pour chaque technique.

### 2.2 L'accès multiple non orthogonal (NOMA)

NOMA est une technique d'accès multiple qui permet une connectivité massive tout en améliorant la capacité du réseau. Ces nouvelles techniques sont regroupées sous l'appellation NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access) [The22].

Les systèmes 5G devraient nécessiter une largeur de bande massive et un multiplexage des données dans plusieurs domaines. Tels que la puissance du code.

#### 2.2.1 Domaine de puissance NOMA

Le principe du NOMA repose sur l'exploitation du multiplexage dans le domaine de la puissance pour permettre à plusieurs utilisateurs de communiquer sur les mêmes ressources orthogonales. Le NOMA peut atteindre cet objectif en utili-

sant le codage de superposition (SC : Superposition coding) au niveau de la station de base et l'annulation successive des interférences (SC-SIC :Successive Interference Cancellation) au niveau de la station de réception. Le SC et le SIC qui sont les principaux composants de la NOMA, ont été conçus il y a plus de vingt ans, l'ordonnement de la NOMA est relativement nouveau [The22].

Elle permet de différencier plusieurs utilisateurs qui partagent les mêmes ressources de temps, de fréquence et de code, en leur attribuant des niveaux de puissance différents, comme illustré dans la figure 2.1[VV21].

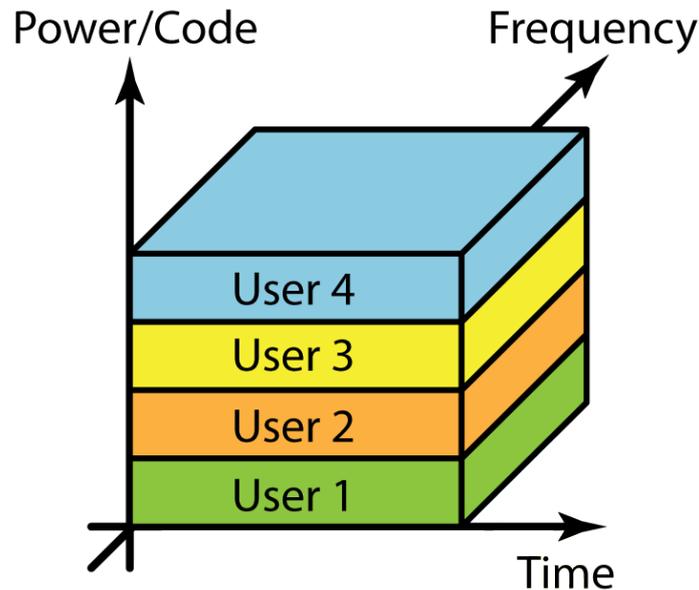


FIGURE 2.1 – Le domaine de la puissance NOMA[EII21].

### 2.2.2 Domaine de code NOMA

Le concept de NOMA dans le domaine du code s'inspire des systèmes CDMA classiques, dans lesquels plusieurs utilisateurs partagent les mêmes ressources temps-fréquence, mais utilisent des séquences d'étalement uniques et propres à chaque utilisateur [Da18].

### 2.2.3 La NOMA en liaison descendante

Dans la liaison descendante NOMA, la station de base attribue pour chaque UE (User Equipment) une puissance telle que l'UE située plus éloignée de la BS (base station) reçoit une puissance forte, tandis que l'UE la plus proche de la BS reçoit une puissance faible. Comme illustré dans la figure 2.2, tous les utilisateurs du réseau reçoivent le même signal qui contient les informations de tous les utilisateurs. Dans un premier temps, chaque UE décode le signal le plus fort, puis retire le signal décodé du signal reçu. Le récepteur SIC continue à soustraire jusqu'à ce qu'il retrouve son signal propre [Autar].

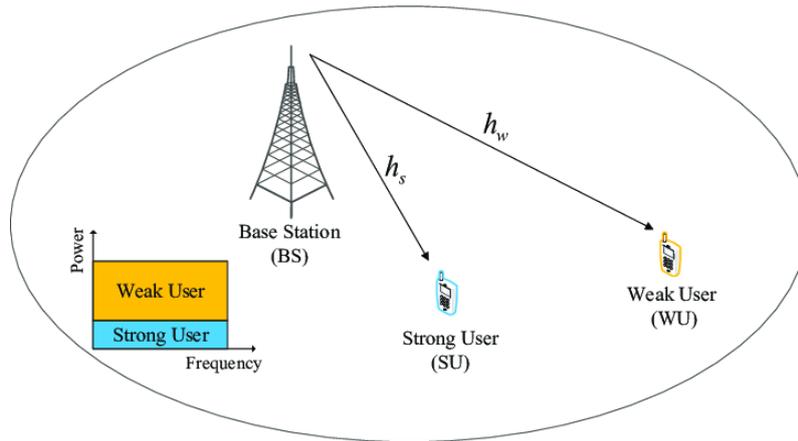


FIGURE 2.2 – Modèle du système de liaison descendante à deux utilisateurs [préséa].

## 2.2.4 La NOMA en liaison montante

Dans la liaison montante, comme illustré dans la figure 2.3 les UEs peuvent à nouveau optimiser leurs puissances de transmission en fonction de leurs emplacements comme dans la liaison descendante, nous supposons que les utilisateurs sont bien répartis dans la couverture cellulaire, et les niveaux de puissance reçus de différents utilisateurs sont déjà bien séparés [Autar].

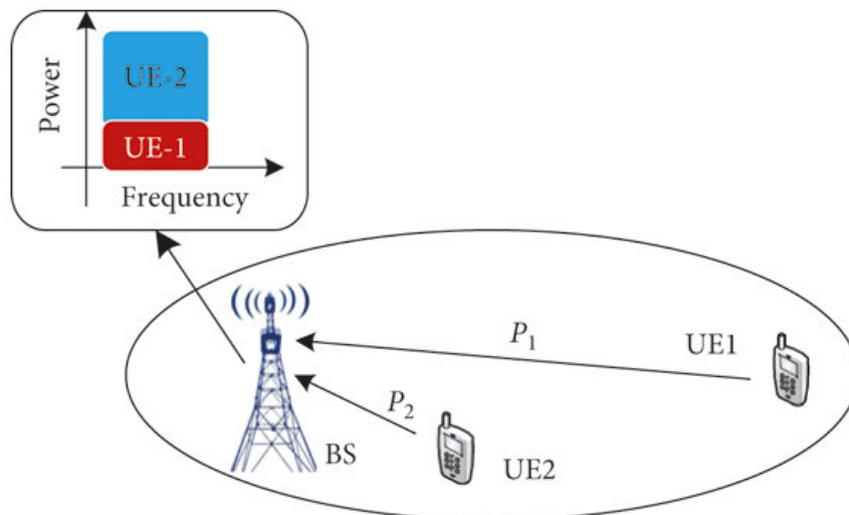


FIGURE 2.3 – Modèle NOMA de liaison montante avec deux utilisateurs [préséb].

## 2.2.5 La NOMA multi-antennes

La NOMA repose sur le codage de superposition au niveau de l'émetteur et sur l'annulation successive des interférences au niveau du récepteur. Les deux principales stratégies de la NOMA multi-antennes sont le "SC-SIC" et le "SC-SIC par groupe". La stratégie SC-SIC peut être considérée comme un cas particulier de la stratégie SC-SIC par groupe lorsqu'il n'y a qu'un seul groupe d'utilisateurs [MCL18b].

### 2.2.5.1 La technique SC-SIC

Dans le SC-SIC, les précodeurs et les ordres de décodage doivent être optimisés. L'ordre de décodage est essentiel pour le débit obtenu pour chaque utilisateur. Pour maximiser le WSR( Weighted Sum Rate), tous les ordres de décodage possibles des utilisateurs doivent être pris en compte. Considérons  $\pi$  comme l'un des ordres de décodage, où le message de l'utilisateur  $\pi(k)$  est décodé avant le message de l'utilisateur  $\pi(j)$ ,  $\forall k \leq j$ . Les messages de l'utilisateur  $\pi(k)$ ,  $\forall k \leq i$ , sont décodés par l'utilisateur  $\pi(i)$  en utilisant la technique SIC [MCL18b].

Le SINR (Signal to Interference and Noise Ratio) obtenu par l'utilisateur  $\pi(i)$  pour décodé le message de l'utilisateur  $\pi(k)$ , où  $k \leq i$ , est déterminé par l'équation 2.1 [MCL18b] :

$$\gamma_{\pi(i) \rightarrow \pi(k)} = \frac{\left| \mathbf{h}_{\pi(i)}^H \mathbf{p}_{\pi(k)} \right|^2}{\sum_{j>k, j \in \mathcal{K}} \left| \mathbf{h}_{\pi(i)}^H \mathbf{p}_{\pi(j)} \right|^2 + 1}, \quad (2.1)$$

où :

- $\gamma_{\pi(i) \rightarrow \pi(k)}$  : Le SINR obtenu par l'utilisateur  $\pi(i)$  pour décodé le message de l'utilisateur  $\pi(k)$ .
- $\mathcal{K}$  : est l'ensemble des utilisateurs.
- L'indice  $k$  : fait référence à un utilisateur particulier dont le message est en train d'être décodé.
- L'indice  $j$  : désigne les autres utilisateurs présents dans le système.
- L'indice  $i$  : désigne l'individu qui reçoit ou interprète le message.
- $\mathbf{h}_{\pi(i)}^H$  : représente le vecteur de canal qui est transposé conjugué entre la station de base (BS) et l'utilisateur  $\pi(i)$ . Ce vecteur de canal renferme des données concernant les caractéristiques de transmission.
- $\mathbf{p}_{\pi(k)}$  : est le vecteur de pré-codage du message de l'utilisateur  $\pi(k)$ . Ce vecteur représente la préparation et l'optimisation du signal avant sa transmission à travers le canal.
- Le dénominateur correspond à la somme des puissances des interférences causées par les messages des autres utilisateurs  $\pi(j)$ , où  $j$  est supérieur à  $k$ . Cela évalue l'influence des signaux provenant des autres utilisateurs sur la compréhension du message de l'individu  $\pi(k)$ . De plus, on considère que la puissance du bruit ajouté au signal est égale à 1.

Pour un vecteur de poids donné  $\mathbf{u} = [u_1, \dots, u_K]$  et un ordre de décodage fixe  $\pi$ , le WSR obtenu par SC-SIC est déterminé par l'équation 2.2 [MCL18b] :

$$R_{\text{SC-SIC}}(\mathbf{u}, \pi) = \max_{\mathbf{P}} \sum_{k \in \mathcal{K}} u_{\pi(k)} R_{\pi(k)}, \quad (2.2)$$

sous la contrainte suivante :

$$\text{tr}(\mathbf{P}\mathbf{P}^H) \leq P_t \quad \text{et} \quad R_k \geq R_k^{th}, \forall k \in \mathcal{K},$$

avec :

- $R_{\pi(k)} = \min_{i \geq k, i \in \mathcal{K}} \{\log_2(1 + \gamma_{\pi(i) \rightarrow \pi(k)})\}$ .

où :

- $u_{\pi(k)}$  : est le poids alloué à l'utilisateur- $k$  : dans l'ordre de décodage  $\pi$ .
- $R_{\pi(k)}$  : est le débit atteint par l'utilisateur- $k$  : dans l'ordre de décodage  $\pi$ .
- $\mathbf{P}\mathbf{P}^H$  : représente le produit de la matrice de précodage pour tous les flux de données avec sa transposée conjuguée.
- $\text{tr}$  : c'est la trace de la matrice résultante du produit  $\mathbf{P}\mathbf{P}^H$ . La trace est la somme des éléments diagonaux de cette matrice.
- $P_t$  : est la puissance totale disponible pour la transmission.
- $R_k$  : est le débit instantané de l'utilisateur- $k$ .
- $R_k^{lh}$  : représente la contrainte de débit QoS pour l'utilisateur- $k$ , il s'agit de la limite inférieure du débit que l'utilisateur- $k$  doit atteindre pour garantir une QoS acceptable.

### 2.2.5.2 SC-SIC par groupe

Elle consiste à regrouper les  $K$  utilisateurs en  $G$  groupes. Le SINR est alors donné par l'équation 2.3 [MCL18b] :

$$\gamma_{\pi_g(i) \rightarrow \pi_g(k)} = \frac{\left| \mathbf{h}_{\pi_g(i)}^H \mathbf{p}_{\pi_g(k)} \right|^2}{\sum_{j>k, j \in \mathcal{K}_g} \left| \mathbf{h}_{\pi_g(i)}^H \mathbf{p}_{\pi_g(j)} \right|^2 + I_{\pi_g(i)} + 1}, \quad (2.3)$$

où :

- $\gamma_{\pi_g(i) \rightarrow \pi_g(k)}$  : Le SINR obtenu par l'utilisateur  $\pi_g(i)$  pour décoder le message de l'utilisateur  $\pi_g(k)$ .
- $\mathcal{K}$  : est l'ensemble des utilisateurs.
- $g$  : représente l'indice du groupe. Il varie de 1 à  $G$ , où  $G$  est le nombre total de groupes.
- $I_{\pi_g(i)}$  : représente les interférences inter-groupes subies par l'utilisateur  $\pi_g(i)$ .
- $\mathbf{h}_{\pi_g(i)}^H$  : représente le vecteur de canal qui est transposé conjugué entre la station de base (BS) et l'utilisateur  $\pi_g(i)$ .
- $\mathbf{p}_{\pi_g(k)}$  : est le vecteur de pré-codage du message de l'utilisateur  $\pi_g(k)$ .

Par conséquent, l'équation donne le WSR obtenu avec le SC-SIC par groupe est donné par l'équation 2.4 [MCL18b] :

$$R_{\text{SC-SIC}}^{\text{group}}(\mathbf{u}, \mathcal{G}, \pi) = \max_{\mathbf{P}} \sum_{g \in \mathcal{G}} \sum_{k \in \mathcal{K}_g} u_{\pi_g(k)} R_{\pi_g(k)}, \quad (2.4)$$

où :

- $u_{\pi_g(k)}$  : représente le poids de l'utilisateur- $k$  dans l'ordre de décodage  $\pi_g$  spécifique au groupe  $g$ .
- $\mathcal{G}$  : représente l'ensemble des groupes dans le système.
- $R_{\pi_g(k)}$  : représente le débit atteint par l'utilisateur- $k$  dans l'ordre de décodage  $\pi_g$  spécifique au groupe  $g$ .

## 2.3 L'accès multiple spatiale (SDMA)

Dans les systèmes de télécommunication classiques, la station de base ne connaît pas l'emplacement de l'équipement de l'utilisateur ; elle émet dans toutes les direc-

tions pour couvrir entièrement la zone de la cellule. Cela représente un gaspillage d'énergie en plus de la transmission du signal dans des directions où il n'y a pas d'utilisateurs, ce qui est perçu comme une interférence pour les cellules à canal commun. Cela réduit le rapport signal/bruit (SNR), ce qui limite la capacité et empêche l'utilisation efficace du spectre. Cette considération a conduit à l'utilisation de la technologie des antennes intelligentes qui utilise la technique de l'accès multiple par répartition spatiale (SDMA), basée sur l'extraction de données spatiales pour les utilisateurs au sein du réseau[Bas+20].

### 2.3.1 La technique MU-LP

Cette technique exploite généralement la technique de multiplexage spatial multi-utilisateurs (MU-LP) pour son fonctionnement. Des précodeurs linéaires génèrent plusieurs faisceaux distincts, et chaque faisceau se voit attribuer une portion de la puissance d'émission totale. Ainsi, le SDMA, tout comme le NOMA, peut être assimilé à une superposition d'utilisateurs dans le domaine de la puissance. Cependant, contrairement au NOMA, la séparation des utilisateurs s'effectue du côté de l'émetteur via des précodeurs spatiaux plutôt que par l'utilisation de l'annulation successive des interférences (SIC) au niveau des récepteurs. Cette technique permet à chaque utilisateur de ne décoder que le message qu'il souhaite recevoir en traitant les interférences comme du bruit [MCL18b].

Le rapport signal à interférence et bruit (SINR) pour l'utilisateur- $k$  est donnée par l'équation 2.5 [MCL18b] :

$$\gamma_k = \frac{|\mathbf{h}_k^H \mathbf{p}_k|^2}{\sum_{j \neq k, j \in \mathcal{K}} |\mathbf{h}_k^H \mathbf{p}_j|^2 + 1}, \quad (2.5)$$

où :

- $\gamma_k$  : représente le SINR de l'utilisateur- $k$ .
- $\mathbf{h}_k^H$  : représente la transposée conjuguée du vecteur canal entre la station de base (BS) et l'utilisateur- $k$ .
- $\mathbf{p}_k$  : est le vecteur de pré-codage de l'utilisateur- $k$ .
- $j$  : représente les autres utilisateurs distincts de l'utilisateur- $k$  dans le système.

Le WSR atteint par MU-LP est donnée dans l'équation 2.6 [MCL18b] :

$$R_{\text{MU-LP}}(\mathbf{u}) = \max_{\mathbf{P}} \sum_{k \in \mathcal{K}} u_k R_k$$

Sous la contrainte :  $\text{tr}(\mathbf{P}\mathbf{P}^H) \leq P_t$

$$R_k \geq R_k^{\text{th}}, \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (2.6)$$

où :

- $u_k$  : représente une constante non négative qui permet d'allouer des ressources pour prioriser différents utilisateurs.
- $R_k = \log_2(1 + \gamma_k)$  : est le débit atteint par l'utilisateur- $k$ .
- $\mathbf{P}\mathbf{P}^H$  : représente le produit de la matrice de pré-codage pour tous les flux de données avec sa transposée conjuguée.

- $\text{tr}$  : c'est la trace de la matrice résultante du produit  $\mathbf{P}\mathbf{P}^H$ . La trace est la somme des éléments diagonaux de cette matrice.
- $P_t$  : est la puissance totale disponible pour la transmission.
- $R_k^{th}$  : représente la contrainte de débit QoS pour l'utilisateur- $k$ , il s'agit de la limite inférieure du débit que l'utilisateur- $k$  doit atteindre pour garantir une QoS acceptable.

## 2.4 L'accès multiple avec répartition du débit (RSMA)

La RSMA est un système d'accès multiple basé sur le concept de répartition des débits (Rate-Splitting) et de précodage linéaire pour les communications multi-antennes multi-utilisateurs. Le RSMA divise les messages des utilisateurs en parties communes et privées. Les parties communes sont codées dans un ou plusieurs flux communs, tandis que les parties privées sont codées dans des flux séparés. Les flux sont précodés en utilisant les informations disponibles sur l'état du canal (Channel State Information at the Transmitter, CSIT), qu'elles soient parfaites ou imparfaites. Ensuite, ils sont superposés et transmis via le canal MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) ou MISO (Multiple-Input Single-Output). Tous les récepteurs décodent d'abord les flux communs, effectuent une annulation successive des interférences (SIC), puis décodent leurs flux privés respectifs. Chaque récepteur peut ainsi reconstruire son message original à partir de la partie de son message incorporée dans les flux communs et dans le flux privé prévu. Cette méthode permet une utilisation plus efficace du spectre et une meilleure gestion des interférences, améliorant ainsi la capacité et la robustesse du réseau [Diz+20].

### 2.4.1 La RSMA en la liaison montante

Dans la liaison montante en RSMA, chaque utilisateur génère des utilisateurs virtuels en séparant sa transmission en deux sous-messages distincts. Comme illustré dans la figure 2.4, [SSR21].

L'utilisateur- $k$ ,  $k \in \{1, \dots, K-1\}$ , divise son message  $W_k$  en deux parties  $W_{k,1}$  et  $W_{k,2}$ . Ces deux parties sont codées indépendamment dans des flux  $s_{k,1} \in \mathbb{C}$  et  $s_{k,2} \in \mathbb{C}$ , qui sont ensuite respectivement attribués aux puissances  $P_{k,1}$  et  $P_{k,2}$ , et superposés ensemble [Mis+22].

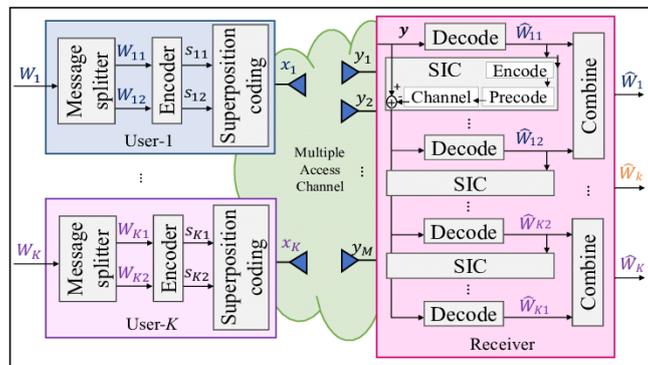


FIGURE 2.4 – Architecture de l'émetteur-récepteur de K-user uplink RSMA [Mis22].

Chez l'utilisateur- $K$ , le message  $W_K$  est directement encodé dans  $s_K$  et alloué avec la puissance  $P_K$ . Le signal d'émission de l'utilisateur- $k$ ,  $x_k \in \mathbb{C}$ , est donné par [Mis+22] :

$$x_k = \begin{cases} \sqrt{P_{k,1}}s_{k,1} + \sqrt{P_{k,2}}s_{k,2}, & \text{si } k \in \mathcal{K} \setminus \{K\} \\ \sqrt{P_K}s_K, & \text{si } k = K \end{cases} \quad (2.7)$$

où :

- $x_k$  :Signal d'emision de l'utilisateur-k.
- $\mathcal{K}$  :L'ensemble des utilisateurs.
- $K$  :Le nombre des utilisateurs.
- $\mathbb{C}$  :l'ensemble des flux de codage.

Le signal reçu  $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^M$  à la station de base est exprimé comme suit [Mis+22] :

$$\mathbf{y} = \sum_{k \in \mathcal{K}} \mathbf{h}_k x_k + \mathbf{n}_{ul} \quad (2.8)$$

où :

- $\mathbf{n}_{ul}$  : Uplink le vecteur de bruit AWGN.
- $x_k$  :Signal d'emision de l'utilisateur-k.
- $\mathbb{C}^M$  :L'ensemble des matrices de précodage de dimension M.
- $\mathbf{y}$  :Représente le signal reçu.
- $\mathbf{h}_k$  :Représente le canal entre la BS et l'utilisateur-k.

La station de base utilise des filtres de réception  $d_{k,1} \in \mathbb{C}^M$ ,  $d_{k,2} \in \mathbb{C}^M$  pour détecter les deux flux de l'utilisateur- $k$ ,  $\forall k \in \mathcal{K} \setminus \{K\}$ , et  $d_K \in \mathbb{C}^M$  pour détecter le flux de l'utilisateur- $K$ . Soit  $\pi$  l'ordre de décodage dans lequel les  $2K - 1$  flux  $\{s_{k,i}, s_K | k \in \mathcal{K} \setminus \{K\}, i \in \{1, 2\}\}$  seront décodés de sorte que le flux  $s_{k,i}$  soit décodé avant le flux  $s_{k',i'}$  si  $\pi_{k,i} < \pi_{k',i'}$  [Mis+22].

Pour l'utilisateur- $K$ ,  $\pi_{K,i}$  est simplifié en  $\pi_K$ . Ensuite,les débits de décodage des flux  $s_{k,i}$  et  $s_K$  sont donnés par [Mis+22] :

$$R_{k,i} = \log_2 \left( 1 + \frac{P_{k,i} |\mathbf{d}_{k,i}^H \mathbf{h}_k|^2}{\sum_{\pi_{k',i'} > \pi_{k,i}} P_{k',i'} |\mathbf{d}_{k',i'}^H \mathbf{h}_{k'}|^2 + \sigma_{ul}^2} \right) \quad (2.9)$$

$$R_K = \log_2 \left( 1 + \frac{P_K |\mathbf{d}_K^H \mathbf{h}_K|^2}{\sum_{\pi_{k',i'} > \pi_K} P_{k',i'} |\mathbf{d}_{k',i'}^H \mathbf{h}_{k'}|^2 + \sigma_{ul}^2} \right) \quad (2.10)$$

Puisque le message de l'utilisateur- $k$  est transmit à travers deux flux, le débit réalisable est donné par  $R_k = R_{k,1} + R_{k,2}$  [Mis+22] :

## 2.4.2 RSMA en la liaison descendante

En RSMA, le message de l'utilisateur- $k$  noté  $W_k$  est divisé en une partie commune  $W_{c,k}$  et une partie privée  $W_{p,k}$ . Le message commun désigné par  $W_c$ , contient des sous-messages d'un ou de plusieurs utilisateurs ( $W_{c,1}, \dots, W_{c,k}$ ). Il est ensuite encodé dans un seul flux appelé flux commun  $s_c \in \mathbb{C}$ . Bien que le message privé ne contient qu'un sous-message d'un seul utilisateur, et il est codé indépendamment dans le flux privé  $s_{p,k} \in \mathbb{C}$  [Mis+22].

Soit :  $\mathbb{C}$  l'ensemble des flux de codage et  $\mathbb{C}^M$  l'ensemble des matrices de précodage de dimension  $M$ ,  $\mathcal{K}$  est l'ensemble d'utilisateurs.

Des précodeur linéaire  $\mathbf{p}_c \in \mathbb{C}^M$  et  $\mathbf{p}_{p,k} \in \mathbb{C}^M, \forall k \in \mathcal{K}$ , sont utilisés pour précoder les flux commun et privé, respectivement. Le signal d'émission  $x \in \mathbb{C}^M$  est exprimé comme suit [Mis+22] :

$$\mathbf{x} = \mathbf{p}_c s_c + \sum_{k=1}^K \mathbf{p}_{p,k} s_{p,k}, \quad (2.11)$$

avec :  $\mathbf{x}$  est soumis à la contrainte de puissance :  $\mathbb{E} \{\mathbf{x}^2\} \leq P$  [Mis+22].

Désignant le canal entre la BS et l'utilisateur- $k$  est désigné par  $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^M$ , le signal reçu par l'utilisateur- $k$ , c'est-à-dire  $y_k \in \mathbb{C}$ , est donné par [Mis+22] :

$$y_k = \mathbf{h}_k^H \mathbf{x} + z_k, \quad (2.12)$$

où :  $z_k$  est le bruit AWGN (Additive White Gaussian Noise).

Du côté du récepteur, l'utilisateur- $k$  décode d'abord le flux commun en traitant tous les flux privés comme du bruit. Par conséquent, le SINR pour le flux commun au niveau de l'utilisateur- $k$  s'exprime comme suit [Mis+22] :

$$\gamma_{c,k} = \frac{|\mathbf{h}_k^H \mathbf{p}_c|^2}{\sum_{i=1}^K |\mathbf{h}_k^H \mathbf{p}_{p,i}|^2 + \sigma_z^2} \quad (2.13)$$

où :

- $\gamma_{c,k}$  : Le SINR pour le flux commun au niveau utilisateur- $k$
- $\mathbf{p}_c$  : Vecteur de précodage du flux commun.
- $\mathbf{h}_k^H$  : Transposée conjuguée du vecteur canal.
- $\mathbf{p}_{p,i}$  : Vecteurs de précodage des flux privés des autres utilisateurs.
- $\sigma_z^2$  : Variance du bruit AWGN.

Après avoir réussi à décoder et à éliminer le flux commun à l'aide de la SIC, l'utilisateur- $k$  décode son propre flux privé en traitant les flux privés des autres utilisateurs comme du bruit. Ainsi, le SINR du flux privé de l'utilisateur- $k$  est exprimé comme suit [Mis+22] :

$$\gamma_{p,k} = \frac{|\mathbf{h}_k^H \mathbf{p}_{p,k}|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K |\mathbf{h}_k^H \mathbf{p}_{p,i}|^2 + \sigma_z^2} \quad (2.14)$$

où :

- $\gamma_{p,k}$  : représente le SINR du flux privé de l'utilisateur- $k$
- $\mathbf{p}_{p,k}$  : Vecteur de précodage du flux privé de l'utilisateur- $k$ .
- $\mathbf{h}_k^H$  : Transposée conjuguée du vecteur canal.
- $\mathbf{p}_{p,i}$  : Vecteurs de précodage des flux privés des autres utilisateurs.
- $\sigma_z^2$  : Variance du bruit AWGN.

Tous les utilisateurs reconstruisent leur message en combinant leur partie commune et leur partie privée, constituées respectivement de  $s_c$  et  $s_{p,k}$ .

### 2.4.3 RS généralisé

Le RS généralisé est un système à précodage linéaire qui vise à maximiser le taux d'accomplissement et la qualité de service du RS à précodage linéaire au prix d'une plus grande complexité de l'émetteur-récepteur. Contrairement au RS à 1 couche et au HRS à 2 couches, qui maintiennent un nombre constant de divisions de messages  $L$  pour chaque message d'utilisateur et un nombre constant de divisions de messages HRS pour chaque message d'utilisateur, le RS à 1 couche ne permet pas d'obtenir une qualité de service supérieure [Mao+22].

Le nombre fixe de couches SIC chez chaque utilisateur, indépendamment du nombre d'utilisateurs  $K$ , la RS généralisée à  $K$  utilisateurs nécessite d'augmenter  $L$  avec  $K$ , comme  $L = 2^{K-1}$ , afin de synthétiser différents flux communs décodés par différents sous-ensembles d'utilisateurs de  $K$ , et par conséquent, le nombre de couches SIC chez chaque utilisateur augmente avec  $K$  comme  $2^{K-1} - 1$  [Mao+22].

Chez l'émetteur, le message  $W_k$  de l'utilisateur est divisé en  $\{W_k^{\mathcal{A}'} | \mathcal{A}' \subseteq \mathcal{K}, k \in \mathcal{A}'\}$ . Pour tout sous-ensemble d'utilisateurs  $A \subseteq K$ , la station de base charge des sous-messages  $\{W_{k'}^A | k' \in A\}$  avec le même exposant  $A$  sur des flux de données  $s_A$ , qui sont décodés par tous les utilisateurs du sous-ensemble  $A$  et traités comme des bruits par les autres utilisateurs. Le concept d'ordre des flux est introduit dans les RS généralisés pour définir les flux décodés par différents nombres d'utilisateurs. Soit  $\{s_{A'} | A' \subseteq K, |A'| = l\}$  dénote l'ensemble de tous les flux d'ordre  $l$ ,  $s_l$  avec  $\binom{K}{l}$  éléments, qui forment les vecteurs de flux de données. Comme il n'existe qu'un seul flux d'ordre  $K$ ,  $s_K$  est simplifié en  $K$  quand  $l = K$ .  $s_l$  est codé linéairement par la matrice de codage  $P_l$ , qui se compose de  $\{p_{A'} | A' \subseteq K, |A'| = l\}$ .

Le signal de transmission du RS généralisé à  $K$  utilisateurs est donné par l'équation 2.15 [Mao+22] :

$$x = \sum_{l=1}^K \mathbf{P}_l s_l = \sum_{l=1}^K \sum_{\mathcal{A}' \subseteq \mathcal{K}, |\mathcal{A}'|=l} \mathbf{p}_{\mathcal{A}'} s_{\mathcal{A}'}, \quad (2.15)$$

où :

- $\mathbf{p}_{\mathcal{A}'}$  : représente un vecteur de précodage spécifique pour le sous-ensemble  $\mathcal{A}'$ .
- $s_{\mathcal{A}'}$  : est le flux d'ordre  $l$  correspondant au sous-ensemble  $\mathcal{A}'$ .

Chaque utilisateur- $k$  utilise  $2^{K-1} - 1$  couches SIC pour décodé les flux communs prévus et son flux privé. En commençant par les flux d'ordre  $K$ , le processus de décodage se poursuit vers le bas jusqu'à ce que le flux privé d'ordre 1 soit atteint. Les flux d'ordre  $l$  impliqués dans  $S_{l,k} = \{s_{A'} | A' \subseteq K, |A'| = l, k \in A'\}$  sont décodés chez l'utilisateur- $k$  sur la base de l'ordre de décodage  $\pi_{l,k}$ . Nous définissons  $s_{\pi_{l,k}} = [s_{\pi_{l,k}(1)}, \dots, s_{\pi_{l,k}(|S_{l,k}|)}]^H$ , le vecteur d'ordre décodé chez l'utilisateur- $k$  avec  $s_{\pi_{l,k}}(i)$  est décodé avant  $s_{\pi_{l,k}}(j)$  si  $i > j$ . Le taux de décodage des vecteurs d'ordre  $s_{\pi_{l,k}}(i)$  chez l'utilisateur- $k$  [Mao+22].

La SINR de l'utilisateur- $k$  pour décodé le flux d'ordre  $l$ ,  $s_{\pi_{l,k}}(i)$ , est [Mao+22] :

$$\gamma_k^{\pi_{l,k}(i)} = \frac{|\mathbf{h}_k^H \mathbf{p}_{\pi_{l,k}(i)}|^2}{I_{\pi_{l,k}(i)} + 1}, \quad (2.16)$$

où :

- $\mathbf{h}_k^H$  : Le vecteur canal qui transposé conjugué entre la BS l'utilisateur- $k$ .
- les indices  $i$  : et  $j$  représentent les positions respectives des éléments à décoder dans un vecteur de flux d'ordre  $l$  pour un utilisateur spécifique.
- $\mathbf{p}_{\pi_{l,k}(i)}$  : Le vecteur de transmission pour le  $i$ -ème élément du flux d'ordre  $l$  à décoder par l'utilisateur- $k$ .
- $I_{\pi_{l,k}(i)}$  : Le terme d'interférence pour le  $i$ -ème élément du flux d'ordre  $l$  à décoder par l'utilisateur- $k$ . Ce terme représente l'effet combiné des interférences des autres flux et du bruit.
- La puissance du bruit, supposée égale à 1.

#### 2.4.4 1-layer RS

La figure 2.5 présente le modèle du système RS à 1 couche qui ne nécessite pas de commande ou de regroupement de l'utilisateur du côté de l'émetteur, puisque tous les utilisateurs décodent le message commun en utilisant une seule couche de SIC avant d'accéder à leurs messages privés respectifs. Nous notons également que le RS à 1 couche est un sous-schéma du RS généralisé et un sur-schéma de MU-LP (car en n'attribuant aucune puissance au message commun, le RS à 1 couche se résume à MU-LP). Cependant, pour  $K > 2$ , SC-SIC et SC-SIC par groupe ne sont pas des sous-schémas de RS à 1 couche (même s'ils étaient des sous-schémas de RS généralisés) [MCL18b].

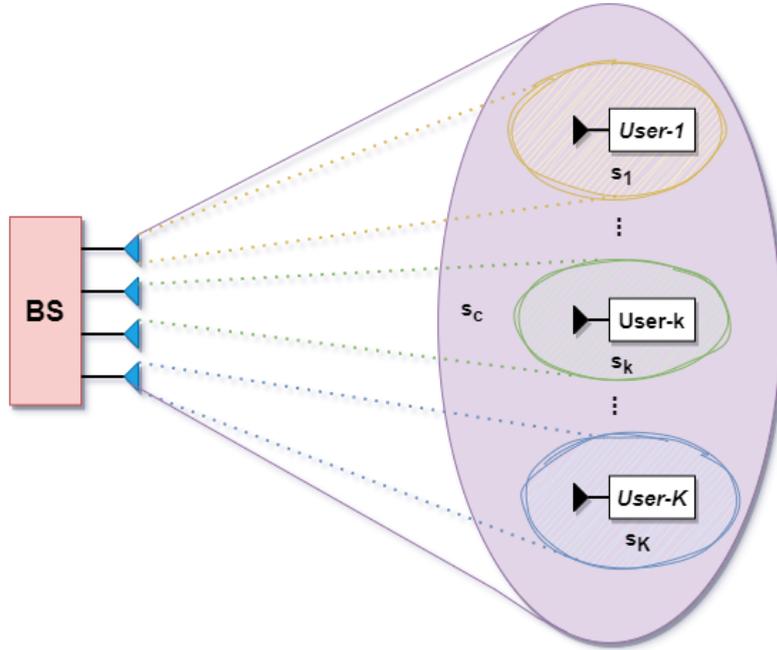


FIGURE 2.5 – Modèle RS à 1 couche de  $K$  utilisateurs [MCL18b].

#### 2.4.5 2-layer HRS

La 2-layer HRS est une technique qui consiste à séparer les utilisateurs en groupes afin d'envoyer des messages à la fois communs et privés à chaque groupe. Deux

couches de SIC sont utilisées afin que chaque utilisateur puisse comprendre le message commun avant de pouvoir accéder à son message privé spécifique.

Les  $K$  utilisateurs sont divisés en  $\mathcal{G}$  groupes définis par  $\mathcal{G} = \{1, \dots, G\}$ , avec  $K_g, g \in G$  utilisateurs dans chaque groupe [MCL18b].

Les utilisateurs sont divisés en deux groupes,  $K_1 = \{1, 2\}$  et  $K_2 = \{3, 4\}$ . L'exemple de HRS à 2 couches pour  $K = 4$  utilisateurs est illustré dans la figure 2.6. Chaque utilisateur doit décoder trois flux [MCL18b][Mao+22].

- $s_{\mathcal{K}}$  : un flux commun inter-groupe ( $s_{1234}$ ) que tous les utilisateurs doivent être en mesure de décoder.
- $s_{\mathcal{K}_g}$  : deux flux communs intra-groupe ( $s_{12}$  et  $s_{34}$ ) sont destinés respectivement aux utilisateurs du groupe 1 et du groupe 2. Si ces flux communs sont éliminés, cet exemple de 2-layer HRS se résume à une technique de 1-layer RS, où le flux  $s_{1234}$  joue le rôle de  $s_c$  dans la figure 2.6.
- $s_k$  : quatre flux privés ( $s_1, s_2, s_3$  et  $s_4$ ) destinés à chaque utilisateur individuellement.

Une fois que  $s_{\mathcal{K}}$  est décodé avec succès, sa contribution au signal reçu original  $y_k$  est soustraite. Après cela, l'utilisateur- $k$  décote ses flux communs de groupe  $K_g$  en traitant les autres flux communs de groupe et les flux privés de 1<sup>er</sup> ordre comme du bruit [MCL18b].

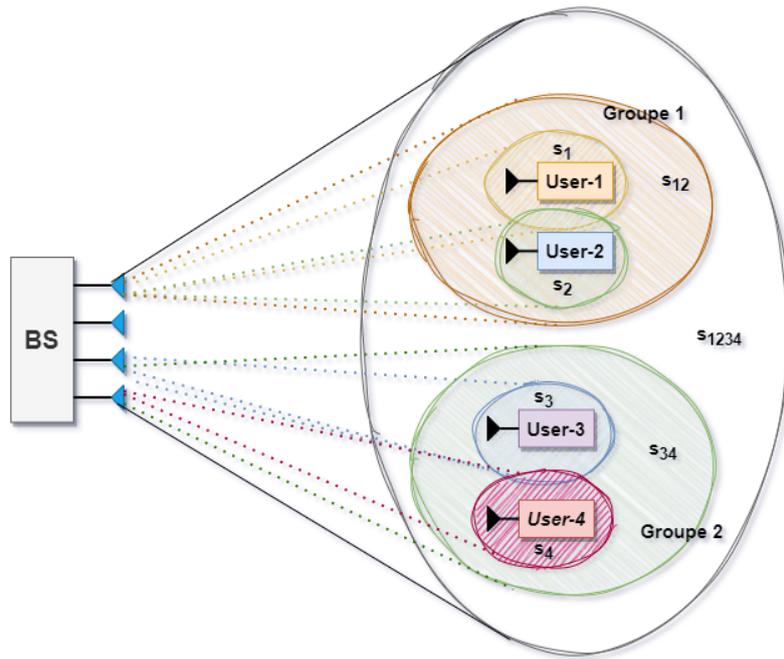


FIGURE 2.6 – HRS à 2 couches[MCL18b].

## 2.4.6 Comparaison des stratégies RSMA

Ces stratégies sont le RS généralisé, le 1-layer RS et le 2-layer HRS (Hierarchical Rate Splitting).

	Nombre de sous-messages découpés à partir de chaque message (L)	Nombre de flux transmis (N)	Couches de SIC pour chaque utilisateur
RS généralisé	$2^{k-1}$	$2^k - 1$	$2^{k-1} - 1$
1-layer RS	2	$K + 1$	1
2-layer HRS	3	$K + 2$	2

TABLE 2.1 – Comparaison des stratégies RSMA[Mao+22].

## 2.5 Conclusion

En conclusion, cette étude approfondie du NOMA, du SDMA et, plus particulièrement, du RSMA a apporté une lumière précieuse sur les différentes approches d'accès multiple dans les réseaux sans fil, en comparaison avec les techniques traditionnelles d'OMA. En examinant les spécificités de chaque technique et les méthodes employées pour gérer les interférences, nous avons pu identifier le RSMA comme une approche intégrative qui englobe à la fois le SDMA et le NOMA. Cette intégration permet de tirer parti des avantages de chaque technique tout en surmontant leurs limitations respectives. Ainsi, le RSMA se révèle être une solution prometteuse pour optimiser l'efficacité des réseaux sans fil et répondre aux exigences croissantes en matière de performance et de flexibilité.

# Chapitre 3

## Caractéristiques essentielles du système et évaluation des performances des techniques d'accès

### 3.1 Introduction

L'évolution des systèmes de communication 5G a été marquée par la recherche incessante de solutions innovantes pour améliorer les performances des réseaux sans fil. Parmi ces innovations, l'introduction de la RSMA (Rate-Splitting Multiple Access) a suscité un intérêt croissant en raison de son potentiel à gérer efficacement les interférences et à optimiser l'utilisation des ressources spectrales. Pour évaluer l'efficacité de la RSMA et comprendre son impact sur les performances des systèmes 5G, il est crucial d'examiner certains paramètres fondamentaux du système et de mesurer les performances des diverses techniques d'accès.

Ce chapitre se concentre sur ces aspects essentiels, en offrant une vue d'ensemble des caractéristiques des systèmes de communication 5G. Nous explorerons en profondeur des concepts tels que la qualité de l'information de l'état du canal (CSI), le rapport signal/bruit (SNR), ainsi que la méthode de transmission conjointe unicast et multicast. La charge du réseau sera également abordée pour comprendre son influence sur la performance globale.

En plus des caractéristiques techniques, nous présenterons des mesures de performance clés, telles que l'efficacité énergétique, la région de débits, la somme des débits pondérés, et la région de degré de liberté (DoF). Ces indicateurs permettent de quantifier l'efficacité et la capacité des systèmes 5G, offrant ainsi une perspective complète sur les avantages et les défis liés à l'implémentation de techniques avancées comme la RSMA.

## 3.2 Les caractéristiques des systèmes de communications 5G

### 3.2.1 Le rapport signal sur bruit SNR

Le rapport signal sur bruit (SNR :signal to noise ratio) est le rapport entre la puissance du signal reçu et la de puissance bruit. Le SNR en dB peut être calculé à l'aide d'équation suivante [THEte] :

$$SNR(dB) = 10\log_{10}\left(\frac{P_{\text{signal-reçu}}}{P_{\text{bruit}}}\right) \quad (3.1)$$

Un SNR positif indique que la puissance du signal est supérieure à celle du bruit, c'est-à-dire que le récepteur sera capable de démoduler le signal. Le SNR négatif indique que la puissance du signal est inférieure à celle du bruit [THEte].

### 3.2.2 La transmission conjointe unicast et multicast

La transmission unicast est une communication point à point, tandis que la transmission multicast se fait point à multipoint. La transmission conjointe unicast et multicast combine les deux techniques. Elle diffère d'une technique à une autre dans sa réalisation[MCL18b].

- **La transmission unicast et multicast par SC-SIC** : repose sur la SC au niveau de l'émetteur et la SIC au niveau des récepteurs (SC-SIC). Elle oblige certains utilisateurs à décoder complètement et à annuler les interférences créées par d'autres utilisateurs [MCL18b].
- **La transmission unicast et multicast par MU-LP** : MU-LP ne nécessite pas de SIC à chaque récepteur dans la transmission unicast seule. Cependant, une couche de SIC est nécessaire à chaque utilisateur pour décoder le flux multicast avant de décoder le flux unicast prévu dans la transmission conjointe unicast et multicast assistée par MU-LP. Une fois que le message commun est décodé avec succès et soustrait du signal reçu, chaque récepteur décode entièrement son message unicast prévu en traitant les interférences comme du bruit. MU-LP est sensible à l'orthogonalité et à la puissance des canaux des utilisateurs [MCL18b].
- **La transmission unicast et multicast par RS** : En divisant les flux monodiffusion en parties communes et privées et en codant les parties communes avec le message multidiffusion dans un flux supercommun à décoder par tous les utilisateurs. Le SIC dans la RS à 1 couche est utilisé dans le double but de séparer les flux monodiffusion et multidiffusion et de gérer l'interférence entre les flux monodiffusion [MCL18b].

### 3.2.3 La précision du CSI (Channel State Information)

Informations concernant l'état du canal est l'un des concepts les plus fondamentaux de la communication sans fil. Le terme "CSI" fait référence aux caractéristiques connues du canal d'une liaison radio. Elle est capable de décrire l'impact

combiné de l'affaiblissement du signal, de la diffusion, de la diffraction, l'évanouissement et shadoming se produisent lorsque les signaux sont transmis d'un émetteur à son récepteur correspondant à travers l'air. Le CSI est utilisé pour quantifier la qualité d'une liaison radio. Le CSI détermine les paramètres et les schémas de la couche physique déployés pour les communications radio dans un système [Luo+18].

Par exemple, si les canaux sont médiocres, la couche physique doit adopter des schémas de modulation d'ordre faible et des schémas d'ordre plus élevés de modulation lorsque les canaux sont fiables. Il est évident qu'un CSI imprécis peut conduire à l'utilisation de schéma de modulation inappropriés, ce qui à son tour entraînent une communication inefficace. Il a également un impact significatif sur l'allocation des ressources radio et la gestion des interférences. Ainsi il est crucial pour l'amélioration des performances des communications de trouver un CSI précis[Luo+18].

Généralement, il est possible d'obtenir un CSI précis en réalisant une estimation du canal. Jusqu'à maintenant, les chercheurs ont suggéré différentes approches pour estimer le canal, comme l'estimation par maximum de vraisemblance (ML), l'estimation par moindres carrés (LS) et l'estimation par erreur quadratique minimale (MMSE)[Luo+18].

### 3.3 évaluation des performances

#### 3.3.1 Région de débits

Considérons un système MIMO massif dans lequel une station de base équipée de  $M$  antennes dessert deux utilisateurs. Les débits réalisables peuvent être exprimés sous l'équation suivante [Cle+21] :

$$R_1 = \log_2\left(1 + \frac{\alpha_1\eta_1}{\mu_{1,1}\eta_1 + \mu_{1,2}\eta_2 + 1}\right), \quad (3.2)$$

$$R_2 = \log_2\left(1 + \frac{\alpha_2\eta_2}{\mu_{2,1}\eta_1 + \mu_{2,2}\eta_2 + 1}\right), \quad (3.3)$$

où :

- $\eta_k$  est le coefficient de contrôle de la puissance et  $\alpha_k \geq 0$  est le gain de canal effectif de l'utilisateur- $k$ , pour  $k = 1, 2$ . La puissance du bruit est normalisée à 1.
- $\mu_{1,1} \geq 0$  et  $\mu_{2,2} \geq 0$  sont les coefficients d'auto-parasitage causés par CSI imparfaite.
- $\mu_{1,2} \geq 0$  et  $\mu_{2,1} \geq 0$  sont les coefficients de brouillage inter-utilisateurs. Il convient de noter que  $\eta_1$  et  $\eta_2$  sont des variables de conception.

Dans le DownLink (DL), la contrainte de puissance à la station de base est  $0 \leq \eta_1 + \eta_2 \leq 1$ . Dans l'UpLink (UL), les contraintes de puissance des deux utilisateurs sont  $0 \leq \eta_1 \leq 1$  et  $0 \leq \eta_2 \leq 1$  [CBL18].

#### 3.3.2 La somme des débits pondérés WSR (Weighted Sum Rate)

Dans un système multi-utilisateurs la région de débits n'est plus une mesure suffisamment informative, ce qui a conduit à l'introduction du WSR. Dans ce cas

les performances de chaque utilisateur dépendent d'un nouveau paramètre qui est son poids attribué noté  $\mu$ . Le poids attribué à chaque utilisateur est un coefficient qui le caractérise au sein du système.

Les poids de l'ensemble d'utilisateurs vérifie la contrainte :  $\sum_{i=1}^K \mu_i = 1$ .

où :

- $K$  : nombre d'utilisateurs, l'ensemble des utilisateur  $\mathcal{K} = \{1, \dots, K\}$ .
- $i \in \mathcal{K}$ .

Le WSR tient compte du débit permettant à chaque utilisateur et de son poids. On le définit en utilisant l'équation suivante [MCL18b] :

$$WSR = \sum_{i=1}^K \mu_i R_i, \quad (3.4)$$

L'objectif principal des nouvelles méthodes d'accès est de maximiser le WSR en prenant en considération les contraintes de puissance pour la station de base ainsi que les contraintes de qualité de service (QoS) de chaque utilisateur [MCL18b].

### 3.3.3 L'efficacité Energétique

La théorie de l'information a initialement examiné le concept d'EE (Energy Efficiency) pour les systèmes de communication, en définissant une mesure appelée énergie minimale par bit comme le rapport entre la puissance consommée et le débit atteint, exprimé en J/bit. Dernièrement, on a introduit la mesure EE, qui correspond à la relation entre la capacité du canal  $C$  et la puissance consommée pour atteindre ce débit, et qui est représentée par [Sbo+19] :

$$EE = \frac{C}{P_c + P_{Tx}}, \quad (3.5)$$

où :

- $P_{Tx}$  : est la puissance d'émission.
- $P_c$  : est la puissance du circuit. Elle est donné par :  $P_c = N_t P_{dyn} + P_{sta}$ .
- $P_{dyn}$  : désigne la consommation d'énergie dynamique. Il s'agit de la consommation d'énergie d'une chaîne de radiofréquences active [MCL18b].
- $P_{sta}$  : représente la consommation d'énergie statique, c'est-à-dire la consommation d'énergie des systèmes de refroidissement, de l'alimentation électrique, etc. La consommation d'énergie du côté de l'utilisateur est omise car la consommation d'énergie des utilisateurs est négligeable par rapport à la consommation d'énergie de la station de base [MCL18b].

### 3.3.4 La région de DoF

#### 3.3.4.1 Le degré de liberté

Le degré de liberté, DOF (Degrees of freedom) est une estimation de premier ordre du débit avec un rapport signal sur bruit élevé. Le gain de multiplexage de

l'utilisateur atteint par la stratégie de communication [CBL18] :

$$d_k^{(j)} = \lim_{P \rightarrow \infty} \frac{R_k^{(j)}(P)}{\log_2(P)}, \quad (3.6)$$

où :

- $R_k^{(j)}(P)$  : est le débit de l'utilisateur- $k$  pour une stratégie  $j$  sous la contrainte de puissance d'émission  $P$ .

### 3.3.4.2 La somme de DoF (Sum-DoF)

le gain de multiplexage de la somme est donné par l'équation suivante [Cle+21] :

$$d_s^{(j)} = \lim_{P \rightarrow \infty} \frac{R_s^{(j)}(P)}{\log_2(P)} = \sum_{k=1}^K d_k^{(j)}, \quad (3.7)$$

où :

- $R_s^{(j)} = \sum_{k=1}^K R_k^{(j)}$  est le débit total.

### 3.3.4.3 Le Max-Min Fairness (MMF)

Le gain de multiplexage MMF, (d'Equité Max-Min) (ou DoF symétrique), correspond au DoF qui peut être atteint simultanément par tous les utilisateurs. l'équation est donné par [Cle+21] :

$$d_{\text{mmf}}^{(j)} = \lim_{P \rightarrow \infty} \frac{R_{\text{mmf}}^{(j)}(P)}{\log_2(P)} = \min_{k=1, \dots, K} d_k^{(j)}, \quad (3.8)$$

où :

- $R_{\text{mmf}} = \min_{k=1, \dots, K} R_k^{(j)}$  est le débit MMF.

## 3.4 La comparaison des Sum-DoF et MMF-DoF pour NOMA, SDMA et RSMA

Les chercheurs de l'étude ont obtenu les expressions de sum-DoF et de MMF-DoF pour les schémas d'accès multiple NOMA, SDMA et RSMA, en prenant en considération la connaissance parfaite ou imparfaite du canal (CSIT). Les deux tableaux récapitulent ces expressions.

Soit :

- $M$  : nombre d'antenne.
- $K$  : nombre d'utilisateurs total.
- $G$  : représente le nombre total de groupes dans le système.
- $g$  : représente le nombre d'utilisateurs dans chaque groupe. Les auteurs de cette étude ont supposé que le nombre d'utilisateurs dans chaque groupe est identique, donc  $g$  est constant pour tous les groupes [Cle+21].

Schéma	Sum-DoF	CSIT parfait	CSIT imparfait
NOMA	$d_s^{(N)}$	$\min(M, G)$	$\max(1, \min(M, G)\alpha)$
SDMA	$d_s^{(S)}$	$\min(M, K)$	$\max(1, \min(M, K)\alpha)$
RSMA	$d_s^{(R)}$	$\min(M, K)$	$1 + (\min(M, K) - 1)\alpha$

TABLE 3.1 – Comparaison des Sum-DoF de différents multiples d'accès avec une connaissance parfaite et imparfaite du canal (CSIT) [Cle+21].

Schéma	MMF-DoF	CSIT parfait	CSIT imparfait
NOMA	$d_{\text{mmf}}^{(N)}$	$1/g, \text{ si } M \geq K - g + 1$ $0, \text{ si } M < K - g + 1$	$\frac{\alpha}{g}, \text{ si } G > 1 \text{ et } M \geq K - g + 1$ $0, \text{ si } G > 1 \text{ et } M < K - g + 1$ $\frac{1}{K}, \text{ si } G = 1$
SDMA	$d_{\text{mmf}}^{(S)}$	$1, \text{ si } M \geq K$ $0, \text{ si } M < K$	$\alpha, \text{ si } M \geq K$ $0, \text{ si } M < K$
RSMA	$d_{\text{mmf}}^{(R)}$	$1, \text{ si } M \geq K$ $\frac{1}{1+K-M}, \text{ si } M < K$	$\frac{1+(K-1)\alpha}{K}, \text{ si } M \geq K$ $\frac{1+(M-1)\alpha}{K}, \text{ si } M < K \text{ et } \alpha \leq \frac{1}{1+K-M}$ $\frac{1}{1+K-M}, \text{ si } M < K \text{ et } \alpha > \frac{1}{1+K-M}$

TABLE 3.2 – Comparaison des MMF-DoF de différents multiples d'Accès avec une connaissance parfaite et imparfaite du canal (CSIT) [Cle+21].

Le paramètre  $\alpha$  joue un rôle essentiel dans l'évaluation de la qualité de la CSIT dans le régime de SNR élevé. Il représente en fait un facteur d'échelle pour mesurer cette qualité. Sa valeur est définie dans l'intervalle  $\alpha \in [0, \infty[$ . Dans les systèmes où la rétroaction est limitée, les utilisateurs envoient au BS des versions quantifiées de leurs canaux. Dans ce contexte,  $\alpha$  peut être interprété en termes du nombre de bits de rétroaction. Ainsi, lorsque  $\alpha = 0$ , cela correspond à un CSIT partiel avec une précision finie, indiquant l'utilisation d'un nombre constant de bits de rétroaction. Par contre, lorsque  $\alpha \rightarrow \infty$ , cela représente un CSIT parfait où le système dispose d'une connaissance complète et précise du canal [Mao+22].

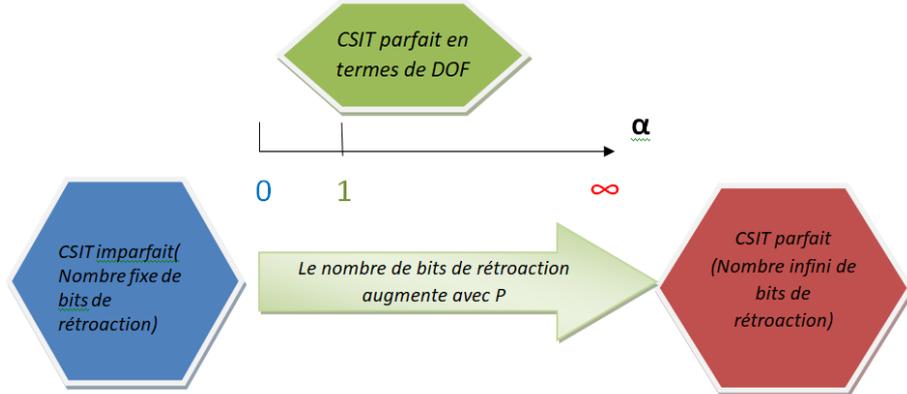


FIGURE 3.1 – Interprétation de  $\alpha$  en termes de bits de rétroaction

### 3.5 Comparaison des stratégies d'accès multiple

Les principaux écarts entre les stratégies d'accès multiple NOMA, SDMA et RSMA sont comparés dans le tableau. Chacune de ces méthodes propose une approche singulière pour gérer les interférences dans les réseaux de communication

sans fil [Mao+22].

Accès Multiple	SDMA	NOMA		RSMA		
Stratégie	MU-LP	SC-SIC	SC-SIC par groupe	1-layer RS	2-layer HRS	RS généralisé
Principe de conception	Traiter entièrement les interférences comme du bruit.	Décoder entièrement les interférences.	Décoder entièrement les interférences dans chaque groupe et considérer celles entre les groupes comme du bruit.	Décoder partiellement les interférences et les traiter partiellement comme du bruit.		
Complexité de l'encodeur	Encoder $K$ flux	Encoder $K$ flux		$K + 1$ flux	Encoder $K + G + 1$ flux	Encoder $2^K - 1$ flux
Complexité de l'ordonnancement	Complexe, car MU-LP nécessite de regrouper des utilisateurs semi-orthogonaux ayant des gains de canal similaires.	Très complexe, car il faut trouver des utilisateurs alignés et décider d'un ordre d'utilisation approprié.	Très complexe car cela nécessite de diviser les utilisateurs en groupes orthogonaux, avec des utilisateurs alignés dans chaque groupe, et de décider de l'ordre approprié des utilisateurs dans chaque groupe.	La planification des utilisateurs est la plus simple car RS s'adapte à tous les scénarios de déploiement d'utilisateurs, ne dépend pas du regroupement des utilisateurs ni de leur ordre.	Il s'agit de choisir parmi différents regroupements sans prendre en compte l'ordre de décodage des utilisateurs au sein de chaque groupe.	Complexe, car cela nécessite de décider de l'ordre de décodage approprié des flux ayant le même ordre de flux.
Complexité du récepteur	Ne nécessite aucune SIC.	Nécessite plusieurs couches de SIC.	Nécessite plusieurs couches de SIC dans chaque groupe et une seule couche de SIC si les groupes sont constitués de 2 utilisateurs.	Nécessite une seule couche de SIC pour tous les utilisateurs.	Nécessite 2 couches de SIC chez chaque utilisateur.	Nécessite plusieurs couches de SIC.
Architecture du décodeur	Traiter les interférences comme du bruit.	SIC aux récepteurs.		SIC aux récepteurs.		

TABLE 3.3 – Comparaison qualitative de la complexité de différentes stratégies d'accès multiple [Mao+22].

## 3.6 Conclusion

Ce chapitre a jeté les bases nécessaires à la compréhension approfondie du chapitre 4. L'analyse approfondie des paramètres clés du système et des mesures de performance des techniques d'accès contribuera à l'optimisation des systèmes de communication de cinquième génération.

# Chapitre 4

## Simulations & interprétations des résultats

### 4.1 Introduction

Dans ce dernier chapitre, une comparative des performances des techniques RSMA, NOMA et SDMA est menée pour mettre en évidence l'efficacité et la capacité de la technique RSMA à répondre aux exigences massives des systèmes 5G. Dans les sections suivantes, nous décrivons en détail l'environnement de simulation que nous avons utilisé, ainsi que les outils supplémentaires nécessaires pour mener à bien notre étude. De plus, nous présentons les résultats détaillés de nos simulations, qui couvrent un large éventail de mesures de performances, allant des débits régionaux aux débits pondérés par somme, en passant par l'efficacité énergétique et les degrés de liberté. Ensuite, nous procédons à une analyse approfondie de ces résultats afin d'évaluer les performances des techniques NOMA, SDMA et RSMA. Enfin, nous concluons ce chapitre en tirant les enseignements principaux de notre étude.

### 4.2 Présentation de matlab

MATLAB est un langage de programmation et un environnement de calcul numérique développé par MathWorks. Il est largement utilisé dans les domaines de l'ingénierie, des sciences et des mathématiques, offre des capacités puissantes pour effectuer des calculs numériques, y compris des opérations sur des matrices, des tableaux et des vecteurs. Il utilise des matrices comme structure de données de base, ce qui le rend idéal pour des tâches impliquant des opérations matricielles et algébriques linéaires. Il fournit un Environnement de développement intégré (IDE) complet avec un éditeur de code, un débogueur et des outils de visualisation. Il propose une large gamme de bibliothèques et d'outils intégrés pour une variété de domaines, notamment l'analyse de signaux, le traitement d'images.

### 4.2.1 CVX Toolbox

CVX toolbox est un logiciel conçu pour résoudre des problèmes d'optimisation convexe dans l'environnement MATLAB.

CVX est un système de modélisation qui transforme Matab en langage de modélisation, permettant de spécifier les contraintes et les objectifs à l'aide de la syntaxe d'expression standard de Matlab [GB20].

### 4.2.2 YALMIP Toolbox

YALMIP est un acronyme de Yet Another LMI Toolbox for MATLAB. C'est une toolbox open-source développée pour MATLAB, spécialisée dans la modélisation et la résolution de problèmes d'optimisation convexe et non convexe.

YALMIP prend en charge un plus grand nombre de problèmes d'optimisation que CVX. Il peut traiter des programmes linéaires (LPs), des programmes semi-définis (SDPs), des programmes linéaires mixtes (MILPs), et même des types de problèmes plus spécialisés.

YALMIP offre une interface conviviale qui permet aux utilisateurs de définir rapidement et facilement des problèmes d'optimisation. Il génère automatiquement les modèles d'optimisation correspondants qui peuvent être résolus à l'aide de solveurs d'optimisation externes intégrés à MATLAB par exemple MOSEK, SDPT3. Il est largement utilisé dans les domaines de l'ingénierie, de la recherche opérationnelle, les mathématiques appliquées.

## 4.3 Présentation et analyse des résultats

En premier lieu, nous présentons la région de débits réalisable des différentes stratégies, puis nous énumérons leurs WSR. Nous mettons également en évidence leur région d'EE et leur région de DoF. Dans toutes les illustrations suivantes :

- SC-SIC désigne NOMA.
- MU-LP désigne SDMA.
- RS désigne RSMA.

### 4.3.1 La Région de débits réalisable

Lorsque  $K = 2$ , la région de débits de toutes les stratégies peut être comparée explicitement dans une figure bidimensionnelle. La région de débits est l'ensemble de tous les points réalisables. Sa limite est calculée en faisant varier les poids attribués aux utilisateurs. Dans ce travail, le poids de l'utilisateur 1 est fixé à  $u_1 = 1$ . Le poids de l'utilisateur 2 varie comme suit :  $\mu_2 = 10^{[-3, -1, -0.95, \dots, 0.95, 1, 3]}$  [MCL18b].

Lorsque  $N_t = 4$ , les canaux des utilisateurs sont réalisés comme suit :  $h_1 = [1, 1, 1, 1]^H$ , et  $h_2 = \gamma \times [1, e^{j\theta}, e^{j2\theta}, e^{j3\theta}]^H$  [MCL18b].

- $\gamma$  est responsable de la perte de trajet supplémentaire que subit la puissance du canal de l'utilisateur-2. La puissance du canal de l'utilisateur-1 est égale à celle de l'utilisateur-2 lorsque  $\gamma = 1$ . Lorsque  $\gamma$  est égal à 0.75, l'utilisateur-2

perd un gain de 1 dB de distance par rapport à l'utilisateur-1. En cas de  $\gamma$  égal à 0.5, l'utilisateur-2 enregistre une perte de trajet supplémentaire de 3 dB par rapport à l'utilisateur-1 [MCL18b].

- Le paramètre  $\theta$  contrôle l'angle entre les canaux de l'utilisateur-1 et de l'utilisateur-2. Il varie de 0 à  $\frac{\pi}{2}$ . Si  $\theta = 0$ , le canal de l'utilisateur-1 est aligné sur celui de l'utilisateur-2. Si  $\theta = \frac{\pi}{2}$ , les canaux de l'utilisateur-1 et de l'utilisateur-2 sont orthogonaux l'un par rapport à l'autre. Pour chaque  $\gamma$ ,  $\theta$  adopte une valeur de  $\theta = [\frac{\pi}{9}, \frac{2\pi}{9}, \frac{3\pi}{9}, \frac{4\pi}{9}]$ . Lorsque  $\theta$  est inférieur à  $\frac{\pi}{9}$ , les canaux des utilisateurs sont suffisamment alignés et SC-SIC fonctionne bien. Lorsque  $\theta$  est supérieur à  $\frac{4\pi}{9}$ , les canaux des utilisateurs sont suffisamment orthogonaux les uns par rapport aux autres et MU-LP est mieux adapté. Par conséquent, nous considérons des angles dans la plage de  $\frac{\pi}{9}, \frac{4\pi}{9}$  [MCL18b].

#### 4.3.1.1 Déploiement sous-chargé à 2 utilisateurs avec un CSIT parfait

Dans le scénario CSIT parfait, la région de capacité est atteinte par la DPC. Par conséquent, nous comparons d'autres régions de différentes stratégies de formation de faisceaux avec la région DPC [MCL18b].

Effet de la puissance du canal :

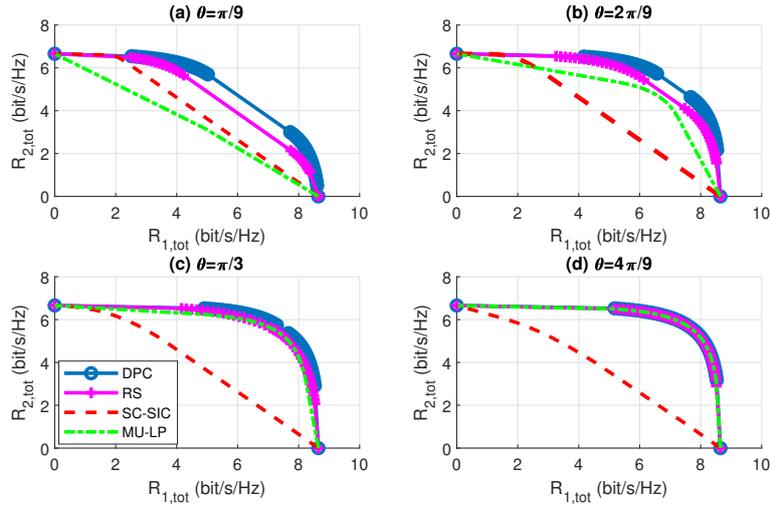


FIGURE 4.1 – La région de débits réalisables pour les différentes stratégies dans un déploiement à 2 utilisateurs sous-chargé, avec un CSIT parfait, SNR= 20 dB,  $\gamma = 0.5$ .

Dans la figure 4.1, il est observé que la région *RS* dépasse les régions *SC-SIC* et *MU-LP*. Il est également constaté que, lorsque  $\theta = \frac{\pi}{9}$ , *SC-SIC* atteint une région spécifique, plus étendue que *MU-LP* en raison de l'alignement des canaux pour cet angle particulier. Cependant, à mesure que  $\theta$  augmente, la région de *MU-LP* s'étend et dépasse celle de *SC-SIC*, qui reste pratiquement constante. Les performances de *MU-LP* s'améliorent jusqu'à atteindre la région de *RS* pour  $\theta = \frac{4\pi}{9}$ , c'est-à-dire lorsque les canaux deviennent suffisamment orthogonaux.

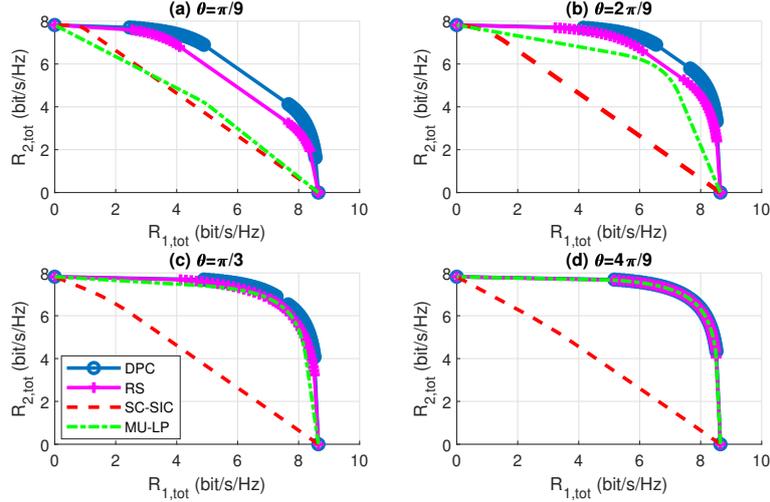


FIGURE 4.2 – La région de débits réalisables pour les différentes stratégies dans un déploiement à 2 utilisateurs sous-chargé avec un CSIT parfait,  $\text{SNR} = 20$  dB,  $\gamma = 0.75$ .

Il est observé dans la figure 4.2 que la région de débits pour les trois stratégies s'étend sur l'axe des ordonnées, contrairement à celle de la figure 4.1. En raison de la diminution des pertes de trajet supplémentaires, l'intervalle des valeurs de débits réalisables pour l'utilisateur-2 a augmenté. La région *MU-LP* est plus élevée que la région *SC-SIC*, à l'exception de l'angle  $\frac{\pi}{9}$  et cela ne concerne que l'intervalle d'étalement de  $R_{2,\text{tot}}$ .

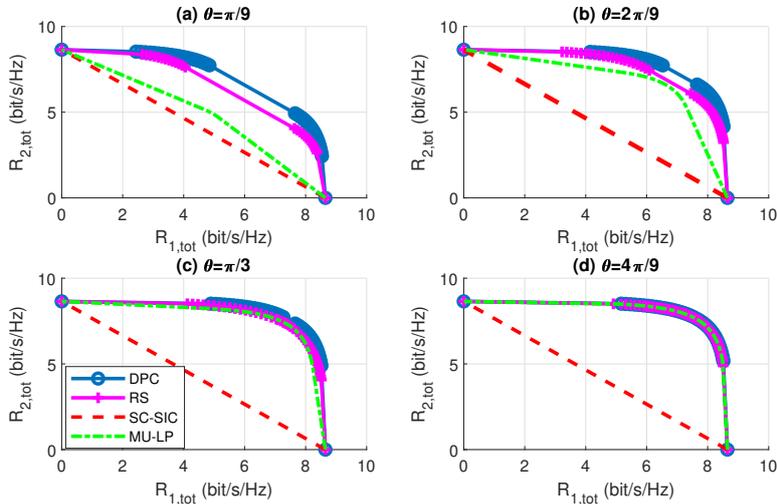


FIGURE 4.3 – La région de débits réalisables pour les différentes stratégies dans un déploiement à 2 utilisateurs sous-chargé avec un CSIT parfait,  $\text{SNR} = 20$  dB,  $\gamma = 1$ .

La figure 4.3 montre une région encore plus étendue pour toutes les stratégies, avec *RS* restant la stratégie la plus performante. Pour tous les angles, la région *MU-LP* est supérieure à la région *SC-SIC* et est la plus proche de la région *RS*. La région de débits atteinte par *RS* est la plus étendue dans toutes les figures. En outre, *RS* permet d'atteindre la zone de capacité pour une valeur de  $\theta = \frac{4\pi}{9}$ . Lorsque les

puissances de canal des deux utilisateurs sont équivalentes, c'est-à-dire  $\gamma = 1$ ,  $RS$  atteint sa région de débits maximale.

Effet du rapport signal sur bruit (SNR) :

Les figures 4.4 et 4.5 montrent l'impact du SNR sur la région de débits réalisables pour les différentes stratégies dans un déploiement à 2 utilisateurs sous-chargé avec un CSIT parfait.

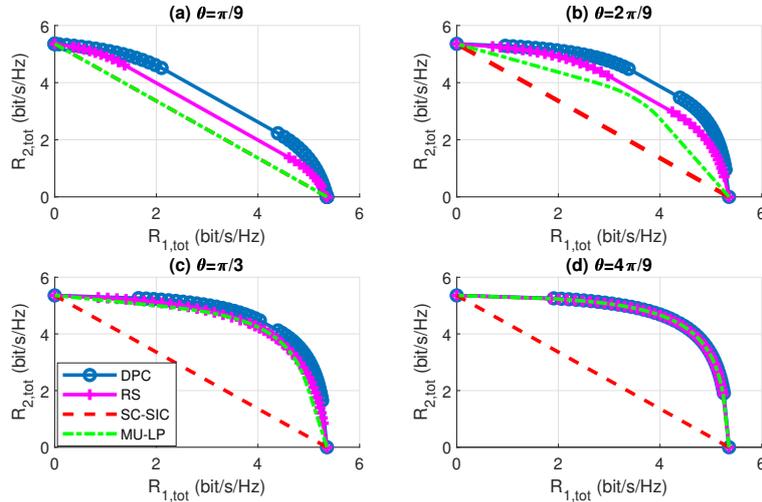


FIGURE 4.4 – la région de débits réalisable pour les différentes stratégies dans un déploiement à 2 utilisateurs sous-chargé un CSIT parfait,  $\gamma = 1$ , SNR= 10 dB.

La région de capacité et les régions de débits réalisables pour les trois stratégies se réduisent lorsque le SNR diminue, comme le montre la figure 4.4. La principale cause de cette baisse est l'augmentation de la puissance du bruit. La région constante de la stratégie  $SC-SIC$  est la plus petite des régions visualisées, ce qui témoigne de ses limites en termes de débits réalisables. En revanche, à mesure que la valeur de  $\theta$  augmente, les régions de  $RS$  et de  $MU-LP$  s'améliorent. La région de  $RS$  demeure toujours la plus étendue parmi les deux, prouvant ainsi sa supériorité par rapport aux autres stratégies.

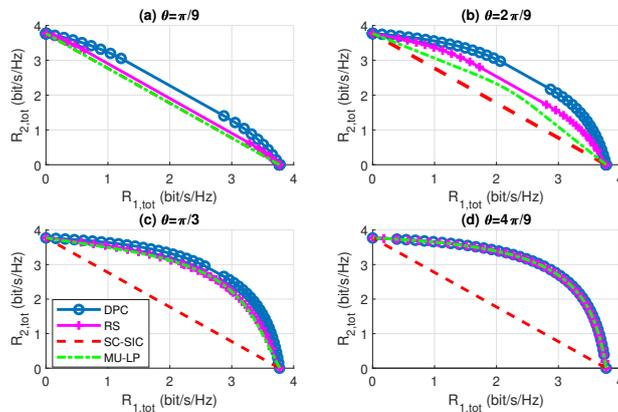


FIGURE 4.5 – la région de débits réalisable pour les différentes stratégies dans un déploiement à 2 utilisateurs sous-chargé un CSIT parfait,  $\gamma = 1$ , SNR= 5 dB.

Des résultats similaires sont observés dans la figure 4.5, avec un SNR encore plus faible. Les régions de capacité et de débits réalisables pour toutes les stratégies deviennent de plus en plus restreintes. Toutefois, il est observé que la stratégie *RS* continue de prédominer avec la plus grande plage de débits réalisables, suivie de la stratégie *MU-LP*

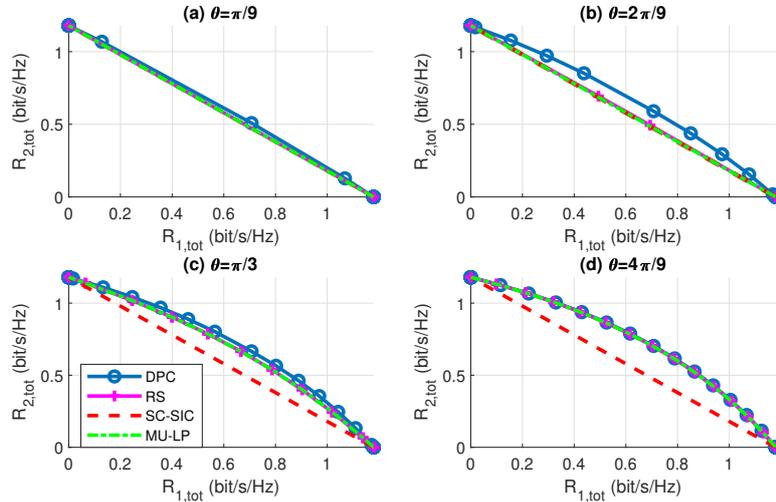


FIGURE 4.6 – la région de débits réalisable pour les différentes stratégies dans un déploiement à 2 utilisateurs sous-chargé un CSIT parfait,  $\gamma = 1$ , SNR =  $-5$  dB.

La figure 4.6 montre des pertes significatives dans toutes les régions pour une valeur de SNR de  $-5$  dB. Cela implique que la valeur du signal utile est minime par rapport au bruit. Lorsque le SNR est faible, les débits réalisables sont limités. Toutes les stratégies deviennent extrêmement restreintes. La stratégie *RS* maintient des performances relativement bonnes par rapport à la stratégie *SC-SIC* et reste similaire à *MU-LP*, mais la plage de débits réalisables pour toutes les stratégies est considérablement réduite.

#### 4.3.1.2 La Transmission conjointe unicast et multicast dans des déploiements sous-chargés de deux utilisateurs avec CSIT parfait

Dans cette partie, nous analysons comment la contrainte de débit multicast et l'angle du canal entre les utilisateurs impactent la région de débits.

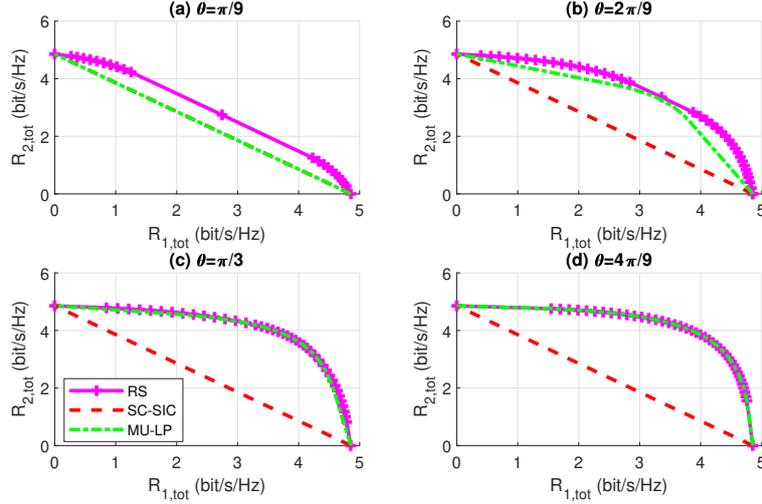


FIGURE 4.7 – la région de débits réalisable pour les différentes stratégies dans une transmission unicast et multicast avec un CSIT parfait,  $\gamma = 1$ ,  $R_0^{\text{th}} = 0.5$  bit/s/Hz.

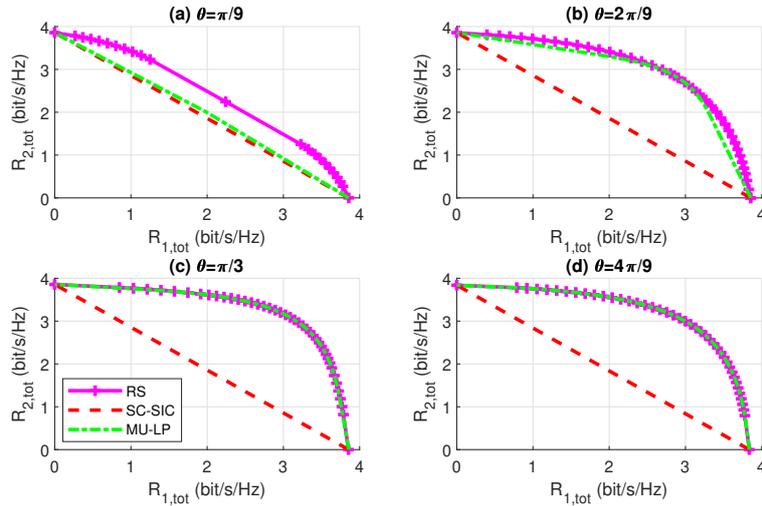


FIGURE 4.8 – La région de débits réalisable pour les différentes stratégies dans une transmission unicast et multicast avec un CSIT parfait,  $\gamma = 1$ ,  $R_0^{\text{th}} = 1.5$  bit/s/Hz.

Les figures 4.7 et 4.8 montrent que, pour les deux valeurs du seuil, la région de débits atteinte par *RS* est la plus étendue. L'augmentation de l'angle entre les canaux des deux utilisateurs entraîne une légère augmentation de la région de *RS*. Cependant, plus les deux canaux s'éloignent de l'orthogonalité, plus les régions *MU-LP* et *RS* tendent à se confondre. En revanche, la stratégie *SC-SIC* montre des résultats constants.

L'augmentation du seuil de débit du message multicast entraîne également une diminution de la région de débits pour les trois techniques, car les collisions lors de la transmission du message multicast deviennent plus fréquentes.

### 4.3.1.3 Cas de deux utilisateurs sous-chargé avec un CSIT imparfait

Dans le cas d'un CSIT imparfait, nous considérons que les deux utilisateurs font une estimation parfaite du canal, tandis que l'estimation du canal instantané à la station de base est imparfaite [MCL18b].

Effet du rapport signal sur bruit (SNR) avec un CSIT imparfait :

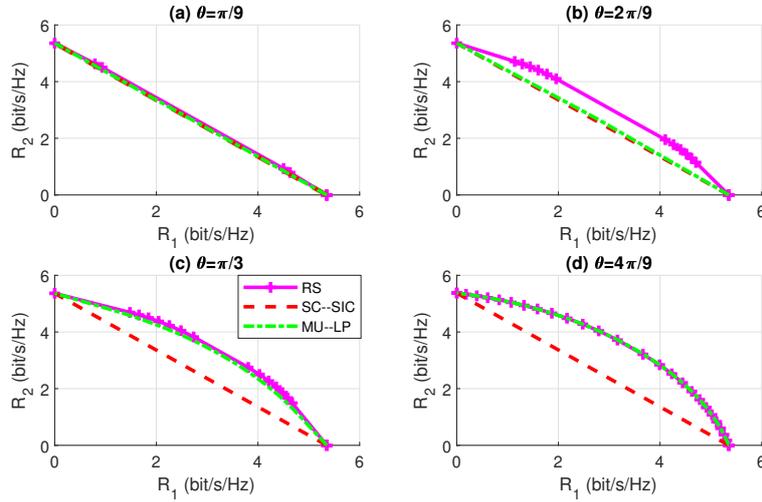


FIGURE 4.9 – la région de débits réalisable pour les différentes stratégies dans un déploiement à 2 utilisateurs sous-chargé un CSIT imparfait,  $\gamma = 1$ , SNR= 10 dB.

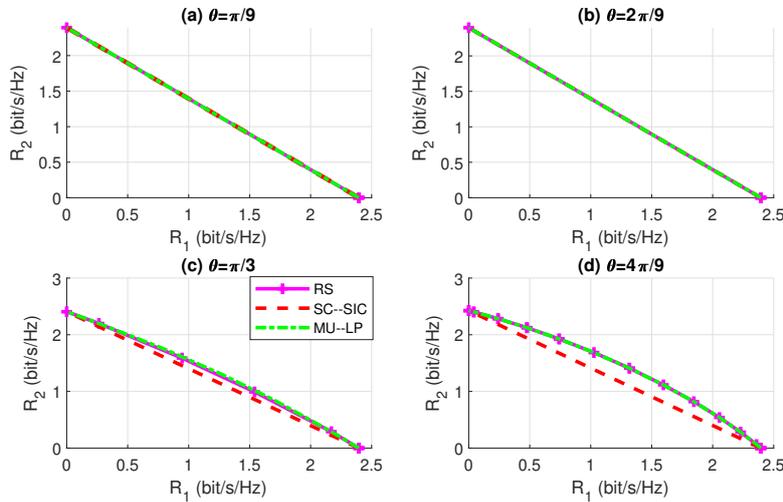


FIGURE 4.10 – la région de débits réalisable pour les différentes stratégies dans un déploiement à 2 utilisateurs sous-chargé un CSIT imparfait,  $\gamma = 1$ , SNR= 5 dB.

Les trois figures 4.9, 4.10 et 4.11 montrent que la réduction du SNR entraîne une diminution de la région de débits réalisables et de la région de capacité, similairement au cas du CSIT parfait.

Il est également remarqué que la stratégie *RS* couvre la plus grande région. Lorsque les canaux des deux utilisateurs sont orthogonaux, la région de *MU-LP* se rapproche

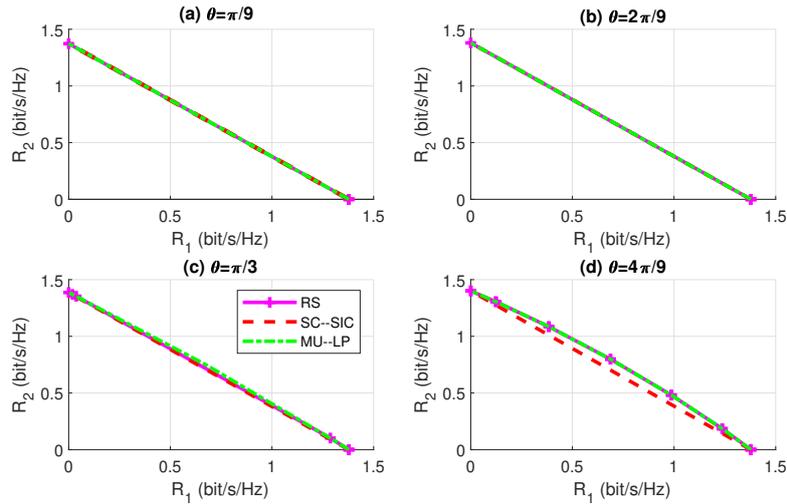


FIGURE 4.11 – la région de débits réalisable pour les différentes stratégies dans un déploiement à 2 utilisateurs sous-chargé un CSIT imparfait,  $\gamma = 1$ ,  $\text{SNR} = -5$  dB.

de celle de *RS*. En revanche, la méthode *SC-SIC* atteint son maximum de région lorsque les canaux sont alignés.

Effet de la qualité du CSIT (parfaite/imparfaite) :

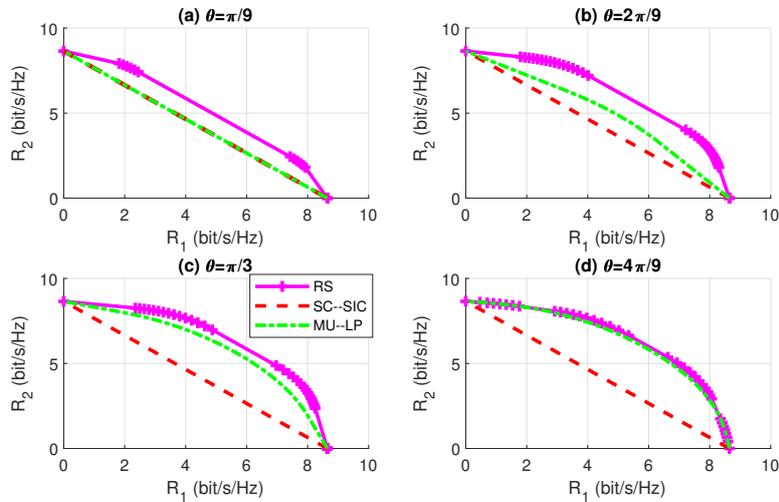


FIGURE 4.12 – la région de débits réalisable pour les différentes stratégies dans un déploiement à 2 utilisateurs sous-chargé un CSIT imparfait,  $\gamma = 1$ ,  $\text{SNR} = 20$  dB.

La région d'écart entre *RS* et *MU-LP*, représentée dans la figure 4.12 avec un CSIT imparfait, est plus étendue que celle représentée dans la figure 4.3 avec un CSIT parfait. Ainsi, *RS* est la méthode la plus efficace dans le cas de CSIT imparfait, ce qui correspond le plus à la réalité.

## 4.3.2 La somme de débits pondérés

### 4.3.2.1 Un déploiement sous-chargé à trois utilisateurs avec CSIT parfait

Lorsque  $K = 3$ , la région de débits de chaque stratégie est une surface tridimensionnelle. Les écarts entre les régions de débits des différentes stratégies sont difficiles à représenter. Comme chaque point de la région est dérivé de la résolution du problème des WSR à l'aide d'un vecteur de poids fixe, les WSRs au lieu des régions de débits des différentes stratégies de transmission sont comparés dans le cas de trois utilisateurs [MCL18b].

La station de base est équipée de quatre antennes d'émission ( $N_t = 4$ ) et dessert trois utilisateurs à antenne unique dans toutes les simulations. Le canal des utilisateurs est réalisé comme suit :  $h_1 = [1, 1, 1, 1]^H$ ,  $h_2 = \gamma_1 \times [1, e^{j\theta_1}, e^{j2\theta_1}, e^{j3\theta_1}]^H$ ,  $h_3 = \gamma_2 \times [1, e^{j\theta_2}, e^{j2\theta_2}, e^{j3\theta_2}]^H$ . Nous supposons que la somme des poids attribués aux utilisateurs est égale à un, c'est-à-dire que  $u_1 + u_2 + u_3 = 1$  [MCL18b].

Effet du SNR sur la somme des débits pondérés :

Nous analysons les valeurs de SNR dans la plage de [0 à 30] dB dans la figure 4.13. Il est observé que la stratégie RS est la plus efficace, tandis que SC-SIC est la moins efficace, indépendamment des valeurs des angles et sur toute la plage de SNR disponible.

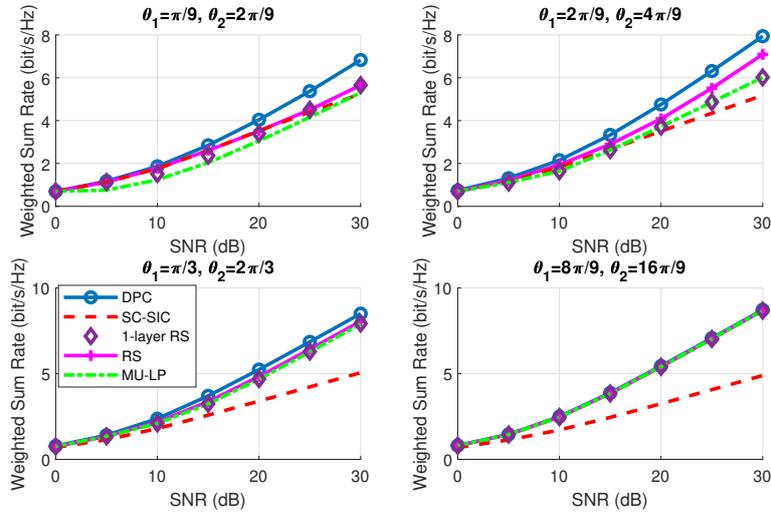


FIGURE 4.13 – WSR en fonction du SNR pour un déploiement sous-chargé à trois utilisateurs avec un CSIT parfait,  $\gamma_1 = 1$ ,  $\gamma_2 = 0.3$ ,  $\mu_1 = 0.2$ ,  $\mu_2 = 0.3$ ,  $\mu_3 = 0.5$ ,  $N_c = 4$ ,  $SNR \in [0 - 30]$  dB.

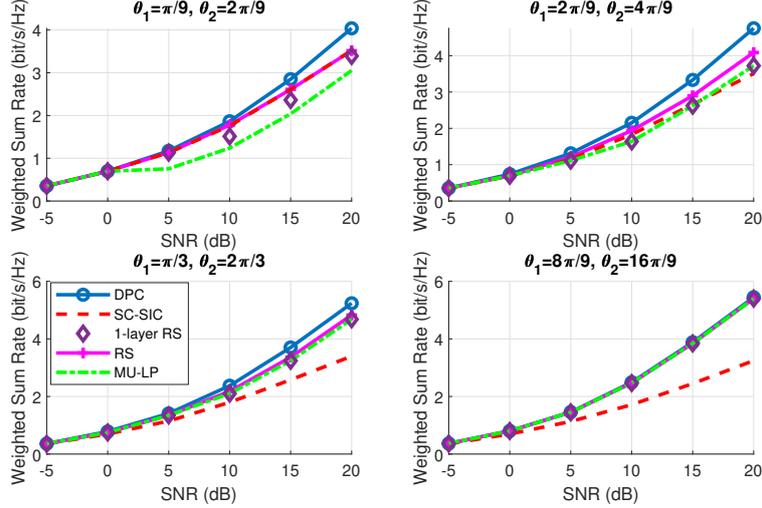


FIGURE 4.14 – WSR en fonction du SNR pour un déploiement sous-chargé à trois utilisateurs avec un CSIT parfait,  $\gamma_1 = 1$ ,  $\gamma_2 = 0.3$ ,  $\mu_1 = 0.2$ ,  $\mu_2 = 0.3$ ,  $\mu_3 = 0.5$ ,  $N_c = 4$ ,  $SNR \in [-10 - 20]$  dB.

Dans la figure 4.14, nous examinons les valeurs de SNR dans la plage de  $[-10-20]$  dB. On observe une diminution des régions de débits pour toutes les stratégies, de  $-5$  à  $20$  dB de SNR. De plus, il n’y a pas de changement du WSR dans la plage de  $-10$  à  $-5$  dB. Cette observation peut s’expliquer par le fait que le signal est entièrement absorbé par le bruit. Cela suggère que le WSR est une mesure prenant en compte la qualité du signal.

### 4.3.3 La région d’efficacité énergétique réalisable

La région EE à deux utilisateurs est constituée de toutes les paires EE individuelles réalisables ( $EE1, EE2$ ). L’EE individuelle est définie comme le rendement individuel divisé par la puissance [MCL18a].

La limite de la région EE est calculée en faisant varier les poids attribués aux utilisateurs. Le poids de l’utilisateur 1 est fixé ici à  $u_1 = 1$  et celui de l’utilisateur 2 est modifié comme suit :  $u_2 = [10^{-3}, -1, -0.95, \dots, 0.95, 1, 3]$ . Sans perte de généralité, on considère une variance de bruit unitaire ( $\sigma_{n,k} = 1$ ) et une largeur de bande unitaire ( $W = 1$  Hz). La contrainte de puissance d’émission est de  $P_t = 40$  dBm. Nous suivons le modèle de canal pour étudier l’effet de l’angle du canal et de la disparité des canaux sur la forme de la région EE. Les canaux sont donnés par  $h_1 = [1, 1, 1, 1]^H$ ,  $h_2 = \gamma \times [1, e^{j\theta}, e^{j2\theta}, e^{j3\theta}]^H$  [MCL18a].

où :

- $\gamma$  contrôle la disparité du gain du canal.
- $\theta$  contrôle l’angle du canal.

Effet de la puissance dynamique :

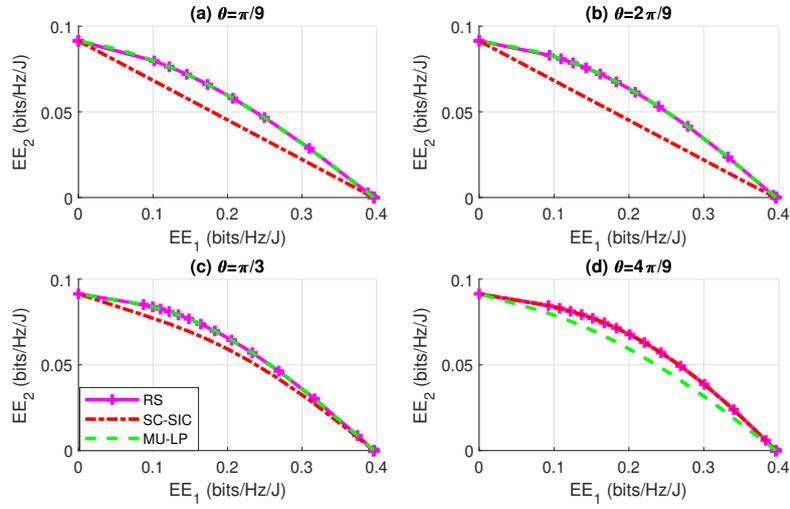


FIGURE 4.15 – Comparaison des régions d’efficacité énergétique réalisables différents schémas,  $\gamma = 0.3$ ,  $P_{dyn} = 27\text{dBm}$ .

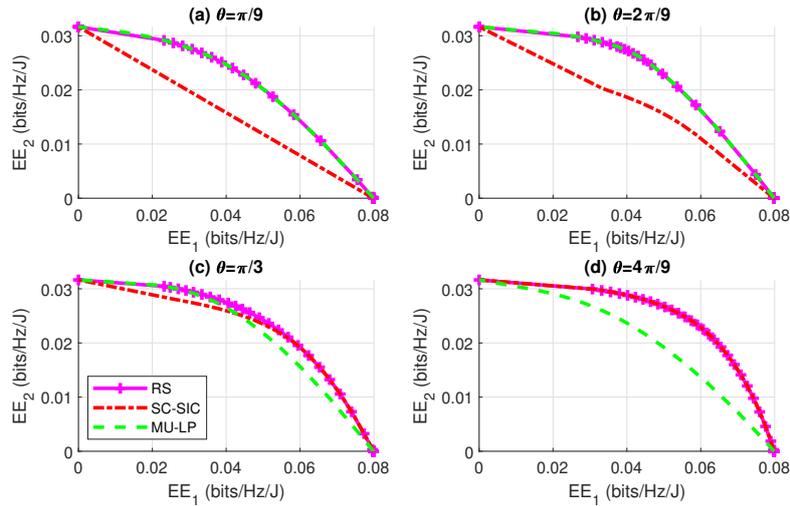


FIGURE 4.16 – Comparaison des régions d’efficacité énergétique réalisables différents schémas,  $\gamma = 0.3$ ,  $P_{dyn} = 40\text{dBm}$ .

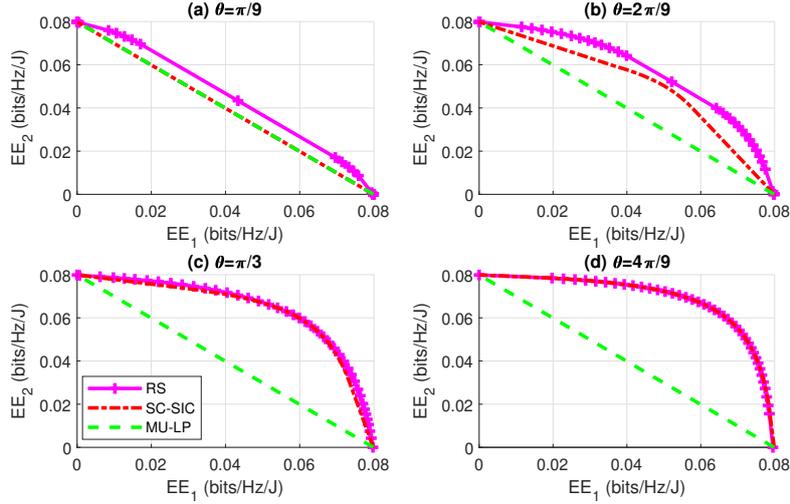


FIGURE 4.17 – Comparaison des régions d’efficacité énergétique réalisables différents schémas,  $\gamma = 1$ ,  $P_{dyn} = 40\text{dBm}$ .

La figure 4.15 met clairement en évidence que la région d’efficacité énergétique de *RS* est supérieure à celle de *SC-SIC* et *MU-LP*. Les figures 4.15 et 4.16 montrent qu’une augmentation de la puissance dynamique entraîne une diminution des régions d’efficacité énergétique en raison d’une plus grande consommation d’énergie, ce qui est essentiel pour réaliser les transmissions. Toutefois, cette région peut être améliorée en supprimant les pertes de trajet supplémentaires pour l’utilisateur-2, comme illustré dans la figure 4.17.

#### 4.3.4 La région de degré de liberté

Les résultats des gains de multiplexage total et du gain de multiplexage Max-Min Fairness pour un système de communication comportant  $M = 6$  antennes sont illustrés dans les figures 4.18 et 4.19. Le nombre d’utilisateurs  $K$  est pris en compte en tenant compte à la fois de la qualité du CSIT (parfaite et imparfaite) et du facteur d’échelle CSIT  $\alpha = 0.5$ .

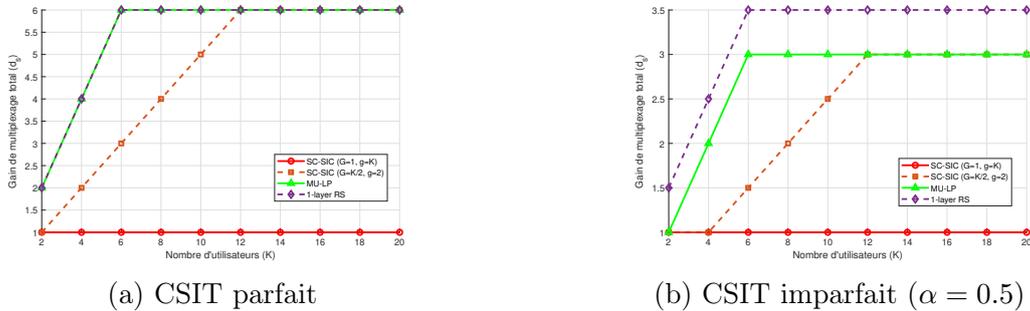


FIGURE 4.18 – Gain de multiplexage total en fonction du nombre d’utilisateurs  $K$  pour  $M = 6$ .

Les données présentées dans la figure 4.18 montrent que les gains de multiplexage total du SC-SIC et du SC-SIC par groupe sont plus faibles que ceux du RS à une

seule couche. Selon cette observation, le RS à une seule couche semble être plus efficace que NOMA.

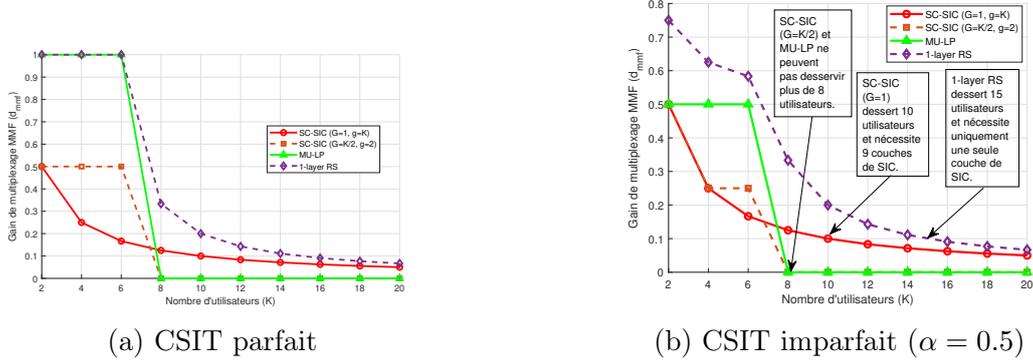


FIGURE 4.19 – Gain de multiplexage MMF en fonction du nombre d'utilisateurs  $K$  pour  $M = 6$ .

Lorsque  $K$  dépasse  $M$ , SC-SIC avec  $K - 1$  couches de SIC semble être plus approprié que SC-SIC par groupe et MU-LP pour desservir un grand nombre d'utilisateurs, comme le montre la figure 4.19. L'augmentation du nombre d'utilisateurs entraîne une diminution significative des gains de multiplexage MMF du SC-SIC par groupe et de MU-LP, ce qui suggère une difficulté à maintenir un débit minimal équitable avec  $K \geq 8$ . En revanche, SC-SIC affiche toujours un gain de multiplexage MMF positif. Notamment, même en utilisant une seule couche de SIC, la technique RS à une seule couche est supérieure aux autres techniques en permettant de gérer un nombre plus important d'utilisateurs tout en préservant une qualité de service satisfaisante.

Selon la figure 4.19b, en appliquant un seuil de MMF-DoF de 0,1 pour tous les utilisateurs, il est observé que la méthode RS à une seule couche peut accueillir environ 15 utilisateurs avec une seule couche de SIC, tandis que la méthode SC-SIC peut également accueillir environ 15 utilisateurs avec une seule couche de SIC. Seuls 10 utilisateurs peuvent être desservis avec 9 couches de SIC. En outre, la SC-SIC par groupe et MU-LP ne peuvent accueillir plus de 8 utilisateurs. Ces résultats démontrent que RS à une seule couche est nettement supérieur à NOMA et SDMA.

## 4.4 Conclusion

À travers l'observation et l'analyse des résultats obtenus, nous avons identifié plusieurs éléments clés :

La technique RSMA offre la plus grande résistance à la baisse de la qualité du CSIT par rapport aux autres techniques. La région de débits et le WSR sont principalement influencés par le SNR dans tous les scénarios étudiés. Le fait que la puissance du canal de l'utilisateur-2 subit une perte de trajet supplémentaire (augmentation de  $\gamma$ ) élargit l'échelle des débits réalisables de l'utilisateur-2. Cela améliore les débits dans la région, le WSR, ainsi que la région d'EE lorsque la puissance dynamique augmente.

# Conclusion générale

Ce travail avait pour objectif d'étudier la technique d'accès RSMA dans un système de communication 5G, en comparant ses performances avec celles des techniques NOMA et SDMA dans l'environnement de simulation Matlab. La comparaison de ces trois techniques inclut plusieurs mesures de performances dans différents scénarios de déploiement. On peut résumer les conclusions tirées des résultats de simulation comme suit :

En termes de région de débits, RSMA a dépassé NOMA et SDMA en démontrant une plus grande robustesse face aux imprécisions du CSIT que les autres techniques.

En ce qui concerne la mesure de la somme des débits pondérés, la technique RSMA s'est avérée être la plus performante. Ses performances diminuent avec la réduction des valeurs du SNR, mais cette baisse n'est pas observée pour des valeurs de SNR inférieures à -5 dB.

La zone d'efficacité énergétique potentielle s'élargit avec la diminution des pertes de trajet supplémentaires et se réduit avec l'augmentation de la puissance dynamique.

L'analyse comparative du gain de multiplexage MMF a révélé que la technique RS à couche unique offre une meilleure efficacité en termes de capacité à servir un plus grand nombre d'utilisateurs tout en maintenant une qualité de service satisfaisante.

Les résultats de simulation vérifie que la technique RSMA est une généralisation des approches NOMA et SDMA. Bien que ces mesures de performances soient suffisantes pour distinguer la technique la plus performante parmi les trois, celle de la technique RSMA dans divers scénarios reste indéterminées.

Ces scénarios pourraient être explorés comme des pistes de recherche prometteuses pour une meilleure compréhension de la RSMA. Cela permettrait d'accroître la résilience de la RSMA face à la diversité des paramètres présents dans les systèmes de communication 5G, tout en facilitant son adaptation aux exigences des systèmes de la 6G. Exploiter pleinement la RSMA dans le contexte de la 6G revêt une importance capitale pour tirer parti de tout le potentiel de cette technique.

Le travail effectué ouvre la voie à de nombreuses opportunités de recherche futures dans le domaine du Rate Splitting Multiple Access (RSMA), en exploitant l'intelligence artificielle pour générer les paramètres du système.

# Annexe A

## A.1 L'évolution des réseaux mobiles

Les réseaux mobiles suscitent actuellement des débats intenses en raison du déploiement de la 5G. Toutefois, il est crucial de comprendre les distinctions entre les différentes générations de réseaux, symbolisées par 1G, 2G, G, E, 3G, H+, 4G et 4G+. Ces symboles déterminent le type de réseau mobile auquel nous sommes connectés, ce qui influence la qualité des appels, le débit et les performances de la connexion Internet mobile.

Depuis l'avènement des téléphones portables, quatre générations de réseaux mobiles ont été successivement déployées : la 1G, la 2G, la 3G et la 4G, chacune apportant ses propres innovations et améliorations. L'évolution vers la 5G promet des avancées significatives, mais soulève également des questions et des controverses, notamment en ce qui concerne la santé, l'environnement et l'infrastructure.

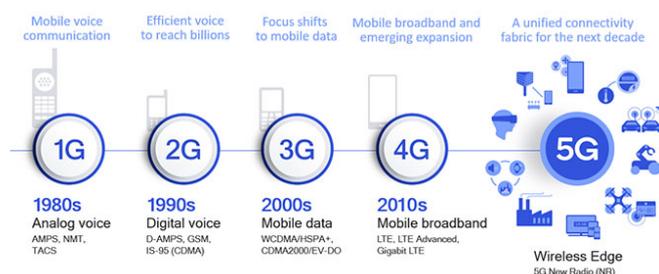


FIGURE A.1 – L'évolution des réseaux mobiles [BBN24].

### A.1.1 La technologie 1G

Au cours des années 80, la 1G est considérée comme la première génération de réseaux mobiles, spécialement conçue pour les appels vocaux et basée sur la technologie analogique appelée Advanced Mobile Phone System (AMPS). Le système AMPS était modulé en fréquence et utilisait l'accès multiple par répartition en fréquence (FDMA) avec une capacité de canal de 30 kHz et une bande de fréquence de 824-894 MHz. Il supportait une vitesse allant jusqu'à 2,4 kbps. En 1988, AMPS s'est vu attribuer une bande passante supplémentaire de 10 MHz appelée Expanded Spectrum [Gaw15].

### A.1.2 La technologie 2G

La deuxième génération du système de communication mobile sans fil est une technologie numérique. Elle utilise des signaux numériques pour la transmission vocale et a une vitesse de 64kbps. Sa bande passante est de 30-200KH. Elle fournit des services tels que des messages services courts (SMS), des messages image et des services de messagerie multimédia (MMS). Il utilise des schémas de modulation numérique tels que Time Division Multiple Access (TDMA) et Code Division Multiple Access (CDMA). TDMA permet la division des signaux en plages horaires. CDMA fournit à chaque utilisateur un code spécial pour communiquer sur un canal physique multiplex. GSM (Global System for Mobile Communication) est la norme mobile 2G la plus largement utilisée. La technologie GSM a été la première à prendre en charge l'itinérance internationale. Cela a permis aux abonnés mobiles d'utiliser leurs connexions de téléphonie mobile dans différents pays du monde avec une meilleure qualité et une meilleure capacité [Gaw15].

La technologie GSM a été continuellement améliorée afin de fournir de meilleurs services, ce qui a mené au développement de systèmes avancés tels que 2.5G et 2.75G qui se situent entre les technologies 2G et 3G.

- **2,5G également connu sous le nom GPRS (General Packet Radio System)** offre une amélioration significative du débit maximal de transfert de données, atteignant un débit maximal de 171,2 Kbit/s. Il permet de transmettre des données de volume modéré. Il s'agit du pionnier de l'internet mobile.
- **2.75G EDGE (Enhanced Data Rate for Global Evolution)** désigne les améliorations des débits de données pour GSM et représente une étape supplémentaire après GPRS. On pourrait obtenir des débits de données allant jusqu'à 500 kbps.

### A.1.3 La technologie 3G

La 3G utilise la norme UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). Elle a pour but de prendre la relève des systèmes de la 2G. Elle supporte des services multimédias à haut débit (2Mbps) et en mobilité. Permet d'offrir une large gamme de services, intégrant la voix, les données et les images. Les bandes de fréquences allouées à l'UMTS se situent autour des 2 GHz avec une largeur de bande de 230 MHz. L'accès au canal utilise la technique du W-CDMA (Wide band Code Division Multiple Access). Le CDMA franchit une étape supplémentaire, en permettant à tous les utilisateurs d'émettre en même temps, à la même fréquence grâce à la modulation à étalement de spectre. Avec CDMA, 9 paquets peuvent être envoyés dans le même intervalle de temps.

La 3G a connu trois évolutions :

- **La 3G+ aussi appelée « H » pour HSPA (High Speed Packet Access)**, avec un débit compris entre 300 kbps et 14,4 Mbps.
- **Le H+ (ou HSPA+)**, avec un débit moyen de 5 Mbps.
- **Le H+ Dual Carrier (ou DC-HSPA+)**, avec un débit plafond de 42 Mbps.

### A.1.4 La technologie 4G

Les systèmes de communication de quatrième génération est basée sur la norme LTE (Long Term Evolution). L'objectif principal de la technologie 4G est de fournir une combinaison de services haut débit, de haute qualité, de haute capacité, de sécurité, de voix et de données à faible coût, de multimédia et d'internet sur IP [Gaw15]. La 4G constitue une évolution de la mobilité non seulement en termes de débits, ceux-ci pouvant en théorie atteindre le gigabit par seconde. L'utilisation de la modulation OFDM et la technologie MIMO autorisent des agrégations de canaux permettant ainsi atteindre les débits annoncés. LTE permet d'atteindre 144 Mbps en débit descendant et 50 Mbps en débit ascendant en utilisant des porteuses de 20MHz, contre 5 MHz en UMTS. En parallèle, le temps de latence du réseau ne devrait pas dépasser 10 ms [Gaw15].

## A.2 Les systèmes de communications 5G

Les générations précédentes de réseaux mobiles visaient à proposer aux utilisateurs du réseau des services de données mobiles rapides et fiables. La portée de la 5G a été étendue afin de proposer une variété de services sans fil accessibles à l'utilisateur final sur différentes plateformes d'accès et réseaux multicouches [Via23].

La 5G représente une communication sans fil complète sans limitation, ce qui nous apporte un monde sans fil parfait, le World Wide Wireless Web (WWWW). Elle marque la prochaine phase majeure des normes de télécommunications mobiles au-delà des normes 4G/IMT-Advanced. La technologie mobile 5G a transformé la manière dont les téléphones portables sont utilisés, offrant un très haut débit. Les utilisateurs n'ont jamais connu une telle technologie de haute valeur. La 5G comprend toutes sortes de fonctionnalités avancées qui la rendent la plus puissante et la plus demandée dans un avenir proche [Sha13].

la 5G devrait également offrir une nouvelle forme de connectivité et d'applications comme les véhicules intelligents, l'IoT (Internet Of Things) , les jeux en temps réel bidirectionnels et les applications dans le Cloud toutes ces choses requièrent une connectivité globale.



FIGURE A.2 – Connectivité dans la 5G [EMF24].

## A.3 Déploiement des réseaux 5G

Deux modèles peuvent être utilisés pour déployer les réseaux 5G : le modèle non-standalone (NSA) et le modèle standalone (SA).

Dans le cadre du modèle NSA qui s'appuie sur les installations existantes du réseau 4G afin de monter graduellement en puissance pour proposer des débits plus importants [SFR].

Quand un dispositif opère dans cette configuration, il se connecte initialement à un réseau 4G LTE, puis, si la 5G est disponible, il peut l'utiliser pour obtenir une bande passante supplémentaire. Dans le modèle SA qui dispose de ses propres installations, comporte d'importantes améliorations en termes de débit et de latence pour les utilisateurs, et est totalement indépendante du réseau 4G [SFR].

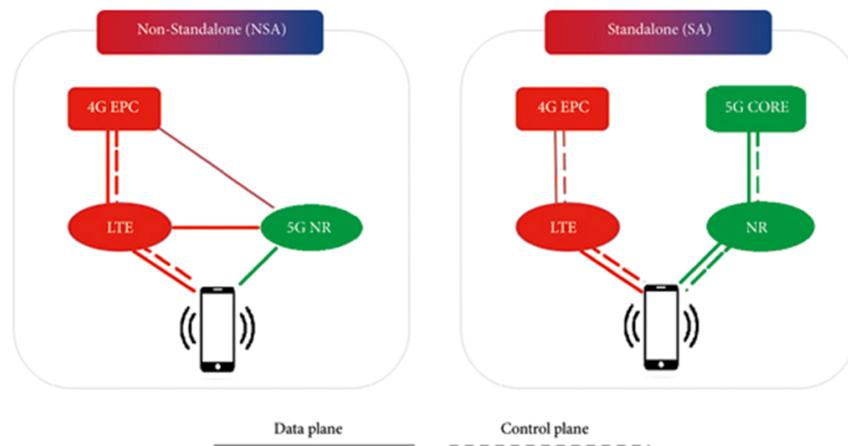


FIGURE A.3 – Architecture 5G-NSA et 5G-SA [Att+22].

# Annexe B

## B.1 Les avantages du RSMA

### B.1.1 Universalité

La RSMA est un système de MA universel qui englobe le SDMA, le NOMA, l'OMA et la multidiffusion en tant que sous-systèmes. En d'autres termes, le RSMA est un surensemble des schémas MA existants et atteint donc toujours des performances égales ou supérieures à celles du SDMA, du NOMA, de l'OMA et de la multidiffusion [Mao+22].

### B.1.2 Flexibilité

La RSMA est une stratégie flexible pour gérer les interférences multi-utilisateurs provenant de différentes sources. Contrairement à d'autres stratégies telles que la SDMA et la NOMA qui atténuent les interférences du côté de l'émetteur ou du récepteur, la RSMA combine intelligemment ces deux approches en créant des flux communs. En ajustant les ressources allouées à ces flux, le niveau d'interférence annulé peut être modulé de manière flexible. La RSMA utilise une gestion flexible des interférences en les décodant partiellement et en les traitant partiellement comme du bruit. Cela permet d'optimiser la puissance allouée aux flux communs et privés. Lorsque le réseau est sous-chargé et que les canaux des utilisateurs sont orthogonaux, la RSMA se simplifie en SDMA. Lorsque le réseau est surchargé et que les canaux des utilisateurs sont alignés avec certaines disparités de puissance, la RSMA se résume à la NOMA. Dans d'autres conditions de canal, la RSMA tire parti du flux commun pour gérer les interférences [Mao+22].

### B.1.3 Robustesse

est une méthode appropriée pour gérer les perturbations dues à la CSIT imparfaite dans les réseaux multi-antennes. Les différentes sources de perturbation de la CSIT, telles que la rétroaction quantifiée, la contamination pilote, les erreurs d'estimation du canal et la mobilité des utilisateurs, sont maîtrisées par cette technique [Mao+22].

### B.1.4 efficacité spectrale

est toujours supérieure ou égale à celle des autres systèmes MA, que la CSIT soit parfaite ou imparfaite. Lorsque le CSIT est parfait, la région de débit du RSMA avec précodage linéaire est plus grande que celle du MU-LP et du NOMA, et se rapproche de la région de capacité atteinte par le DPC. Lorsque le CSIT est imparfait, le RSMA avec précodage linéaire peut même atteindre une région de débit plus importante que celle du DPC. Le RSMA exploite de manière optimale le CSIT disponible et la dimension spatiale de la station de base multi-antennes. De plus, il permet d'obtenir la somme-DoF optimale à la fois en cas de CSIT parfaite et de CSIT imparfaite [Mao+22].

### B.1.5 Meilleure efficacité énergétique

Étant donné que la RSMA est un ensemble d'OMA, de SDMA, de NOMA et de multidiffusion, son gain de performance de la RSMA ne se limite pas seulement à la SE, mais s'étend également à l'EE et à son compromis. Des études ont démontré que le RSMA surpasse les schémas MA existants en termes d'EE pour diverses applications avec un large éventail de charges de réseau et de déploiements d'utilisateurs [Mao+22].

### B.1.6 Amélioration de la qualité de service et de l'équité

lorsque les utilisateurs sont soumis à une contrainte de débit QoS ou lorsque des poids plus élevés sont assignés, RSMA présente un avantage considérable par rapport à SDMA et NOMA pour ceux qui ont des conditions de canal plus limitées. L'amélioration de la qualité de service (QoS) grâce à la capacité à décoder partiellement les interférences et à les traiter comme du bruit favorise une plus grande équité entre les utilisateurs dans les réseaux sans fil [Mao+22].

### B.1.7 Réduction de la complexité

La technologie RSMA présente une complexité moindre pour l'émetteur-récepteur par rapport à d'autres systèmes MA existants. Grâce à son codage linéaire, le RSMA permet d'obtenir un débit plus important tout en ayant une conception d'émetteur plus simple. De plus, la RSMA nécessite moins de programmation et de complexité de réception par rapport à la NOMA à antennes multiples. Contrairement à la NOMA, le RSMA ne requiert pas de regroupement et d'ordonnancement des utilisateurs au niveau de l'émetteur, et une seule couche SIC est nécessaire chez chaque utilisateur. De plus, le RSMA est moins sensible aux variations des conditions du canal, ce qui simplifie le planificateur. En résumé, le RSMA présente de nombreux avantages en termes de réduction de la complexité pour l'émetteur-récepteur, de programmation, de réception et de charge de rétroaction CSI [Mao+22].

### **B.1.8 Extension de la couverture**

la RSMA associée à des techniques d'extension de la couverture telles que les drones, les surfaces reconfigurables intelligentes (IRS) et les stations de relais peut encore améliorer le débit des utilisateurs à la périphérie de la cellule et offre des avantages substantiels en matière d'extension de la couverture [Mao+22].

### **B.1.9 Faible latence**

La réduction de la taille des paquets transmis est l'une des approches permettant d'obtenir une communication à faible latence. Il a été démontré que la RSMA améliore le débit par rapport à la SDMA et à la NOMA [Mao+22].

# Bibliographie

- [Ahm+20] W. S. H. M. W. AHMAD et al. « 5G technology : Towards dynamic spectrum sharing using cognitive radio networks ». In : *IEEE Access* 8 (2020), p. 14460-14488.
- [Alo21] Mariem ALOUCH MAHDI. « Gestion intelligente des ressources radios dans les réseaux véhiculaires de la 4G vers la 5G ». Thèse de doct. Université Paris-Saclay, 2021.
- [Ano19] ANONYMOUS. *5G Italy White Ebook Functional Architecture*. 2019. URL : <https://www.5gitaly.eu/2018/wp-content/uploads/2019/01/5G-Italy-White-eBook-Functional-architecture.pdf>.
- [Att+22] Hani ATTAR et al. « 5G System Overview for Ongoing Smart Applications : Structure, Requirements, and Specifications ». In : *Computational Intelligence and Neuroscience* 2022 (2022).
- [Bas+20] Bashar S. BASHAR et al. « Article ». In : *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering* 870 (2020), p. 012128.
- [CA20] Robin CHATAUT et Robert AKL. « Massive MIMO systems for 5G and beyond networks—overview, recent trends, challenges, and future research direction ». In : *Sensors* 20.10 (2020), p. 2753.
- [CBL18] Zheng CHEN, Emil BJÖRNSON et Erik G LARSSON. « When is the achievable rate region convex in two-user massive MIMO systems? ». In : *IEEE Wireless Communications Letters* 7.5 (2018), p. 796-799.
- [Cle+21] Bruno CLERCKX et al. « Is NOMA efficient in multi-antenna networks? A critical look at next generation multiple access techniques ». In : *IEEE Open Journal of the Communications Society* 2 (2021), p. 1310-1343.
- [Da18] Linglong DAI et et AL. « A survey of non-orthogonal multiple access for 5G ». In : *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 20.3 (2018), p. 2294-2323.
- [Diz+20] Onur DIZDAR et al. « Rate-splitting multiple access : A new frontier for the PHY layer of 6G ». In : *2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference (VTC2020-Fall)*. IEEE. 2020, p. 1-7.
- [Gaw15] Anju Uttam GAWAS. « An overview on evolution of mobile wireless communication networks : 1G-6G ». In : *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication* 3.5 (2015), p. 3130-3133.

- [GB20] Michael GRANT et Stephen BOYD. *CVX : Matlab Software for Disciplined Convex Programming, Version 2.2*. <http://cvxr.com/cvx>. (visité le 22/04/2024). 2020.
- [HF17] Noha HASSAN et Xavier FERNANDO. « Massive MIMO wireless networks : An overview ». In : *Electronics* 6.3 (2017), p. 63.
- [Luo+18] Changqing LUO et al. « Channel state information prediction for 5G wireless communications : A deep learning approach ». In : *IEEE Transactions on Network Science and Engineering* 7.1 (2018), p. 227-236.
- [Mao+22] Yijie MAO et al. « Rate-splitting multiple access : Fundamentals, survey, and future research trends ». In : *IEEE Communications Surveys & Tutorials* (2022).
- [MCL18a] Yijie MAO, Bruno CLERCKX et Victor OK LI. « Energy efficiency of rate-splitting multiple access, and performance benefits over SDMA and NOMA ». In : *2018 15th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*. IEEE. 2018, p. 1-5.
- [MCL18b] Yijie MAO, Bruno CLERCKX et Victor OK LI. « Rate-splitting multiple access for downlink communication systems : bridging, generalizing, and outperforming SDMA and NOMA ». In : *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2018 (2018), p. 1-54.
- [Mis+22] Anup MISHRA et al. « Rate-Splitting Multiple Access for 6G—Part I : Principles, Applications and Future Works ». In : *IEEE Communications Letters* 26.10 (2022), p. 2232-2236.
- [SSR21] Elço João Dos SANTOS, Richard Demo SOUZA et João Luiz REBELATTO. « Rate-splitting multiple access for URLLC uplink in physical layer network slicing with eMBB ». In : *IEEE Access* 9 (2021), p. 163178-163187.
- [Sbo+19] Lokman SBOUI et al. « A new relation between energy efficiency and spectral efficiency in wireless communications systems ». In : *IEEE Wireless Communications* 26.3 (2019), p. 168-174.
- [Sha13] Pankaj SHARMA. « Evolution of mobile wireless communication networks-1G to 5G as well as future prospective of next generation communication network ». In : *International Journal of Computer Science and Mobile Computing* 2.8 (2013), p. 49.
- [VV21] Karthik Kumar VAIGANDLA et Dr N VENU. « A survey on future generation wireless communications-5G : multiple access techniques, physical layer security, beamforming approach ». In : *Journal of Information and Computational Science* 11.9 (2021), p. 449-474.

# Webographie

- [Aut24] AUTHOR(S). *Title of the Chapter*. 2024. URL : [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-65726-0\\_8](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-65726-0_8) (visité le 12/04/2024).
- [Autar] AUTHOR(S). *Chapter Title*. Year. URL : <https://www.intechopen.com/chapters/52822>.
- [BBN24] BBN TIMES. *Will 5G Promote Climate Change or Harm Our Planet? 5G Is Empowering AI, IoT, Blockchain, and Decarbonization*. 2024. URL : <https://www.bbntimes.com/environment/will-5g-promote-climate-change-or-harm-our-planet-5g-is-empowering-ai-iot-blockchain-and-decarbonization> (visité le 13/04/2024).
- [Com23] COMMSBRIEF. *What is 5G Massive MIMO Technology and How Does It Work?* 2023. URL : <https://commsbrief.com/what-is-5g-massive-mimo-technology-and-how-does-it-work/> (visité le 22/04/2024).
- [Dam20] J.-P. DAMIANO. *De la 5G à la 6G : contexte et enjeux*. décembre 2020. URL : [https://www.researchgate.net/publication/346629679\\_De\\_la\\_5G\\_a\\_la\\_6G\\_contexte\\_et\\_enjeux\\_From\\_5G\\_to\\_6G\\_context\\_and\\_challenges](https://www.researchgate.net/publication/346629679_De_la_5G_a_la_6G_contexte_et_enjeux_From_5G_to_6G_context_and_challenges).
- [Dig24] DIGI. *5G Network Architecture*. 2024. URL : [https://www.digi.com/blog/post/5g-network-architecture?utm\\_source=subscribe&utm\\_medium=rss](https://www.digi.com/blog/post/5g-network-architecture?utm_source=subscribe&utm_medium=rss) (visité le 19/05/2024).
- [Dig21] DIGITAL CORNER. *Les ondes millimétriques et la 5G : une nouvelle dimension pour la téléphonie mobile*. 2021. URL : <https://www.digitalcorner-wavestone.com/2021/06/les-ondes-millimetriques-et-la-5g-une-nouvelle-dimension-pour-la-telephonie-mobile> (visité le 19/05/2024).
- [Ell21] ELLINTECH. *Is There a Future for NOMA?* 2021. URL : <https://mimo.ellintech.se/2021/04/15/is-there-a-future-for-noma/>.
- [EMF24] EMF EXPLAINED. *What is Electromagnetic Field (EMF)?* 2024. URL : <https://www.emfexplained.info/fra/?id=25916> (visité le 19/05/2024).
- [IEE23] IEEE SPECTRUM. *5G Bytes : Full Duplex Explained*. 2023. URL : <https://spectrum.ieee.org/5g-bytes-full-duplex-explained> (visité le 19/05/2024).
- [Lit23] LITEPOINT. *An Introduction to the 5G Small Cell*. 2023. URL : <https://www.litepoint.com/blog/an-introduction-to-the-5g-smallcell/>.

- [Mis22] Anup MISHRA. *Transceiver architecture of K-user uplink RSMA*. 2022. URL : <https://www.researchgate.net/profile/Anup-Mishra-11/publication/360410142/figure/fig2/AS:1152573583171585@1651806364186/Transceiver-architecture-of-K-user-uplink-RSMA-3.png>.
- [préséa] Non PRÉCISÉ. *Performance Analysis and Fairness Maximization in NOMA Systems With Improper Gaussian Signaling Under Imperfect Successive Interference Cancellation*. Consulté le JJ/MM/AAAA. Non précisé. URL : [https://www.researchgate.net/publication/339866108\\_Performance\\_Analysis\\_and\\_Fairness\\_Maximization\\_in\\_NOMA\\_Systems\\_With\\_Improper\\_Gaussian\\_Signaling\\_Under\\_Imperfect\\_Successive\\_Interference\\_Cancellation](https://www.researchgate.net/publication/339866108_Performance_Analysis_and_Fairness_Maximization_in_NOMA_Systems_With_Improper_Gaussian_Signaling_Under_Imperfect_Successive_Interference_Cancellation).
- [préséb] Non PRÉCISÉ. *Uplink NOMA model in a cell with two users*. Consulté le JJ/MM/AAAA. Non précisé. URL : <https://www.researchgate.net/publication/338910941/figure/fig4/AS:1084241672704002@1635514767423/Uplink-NOMA-model-in-a-cell-with-two-users.jpg>.
- [Res] RESEARCHGATE. *Services categories provided in 5G*. URL : <https://www.researchgate.net/publication/362252711/figure/fig1/AS:1182061809414152@1658836905499/Services-categories-provided-in-5G.png> (visité le 19/05/2024).
- [SFR] SFR BUSINESS. *Comprendre les termes et les définitions de la 5G*. Webographie. URL : <https://www.sfrbusiness.fr/a-propos/reseau-tres-haut-debit/definitions-5g/>.
- [THEte] THE THINGS NETWORK. *RSSI and SNR*. Visité le 1/04/2024. date. URL : <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/rssi-and-snr/>.
- [The22] THESES.FR. *Formation de voie multi-utilisateurs dans le domaine angulaire et accès multiple non orthogonal pour les systèmes multi-antennes massifs en ondes millimétriques*. 2022. URL : <https://theses.fr/2022IMTA0294>.
- [Via23] VIAVI SOLUTIONS. *What is 5G Architecture ?* visited on 21/03/2024. 2023. URL : <https://www.viavisolutions.com/en-us/what-5g-architecture>.

## Résumé

L'approche RSMA, s'est révélée être un cadre puissant pour l'optimisation des réseaux sans fil modernes, en particulier dans les systèmes de communication de cinquième génération (5G). En combinant la répartition de débit précodée linéairement et l'annulation successive d'interférence (SIC), la RSMA unifie les principales techniques d'accès multiple, telles que l'accès multiple par répartition spatiale (SDMA) et l'accès multiple non orthogonal (NOMA)

Dans le cadre de la 5G, la RSMA répond efficacement aux divers défis liés aux exigences de qualité de service et à la nécessité d'une connectivité massive. Elle facilite une transition harmonieuse entre différentes stratégies de gestion des interférences, en équilibrant le traitement des interférences en tant que bruit (SDMA) et le décodage intégral des interférences (NOMA). La RSMA y parvient en procédant à un décodage partiel des interférences tout en traitant le reste comme du bruit, ce qui permet de réduire la complexité du système. De plus, elle offre la flexibilité nécessaire pour s'adapter aux niveaux d'interférences variables et aux divers scénarios de déploiement des utilisateurs.

L'étude du RSMA ouvre de nouvelles perspectives pour optimiser les performances des réseaux sans fil et faire avancer la technologie de communication. En tirant parti des avantages offerts par le RSMA, nous pouvons répondre efficacement aux demandes croissantes en matière de communication, concevoir des réseaux plus efficaces et satisfaire les exigences des futurs systèmes sans fil. Le RSMA permet d'améliorer l'efficacité spectrale, l'efficacité énergétique, l'équité, la fiabilité et la qualité de service sur un large éventail de charges réseau et de configurations utilisateur. En outre, le RSMA est robuste face aux variations de la qualité de l'information d'état de canal (CSIT), ce qui réduit la surcharge de rétroaction et simplifie la complexité du système.

## Abstract

The RSMA approach has emerged as a powerful framework for optimizing modern wireless networks, particularly in fifth-generation (5G) communication systems. By combining linear precoding-based rate allocation with successive interference cancellation (SIC), RSMA integrates key multiple access techniques such as spatial division multiple access (SDMA) and non-orthogonal multiple access (NOMA).

In the context of 5G, RSMA effectively addresses the diverse challenges associated with quality of service requirements and the need for massive connectivity. It facilitates a seamless transition between different interference management strategies by balancing the treatment of interference as noise (SDMA) and full interference decoding (NOMA). RSMA achieves this by partially decoding interference while treating the remainder as noise, thereby reducing system complexity. Additionally, it provides the flexibility required to adapt to varying interference levels and diverse user deployment scenarios.

The study of RSMA opens up new perspectives for optimizing the performance of wireless networks and advancing communication technology. By leveraging the advantages offered by RSMA, we can effectively address the growing demands in communication, design more efficient networks, and meet the requirements of future wireless systems. RSMA enhances spectral efficiency, energy efficiency, fairness, reliability, and quality of service across a wide range of network loads and user configurations. Furthermore, RSMA exhibits resilience to variations in Channel State Information Quality (CSIT), reducing feedback overhead and simplifying system complexity.