

Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

## Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Filière :** Télécommunications

**Spécialité :** Système des Télécommunications

### Thème

Etude de la technique d'accès multiple RSMA dans un système de communication 5G.

**Préparé par:**

- KHALDI Lydia
- KHAROUNI Sounia

**Dirigé par:**

Mr. BELLAHSENE Hocine

**Examiné par:**

Mr. KHIREDDINE Abdelkrim  
Mr. KASMI Reda

**Soutenu le :**

25/06/2023

Année universitaire : 2022/2023

# Remerciements

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude envers **Dieu** le tout puissant, qui nous a donné la force et la patience nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre respectueuse gratitude et nos sincères remerciements à notre promoteur **Mr.BELLAHSENE** pour avoir accepté de nous encadrer, nous avoir guidées tout le long de ce travail et de nous avoir accordé son précieux temps.

Nous remercions le président du jury **Mr.KHIREDDINE**, ainsi que l'examineur **Mr.KASMI** d'avoir accepté d'examiner et de corrigé notre travail.

Nous exprimons également notre profonde gratitude envers nos familles pour leurs soutiens constant et leurs encouragements précieux.

Enfin, nous souhaitons exprimer notre reconnaissance envers toutes les personnes qui ont apporté leur contribution, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail. Leur soutien moral et leur encouragement ont été d'une grande valeur pour nous.

# Dédicaces

Je dédie humblement ce travail à ma famille, à mes amis et à toutes les personnes qui ont cru en moi. Votre amour, votre soutien et vos encouragements ont été essentiels dans mon parcours académique. Je vous suis profondément reconnaissant pour votre présence constante et votre confiance en moi. Que cette réalisation puisse être une source d'inspiration et de fierté pour nous tous.

Lydia

# Dédicaces

À la mémoire de mon Grand-père.

Sonia

# Table des matières

Table des matières	I
Table des figures	V
Liste des tableaux	VIII
Liste des abréviations	IX
Introduction générale	1
<b>1 Système de communications 5G</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction . . . . .	3
1.2 Les systèmes de communications 5G . . . . .	3
1.2.1 Les exigences de la 5G . . . . .	4
1.2.2 Les services de la 5G . . . . .	5
1.3 Le spectre et les fréquences . . . . .	5
1.4 Les technologies potentielles de la 5G . . . . .	6
1.4.1 Les onde millimétriques . . . . .	6
1.4.2 Les petites cellules . . . . .	7
1.4.3 Le full duplex . . . . .	7
1.4.4 Le Massive MIMO . . . . .	8
1.4.5 Le Beamforming . . . . .	9
1.4.6 l’ultra Massive MIMO . . . . .	10
1.4.7 Les formes d’ondes . . . . .	10
1.4.8 Les schémas d’accès multiple . . . . .	11
1.5 Conclusion . . . . .	11
<b>2 Les techniques d’accès : NOMA, SDMA et RSMA</b>	<b>12</b>
2.1 Introduction . . . . .	12
2.2 L’accès multiple non orthogonal (NOMA) . . . . .	12

2.2.1	La répartition de la puissance par domaines . . . . .	12
2.2.2	La répartition de code par domaines . . . . .	13
2.2.3	La NOMA en liaison descendante . . . . .	14
2.2.4	La NOMA en liaison montante . . . . .	14
2.2.5	La NOMA multi-antennes . . . . .	15
	2.2.5.1 SC-SIC . . . . .	15
	2.2.5.2 SC-SIC par groupe . . . . .	16
2.3	L'accès multiple par répartition spatiale (SDMA) . . . . .	17
2.3.1	La technique MU-LP . . . . .	17
2.4	L'accès multiple avec répartition du débit (RSMA) . . . . .	19
2.4.1	Le concept du Rate Splitting . . . . .	19
2.4.2	La technique RSMA . . . . .	19
	2.4.2.1 La RSMA sur la liaison descendante . . . . .	20
	2.4.2.2 La RSMA sur la liaison montante . . . . .	21
2.4.3	Comparaison des stratégies RSMA . . . . .	22
	2.4.3.1 1-layer RS . . . . .	23
	2.4.3.2 2-layer HRS . . . . .	24
	2.4.3.3 RS généralisé . . . . .	25
2.5	Comparaison des stratégies d'accès multiple : NOMA, SDMA et RSMA	29
2.6	Conclusion . . . . .	30
<b>3</b>	<b>Paramètres clés du système et mesures de performances des techniques d'accès</b>	<b>31</b>
3.1	Introduction . . . . .	31
3.2	Les caractéristiques des systèmes de communications 5G . . . . .	31
3.2.1	La précision du CSI (Channel State Information) . . . . .	31
3.2.2	Le rapport Signal sur Bruit . . . . .	32
3.2.3	Les différents types de transmission . . . . .	33
	3.2.3.1 La transmission conjointe unicast et multicast . . . . .	33
3.2.4	La charge du réseau . . . . .	34
3.3	Les mesures de performances . . . . .	34
3.3.1	L'efficacité Energétique . . . . .	34
3.3.2	La région de débits . . . . .	34
3.3.3	La somme des débits pondérés WSR (Weighted Sum Rate) . . . . .	35
3.3.4	La région de DoF . . . . .	36
	3.3.4.1 Le degré de liberté (ou Degrees of Freedom) . . . . .	36
	3.3.4.2 La somme de DoF (Sum-DoF) . . . . .	36

3.3.4.3	Le Max-Min Fairness (MMF) . . . . .	36
3.3.4.4	La comparaison des Sum-DoF et MMF-DoF pour les stratégies NOMA, SDMA et RSMA . . . . .	37
3.4	Conclusion . . . . .	38
<b>4</b>	<b>Simulations &amp; interprétations des résultats</b>	<b>39</b>
4.1	Introduction . . . . .	39
4.2	Présentation de MATLAB . . . . .	39
4.2.1	CVX Toolbox . . . . .	40
4.2.2	YALMIP Toolbox . . . . .	40
4.3	Présentation et analyse des résultats . . . . .	41
4.3.1	La Région de débits réalisable . . . . .	41
4.3.1.1	Dans un déploiement sous-chargé à 2 utilisateurs avec un CSIT parfait . . . . .	42
4.3.1.2	Dans une transmission conjointe unicast et multicast dans des déploiements sous-chargés de deux utilis- ateurs avec CSIT parfait . . . . .	47
4.3.1.3	Dans un déploiement sous-chargé à 2 utilisateurs avec un CSIT imparfait . . . . .	49
4.3.2	La somme des débits pondérés (WSR) . . . . .	51
4.3.2.1	Dans un déploiement sous-chargé à trois utilisateurs avec CSIT parfait . . . . .	51
4.3.3	La région d'efficacité énergétique réalisable . . . . .	54
4.3.4	La région de degré de liberté (DoF) . . . . .	56
4.4	Conclusion . . . . .	58
	<b>Conclusion générale</b>	<b>59</b>
<b>A</b>		<b>61</b>
A.1	L'évolution des systèmes de communications mobiles . . . . .	61
A.1.1	La technologie de Première génération 1G . . . . .	61
A.1.2	La technologie de deuxième génération 2G . . . . .	61
A.1.3	La technologie de Troisième génération 3G . . . . .	62
A.1.4	La technologie de Quatrième génération 4G . . . . .	63
A.2	L'architecture générale d'un réseaux 5G . . . . .	63
A.3	Les modes de déploiement des réseaux 5G . . . . .	65
A.4	Au-Delà de la 5G . . . . .	65
<b>B</b>		<b>66</b>

B.1	La NOMA à antenne unique . . . . .	66
B.2	La technique NOMA dans les systèmes Massive-MIMO . . . . .	66
B.3	Le Dirty Paper Coding (DPC) . . . . .	67
B.4	L'allocation des ressources sous la technique RSMA . . . . .	67
B.5	L'exemple de RSMA à deux utilisateurs . . . . .	68
B.6	L'exemple de RSMA à trois utilisateurs . . . . .	69
B.7	Les principaux avantages du RSMA [ <a href="#">Mao+22</a> , <a href="#">Cle+23</a> ] . . . . .	72

# Table des figures

1.1	Connectivité généralisée dans la 5G [Ora21]. . . . .	4
1.2	Service de la 5G [OMN20]. . . . .	5
1.3	Comparaison entre les ondes millimétrique et cellulaire [Tec23]. . . . .	6
1.4	Mise en place de petites cellules [Lit23]. . . . .	7
1.5	La Technologie Full Duplex [CA20]. . . . .	8
1.6	Technologie Massive MIMO [Com23]. . . . .	9
1.7	Représentation du beamforming dans massive MIMO [Hua20]. . . . .	10
2.1	Gestion des interférences sous NOMA. . . . .	13
2.2	NOMA en DownLink [Ali+20]. . . . .	14
2.3	Gestion des interférences sous SDMA. . . . .	18
2.4	Gestion des interférence entre NOMA, SDMA et RSMA . . . . .	19
2.5	Architecture globale de MU-MIMO avec RS. . . . .	20
2.6	Modèle RS à une couche de $K$ utilisateurs. . . . .	23
2.7	Modèle de système HRS à 2 couches avec 4 utilisateurs. . . . .	24
2.8	Modèle de transmission à trois utilisateurs utilisant RS généralisé. . . . .	28
3.1	Interprétation de $\alpha$ en termes de bits de rétroaction . . . . .	38
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, $\gamma = 0.5$ . . . . .	42
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, $\gamma = 0.75$ . . . . .	43
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, $\gamma = 1$ . . . . .	44
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. . . . .	45

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. . . . .	46
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. . . . .	46
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. . . . .	47
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. . . . .	48
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. . . . .	49
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. . . . .	49
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. . . . .	50
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. . . . .	50
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. . . . .	52
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. . . . .	53
4.15	Comparaison des régions d'efficacité énergétique réalisables différentes schémas, $\gamma = 0.3$ , $P_{\text{dyn}} = 27$ dBm. . . . .	55
4.16	Comparaison des régions d'efficacité énergétique réalisables différentes schémas, $\gamma = 0.3$ , $P_{\text{dyn}} = 40$ dBm. . . . .	55
4.17	Comparaison des régions d'efficacité énergétique réalisables différentes schémas, $\gamma = 1$ , $P_{\text{dyn}} = 40$ dBm. . . . .	56
4.18	Gain de multiplexage total en fonction du nombre d'utilisateurs $K$ pour $M = 6$ . . . . .	56
4.19	Gain de multiplexage MMF en fonction du nombre d'utilisateurs $K$ pour $M = 6$ . . . . .	57
A.1	Techniques d'accès en GSM [Kar]. . . . .	62
A.2	Système de communication 5G [Sul]. . . . .	63

A.3	Architecture d'un système de communication 5G [Sul]. . . . .	64
A.4	5G stand-alone vs non-stand-alone [stl]. . . . .	65

# Liste des tableaux

2.1	Comparaison des stratégies RSMA [Mao+22] . . . . .	28
2.2	Comparaison qualitative de la complexité de différentes stratégies d'accès multiple [Mao+22]. . . . .	29
3.1	Comparaison des Sum-DoF de différentes stratégies avec une connaissance parfaite et imparfaite du canal (CSIT) [Cle+21]. . . . .	37
3.2	Comparaison des MMF-DoF de différentes stratégies avec une connaissance parfaite et imparfaite du canal (CSIT) [Cle+21]. . . . .	37

# Liste des abréviations

<b>G</b>	Génération
<b>IP</b>	Internet Protocol
<b>5G</b>	Cinquième Génération
<b>MIMO</b>	Multiple-Input Multiple-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>5G-NR</b>	5G-New Radio
<b>UHF</b>	Ultra high frequency
<b>mmWave</b>	Millimeter Wave
<b>THz</b>	TéraHertz
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
<b>ISI</b>	Inter-Symbol Interference
<b>PAPR</b>	Preak-to-average Power Ratio
<b>CP</b>	Cyclic Prefix
<b>FBMC</b>	Filter Bank Multicarrier
<b>OFDMA</b>	Orthogonal Division Frequency Multiple Access
<b>SCMA</b>	Sparse Code Multiple Access
<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>UE</b>	User Equipement
<b>MS</b>	Mobile Station
<b>USIM</b>	Universal Subscriber Identity Module
<b>NG-RAN</b>	Next Generation Radio Access Network
<b>5GC</b>	5G Core Network
<b>gNB</b>	5G Node B
<b>NR-Uu</b>	New Radio-Uu (Interface radio sans fil de la 5G)
<b>Uu</b>	Interface radio sans fil
<b>gNB-CU</b>	gNodeB Central Unit
<b>gNB-DU</b>	gNodeB Distributed Unit
<b>AMF</b>	Access and Mobility Management Function
<b>UPF</b>	User Plane Function
<b>SBA</b>	Service Based Architecture
<b>NF</b>	Function Network
<b>DN</b>	Data Network
<b>AF</b>	Application Function
<b>SMF</b>	Session Management Function
<b>UDM</b>	Unified Data Management
<b>PCF</b>	Policy Control Function
<b>NRF</b>	Network Repository Function
<b>NEF</b>	Network Exposure Function
<b>AUSF</b>	Authentication Server Function
<b>SEAF</b>	Security Anchor Functionality
<b>NSSF</b>	Network Slice Selection Function
<b>SA</b>	Stand Alone
<b>NSA</b>	Non Stand-Alone
<b>CAPEX</b>	Capital Expenditure
<b>OPEX</b>	Operating Expenditure
<b>EPC</b>	Envolved Packet Core
<b>3GPP</b>	Third Generation Partnership Project
<b>6G</b>	Sixth Generation
<b>AI</b>	Artificial Intelligence
<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>BC</b>	Broadcast Channel
<b>SISO</b>	Single Input Single Output
<b>CSI</b>	Channel State Information
<b>CSIT</b>	Channel State Information at the Transmitter
<b>MISO</b>	Multiple Input Single Output
<b>SINR</b>	Signal Interference Noise Ratio
<b>WSR</b>	Weighted Sum Rate
<b>ICI</b>	Inter-Cell Interference
<b>DPC</b>	Dirty Paper Coding
<b>MU-LP</b>	Multi User-Linear Precoding
<b>MU-MIMO</b>	Multi User-MIMO
<b>CoMP</b>	Cordinated Multi-Point
<b>DoF</b>	Degree of Freedom
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>IC</b>	Interference Channel
<b>RS</b>	Rate Splitting
<b>AWGN</b>	Additive White Gaussian Noise
<b>HRS</b>	Hierarchical Rate Splitting
<b>FDD</b>	Frequency Division Duplex
<b>MC-RSMA</b>	Multi Carrier-RSMA
<b>WMMSE</b>	Weighted Minimum Mean Square Error
<b>5G-CS</b>	5G-Communication System
<b>SNR</b>	Signal-to-Noise Ratio
<b>EE</b>	Energy Efficiency
<b>DL</b>	DownLink
<b>UL</b>	UpLink
<b>MMF</b>	Max-Min Fairness

# Introduction générale

La 5G marque une étape majeure dans l'évolution des systèmes de communication mobile, au-delà de la norme 4G LTE. Elle ouvre de nouvelles perspectives pour les services traditionnels et offre des opportunités inédites liées à l'Internet des objets et à la quatrième révolution industrielle. Pour répondre aux exigences de cette nouvelle ère, des solutions technologiques avancées sont nécessaires afin d'atteindre des débits plus élevés, une latence réduite, une capacité accrue et une meilleure utilisation du spectre. La nouvelle radio constitue la technologie clé de la 5G, reposant sur un ensemble de technologies fondamentales. Grâce à ces avancées, la 5G permettra de développer des réseaux plus performants, favorisant l'émergence de services innovants, de nouveaux écosystèmes et de nouvelles sources de revenus.

Dans ce contexte, il est essentiel d'étudier les différentes techniques d'accès multiple disponibles et d'évaluer leurs performances pour répondre aux exigences de la 5G. L'accès multiple fait référence à la possibilité pour plusieurs utilisateurs d'accéder simultanément à un même canal de communication. Deux techniques d'accès multiple ont suscité un grand intérêt dans le contexte de la 5G : l'accès multiple par répartition non orthogonale (NOMA) et l'accès multiple par répartition spatiale (SDMA).

Toutefois, la 5G va encore plus loin en introduisant une nouvelle approche appelée Rate-Splitting Multiple Access (RSMA). Cette approche divise un message en deux parties (commune et privée) et les transmet de manière non orthogonale. En combinant le précodage linéaire et l'annulation d'interférences successives (SIC), RSMA unifie les techniques d'accès multiple NOMA et SDMA. Cela permet une gestion équilibrée des interférences en les considérant comme du bruit (SDMA) et en décodant complètement les interférences (NOMA). RSMA offre ainsi de nouvelles perspectives pour optimiser les performances des réseaux sans fil de cinquième génération.

L'objectif de ce travail est d'approfondir l'étude et la simulation de RSMA afin de démontrer son caractère optimal dans les systèmes 5G et sa capacité à surmonter les limitations du NOMA et du SDMA. Les performances de RSMA sont évaluées en termes d'efficacité énergétique, de la région de débits, et d'autres mesures de performance clés, démontrant ainsi son potentiel pour améliorer les réseaux sans fil de cinquième génération.

Pour atteindre cet objectif, notre mémoire est structuré en quatre chapitres :

- Le premier chapitre présente les systèmes de communication 5G en mettant en évidence leurs caractéristiques, services et technologies clés comme le Massive MIMO. Il aborde également les exigences de la 5G, notamment une large

couverture, des débits élevés et une faible latence. Ce chapitre établit ainsi les bases essentielles pour les chapitres suivants.

- Le deuxième chapitre porte sur les techniques d'accès multiple, notamment NOMA, SDMA et RSMA. Il met l'accent sur l'accès multiple avec répartition du débit (RSMA). Il explique le concept du Rate Splitting et présente en détail la technique RSMA, à la fois sur la liaison descendante et montante. De plus, il compare différentes stratégies RSMA telles que 1-layer RS, 2-layer HRS et RS généralisé. Enfin, une comparaison est effectuée entre les techniques d'accès multiple NOMA, SDMA et RSMA.
- Le troisième chapitre explore les paramètres clés du système et les mesures de performance des techniques d'accès dans les systèmes de communication 5G. Il aborde des aspects tels que la qualité du canal (CSI), le rapport signal/bruit (SNR) et la charge du réseau. De plus, il présente les concepts de transmission unicast et multicast, et décrit différentes mesures de performance telles que l'efficacité énergétique, la région de débits, la somme des débit pondéré (WSR) et la région de degrés de liberté (DoF).
- Le dernier chapitre intitulé "Simulation & interprétations des résultats" aborde plusieurs aspects liés à l'étude menée. Il commence par une introduction présentant l'environnement et les outils utilisés pour les simulations. Ensuite, les résultats des simulations sont exposés, couvrant différentes mesures de performance telles que la région de débits, la région d'efficacité énergétique (EE) et la région de degrés de liberté (DoF) pour les techniques NOMA, SDMA et RSMA. Ces résultats sont ensuite analysés pour évaluer les performances des différentes techniques.

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

# Chapitre 1

## Systeme de communications 5G

### 1.1 Introduction

Les systèmes de communication n'ont jamais cessé d'évoluer. Des systèmes analogiques 1G (Génération) qui se contentaient essentiellement qu'à la transmission de la voix, aux systèmes 2G numériques qui offraient des services supplémentaires tels que la messagerie. Par la suite les systèmes 3G qui ont offert l'accessibilité à l'internet partout ont fait leur apparition avant l'arrivée de la 4G qui a introduit les services tout IP (Internet Protocol). Toutefois l'arrivée des système 5G est sans aucun doute une véritable révolution.

La technologie 5G (Cinquième Génération) prendra en charge chaque élément de notre future société et créera un écosystème d'information centré sur l'utilisateur, toutes dimensions confondues. La 5G brisera les limites du temps et de l'espace pour permettre une expérience utilisateur immersive et interactive. Elle réduira également la distance entre les humains et les objets, et mettra en place une intégration transparente pour faciliter et rendre intelligente l'interconnexion entre les personnes et les objets [XZS16].

Dans ce premier chapitre, nous présentons les systèmes 5G, leurs caractéristiques, leurs principaux services. Nous étudions également les technologies clés utilisées dans ces derniers telles que le Massive MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) et le beamforming. De plus, nous introduisons les notions de forme d'onde et schémas d'accès liés à la 5G.

### 1.2 Les systèmes de communications 5G

Les générations antérieures de réseaux mobiles visaient principalement à fournir des services de données mobiles rapides et fiables aux utilisateurs. Toutefois, la 5G va au-delà de ces objectifs en offrant une multitude de services sans fil aux utilisateurs finaux grâce à des plateformes d'accès multiples et des réseaux multicouches. En effet, elle permet de créer un cadre technologique flexible, dynamique et cohérent pour prendre en charge diverses applications [Sol23].

Cette génération se distingue nettement des précédentes générations de la 1G à la

4G, avec des performances considérablement améliorées. Par exemple, elle offre un débit maximal de 10 gigabits par seconde (Gbps), soit une augmentation significative par rapport à celui de la 4G, avec une plage allant de 10 à 100 fois plus rapide selon les situations [Att+22].

De plus, la 5G devrait aussi permettre un nouveau type de connectivité et d'applications telles que les véhicules intelligents, l'IoT (Internet Of Things) et l'Internet aptique, les jeux en temps réel bidirectionnels, les applications basées sur le Cloud et la réalité augmentée qui nécessitent des latences infiniment faibles. Tout cela nécessite une connectivité généralisée [Att+22, AA17], comme montrer dans la figure 1.1 :

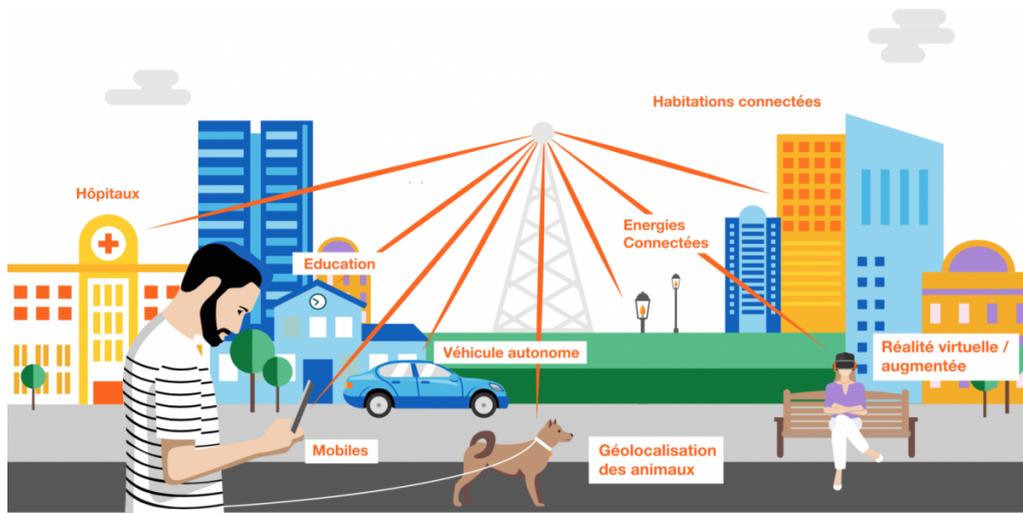


FIGURE 1.1 – Connectivité généralisée dans la 5G [Ora21].

### 1.2.1 Les exigences de la 5G

Les exigences de cette technologie sont nombreuses et s'étendent à de nombreux domaines, mais elles découlent toutes de ces principales contraintes :

- **Couverture élevée** : la 5G nécessite une couverture complète de près de 100% avec une disponibilité du réseau allant jusqu'à 99,999% [Att+22].
- **Débit élevé** : la technologie 5G offrira une prise en charge pour de nombreux services et applications nécessitant des débits de données élevés. Avec une augmentation significative de la vitesse de transmission allant jusqu'à 10 Gbps, soit 10 fois plus rapide que le réseau 4G [Att+22].
- **Faible latence** : l'un des besoins les plus importants sur lesquels se concentre la 5G est de fournir une latence très faible. La latence de la 5G sera réduite à 1 ms aller-retour de bout en bout. Cette faible latence représente un véritable avantage pour diverses applications, notamment les voitures autonomes et la chirurgie à distance [Att+22].
- **Large bande passante** : la 5G se caractérise par une bande passante plus large, qui permet une augmentation significative de la capacité et du nombre d'appareils connectés dans une zone donnée. En effet, elle offre une bande passante 1000 fois supérieure par unité de surface, tout en offrant une capacité de transmission jusqu'à 10 Gbps [Att+22].

- **Efficacité spectrale maximale** : Elle se définit comme étant le débit théorique normalisé le plus élevé des données reçues, les valeurs cibles visées pour cette efficacité sont de 15 bps/Hz en liaison montante et de 30 bps/Hz en liaison descendante [Ate+18].

## 1.2.2 Les services de la 5G

La 5G propose des solutions adéquates qui répondent aux exigences mentionnées ci-dessus. Elles se reposent sur trois principaux services expliqués dans ce qui suit et illustrés par la figure 1.2 [Alo21] :

- **eMBB (Enhanced Mobile Broadband)** : ce service permet aux utilisateurs d'accéder à des contenus gourmands en débit. Il assure aux usagers finaux de télécharger un film en très haute qualité en seulement quelques secondes.
- **mMTC (Massive Machine-Type Communications)** : ce service offre de son côté la possibilité d'avoir une densité d'objets en 5G plus importante. Ainsi, on pourrait installer 1 million d'appareils sur un mètre carré sans problèmes (Internet of Things plus solide et fiable).
- **uRLLC (Ultra-Reliable and Low-Latency Communications)** : est un service qui permet comme son nom l'indique de réduire la latence de bout en bout et augmenter la robustesse des abonnées de transmission. Il joue un rôle très important pour la sécurité du véhicule autonome.

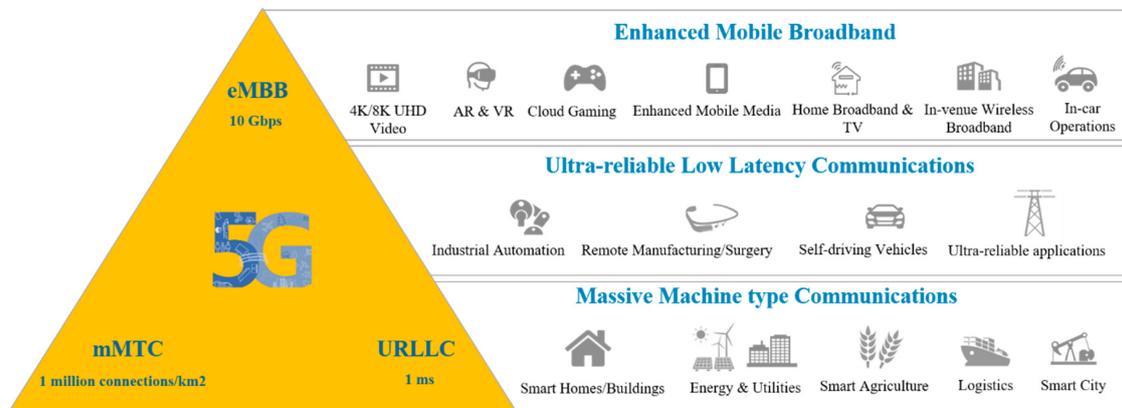


FIGURE 1.2 – Service de la 5G [OMN20].

## 1.3 Le spectre et les fréquences

Plusieurs plages de fréquences sont dédiées à la 5G-NR (5G-New Radio). La partie du spectre radio avec des fréquences entre 30 GHz et 300 GHz est appelée la bande millimétrique, car les longueurs d'onde varient de 1 à 10 mm. Des fréquences entre 24 GHz et 100 GHz ont été allouées à la 5G dans plusieurs régions du monde.

En plus de la bande millimétrique, des fréquences UHF (Ultra High Frequency) sont utilisées entre 300 MHz et 3 GHz, et des fréquences de bande C entre 3,7 et 3,98

GHz ont également été réaffectées à la 5G. La diversité des fréquences utilisées peut être adaptée à chaque application unique.

Les fréquences plus élevées se caractérisent par une bande passante plus élevée et une portée plus courte. Les fréquences millimétriques sont idéales pour les zones densément peuplées, mais inefficaces pour la communication à longue distance. Dans les différentes bandes de fréquences dédiées à la 5G, chaque opérateur a commencé à découper ses propres portions individuelles du spectre 5G [Sol23].

## 1.4 Les technologies potentielles de la 5G

La norme 5G repose sur plusieurs innovations technologiques, telles que l'utilisation de fréquences ultra-hautes pour transférer des quantités importantes de données, le déploiement dense de petites cellules et la technologie Massive MIMO. Ces éléments permettent une transmission de données plus rapide et plus efficace, ce qui constitue l'un des principaux avantages de la norme 5G. Les principes de ces innovations technologiques seront développés ci-dessous [Met] :

### 1.4.1 Les ondes millimétriques

Les ondes millimétriques, caractérisées par une longueur d'onde de 1 à 10 millimètres et une fréquence de 30 à 300 GHz, sont utilisées dans la communication 5G en raison de leur capacité à fournir une bande passante plus élevée que les fréquences inférieures à 6 GHz utilisées pour la communication cellulaire, ce qui est crucial pour des applications gourmandes en données telles que la réalité virtuelle ou les voitures autonomes. Cependant, les ondes millimétriques présentent également des limitations, notamment leur faible pénétration des obstacles et leur absorption par la pluie, nécessitant l'utilisation d'autres technologies pour pallier ces problèmes [CA20].

Le diagramme présenté sur la figure 1.3 illustre la différence entre les ondes cellulaires et millimétriques :

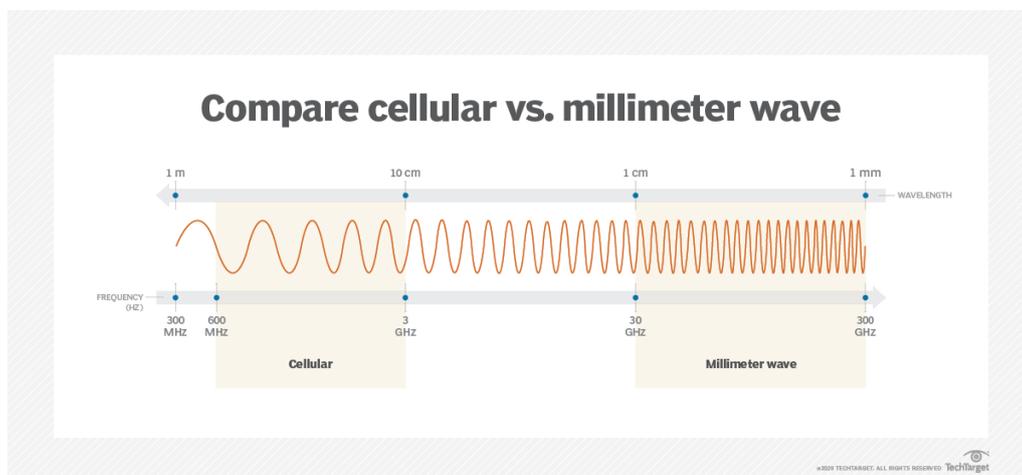


FIGURE 1.3 – Comparaison entre les ondes millimétrique et cellulaire [Tec23].

## 1.4.2 Les petites cellules

Les petites cellules sont des stations de base à faible puissance (comme montrer dans la figure 1.4 qui sont déployées dans des zones géographiques restreintes afin d'améliorer la capacité du réseau et la qualité de la couverture de la 5G. Elles utilisent des ondes millimétriques pour offrir des débits élevés et une latence ultra-faible, ce qui les rend idéales pour les zones urbaines denses et les environnements intérieurs. Les petites cellules sont divisées en microcellules, femto-cellules et pico-cellules, chacune étant adaptée à une taille de zone de couverture et à un nombre d'utilisateurs spécifiques. Le déploiement de petites cellules permet de réduire la charge sur le réseau en partageant la capacité de chaque antenne entre moins d'utilisateurs, ce qui améliore l'expérience utilisateur globale [CA20, Cor21].



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

## 1.4.3 Le full duplex

Le Full Duplex est une technique de communication sans fil permettant une transmission et une réception simultanées de données sur une même bande de fréquences, contrairement aux systèmes Half Duplex qui alternent entre la transmission et la réception. Cette méthode présente des avantages significatifs, tels qu'une meilleure utilisation des ressources temporelles et fréquentielles, pouvant doubler la capacité de liaison par rapport aux systèmes Half Duplex. Toutefois, le Full Duplex peut également entraîner des interférences et des échos qui peuvent affecter la qualité de la communication. Cette technologie est de plus en plus utilisée dans les réseaux de communication sans fil 5G pour améliorer les performances et augmenter la capacité de transmission des données (voir la figure 1.5) [Won+17, IEE23].

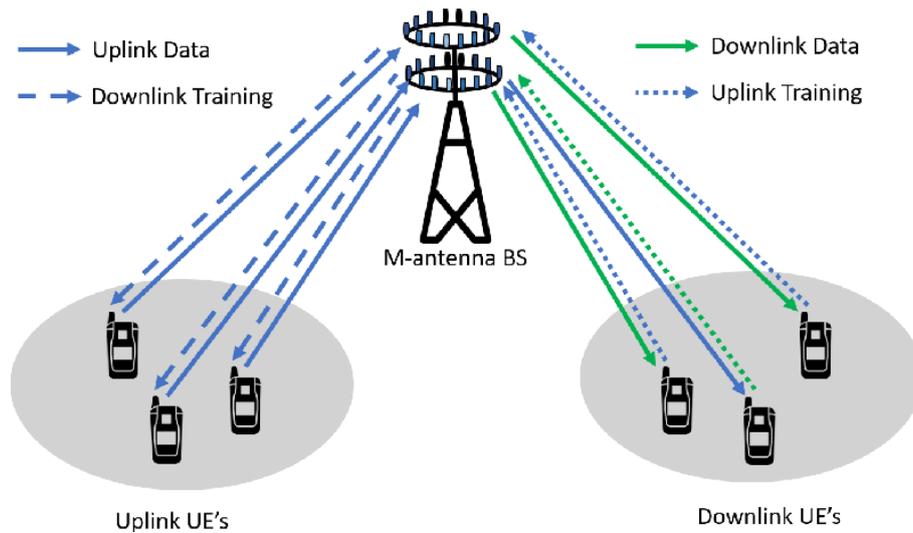


FIGURE 1.5 – La Technologie Full Duplex [CA20].

#### 1.4.4 Le Massive MIMO

Le Massive MIMO est une technologie très prometteuse pour améliorer les performances des réseaux 5G. Comme on peut le voir dans la figure 1.6, elle consiste à équiper les stations de base avec des centaines voire des milliers d’antennes, permettant ainsi de desservir simultanément plusieurs utilisateurs à partir des mêmes ressources de temps et de fréquence. Les faisceaux d’antennes spatialement focalisés améliorent l’efficacité spectrale et le débit pour l’utilisateur souhaité tout en réduisant les interférences avec les utilisateurs voisins. Cette technologie offre des avantages considérables par rapport aux systèmes MIMO traditionnels, tels qu’une capacité de traitement plus élevée, une plus grande efficacité énergétique et une réduction significative de la consommation d’énergie par bit de données transmis [CA20].

Les systèmes massive MIMO envisagent une formation de faisceaux et un décodage précis avec des algorithmes plus simples, voire linéaires. Cependant, il est essentiel d’utiliser des techniques de traitement de signal efficaces aux deux extrémités pour surmonter la complexité de la surcharge de signalisation [CA20, HF17].

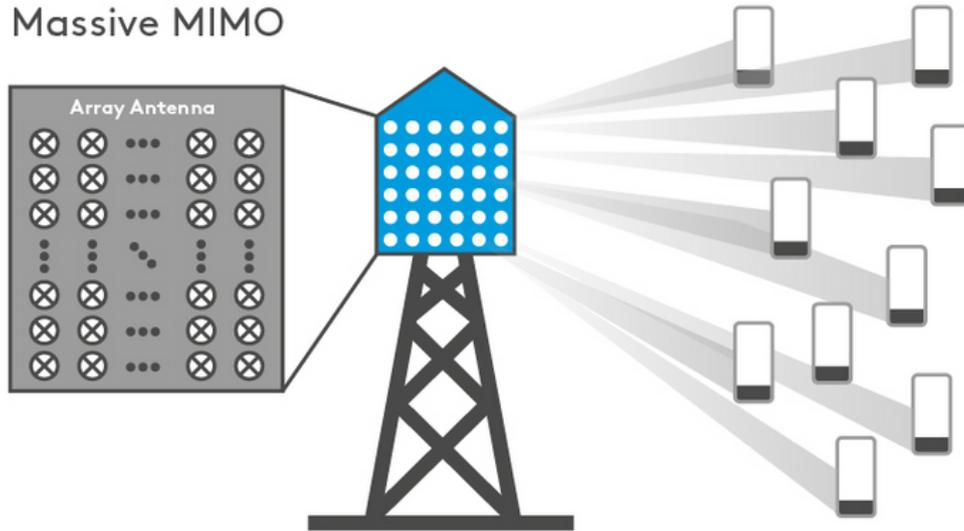


FIGURE 1.6 – Technologie Massive MIMO [Com23].

### 1.4.5 Le Beamforming

Le beamforming, également connu sous le nom de filtrage spatial ou formation de faisceaux, est une technique qui aide les stations de base à trouver des chemins appropriés pour fournir des données aux utilisateurs. Cette technique permet de focaliser les signaux provenant de plusieurs antennes en un faisceau puissant, minimisant ainsi l'énergie dans les lobes latéraux à l'extrémité de l'émetteur. En réception, le beamforming combine les signaux reçus et les superpose dans une certaine direction, tout en rejetant les signaux provenant d'autres directions. [HF17]

Cette technologie offre plusieurs avantages pour les réseaux 5G. Dans les systèmes massive MIMO, la formation de faisceaux synchronise les échanges de paquets et les heures d'arrivée, permettant à plusieurs utilisateurs d'envoyer des données simultanément (Comme illustré dans la figure 1.7). Ainsi, elle améliore l'efficacité spectrale. En ce qui concerne les ondes millimétriques, le beamforming contribue à augmenter le débit de données en envoyant des faisceaux concentrés vers les utilisateurs pour une réception de signal de qualité sans interférences. En effet, ces ondes ne peuvent pas pénétrer les obstacles et ne se propagent pas sur de longues distances en raison de leurs longueurs d'onde plus courtes [CA20].

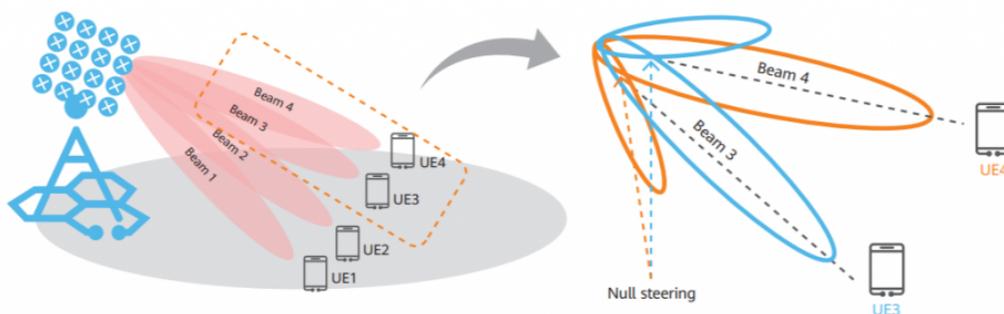


FIGURE 1.7 – Représentation du beamforming dans massive MIMO [Hua20].

### 1.4.6 l’ultra Massive MIMO

Cette technologie est le successeur du Massive-MIMO, elle utilise des milliers d’antennes pour améliorer considérablement l’efficacité spectrale et énergétique, le débit, la robustesse et le Degree of Freedom des systèmes de communication sans fil. L’utilisation de grands réseaux d’antennes engendre le front d’onde sphérique, la non-stationnarité spatiale, et les propriétés de durcissement dans le canal Massive MIMO. Ces propriétés ont été validées par des mesures précédentes du canal massive MIMO dans les bandes sub-6 GHz/mmWave en environnements intérieurs et extérieurs.

Dans la bande THz (TéraHertz), grâce aux développements des matrices nano-antennes plasmoniques, il est possible de réaliser un ultra-massive MIMO jusqu’à  $1024 \times 1024$  [You+21].

### 1.4.7 Les formes d’ondes

L’un des éléments déterminants de tout système de communication mobile est la forme d’onde utilisée pour la liaison radio dans le réseau d’accès radio. Dans le cas de la 5G, on va définir deux techniques [Not21] :

- **OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)** : est une méthode efficace pour résoudre le problème d’interférence entre symboles (ISI : Inter-Symbol Interference) en utilisant plusieurs porteuses pour transmettre des sous-trames simultanées. Les formes d’onde 5G doivent répondre à des exigences telles qu’une efficacité spectrale élevée et une faible latence, et les stratégies pour y parvenir seront influencées par le format de modulation utilisé. Cependant, l’adoption de l’OFDM pour 5G ne doit pas être considérée comme acquise, car elle présente des inconvénients tels qu’un PAPR élevé (Peak-to-Average Power Ratio), qui a un impact négatif sur l’efficacité des amplificateurs de puissance utilisés pour amplifier les signaux et une faible efficacité spectrale due à l’insertion du CP (Cyclic Prefix) [AA17, Not21].
- **FBMC (Filter Bank Multicarrier)** : est une technique dans laquelle les signaux sur chaque sous-porteuse sont façonnés par un filtre bien conçu pour supprimer les lobes latéraux du signal et limiter sa bande passante [AA17].

### 1.4.8 Les schémas d'accès multiple

L'accès multiple est un élément clé des systèmes de communication cellulaire. Pour la 5G, plusieurs schémas d'accès multiples sont en cours d'étude pour sélectionner la technique la plus optimale. Chacun de ces schémas a ses avantages et inconvénients, il est donc peu probable qu'une seule technique puisse répondre à toutes les exigences. L'objectif est d'adopter les techniques les plus optimales pour garantir l'efficacité et les performances du système 5G [Not23].

- **L'OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)** : a été largement utilisé et très réussi pour la 4G et également utilisé comme schéma d'accès multiple pour la 5G. Cependant, elle nécessite l'utilisation d'OFDM et en exigeant l'orthogonalité entre les porteuses et l'utilisation d'un préfixe cyclique, il présente quelques inconvénients. Par conséquent, d'autres schémas d'accès multiples sont en cours d'étude [Not23].
- **SCMA (Sparse Code Multiple Access)** : est une autre idée considérée comme un schéma d'accès multiple pour la 5G. Il s'agit essentiellement d'une combinaison d'OFDMA et de CDMA (Code Division Multiple Access). Normalement, avec OFDMA, une ou plusieurs porteuses sont attribuées à un utilisateur donné. Cependant, si chaque porteuse se voit ajouter un code d'étalement, elle peut alors transmettre des données à plusieurs utilisateurs simultanément. Cette technique utilise des codes dits "sparses", permettant ainsi d'ajouter un nombre significatif d'utilisateurs tout en maintenant des niveaux élevés d'efficacité spectrale [Not23].

## 1.5 Conclusion

En conclusion, ce premier chapitre nous a permis d'explorer les différentes améliorations et spécifications clés de la technologie 5G, telles que l'utilisation d'ondes millimétriques, de petites cellules, de systèmes Massive MIMO et l'ultra Massive MIMO, de beamforming, ainsi que de différentes formes d'ondes et de schémas d'accès multiples. Ces avancées technologiques ont le potentiel de révolutionner les communications sans fil et d'ouvrir la voie à de nouvelles possibilités pour les applications de communication à venir.

# Chapitre 2

## Les techniques d'accès : NOMA, SDMA et RSMA

### 2.1 Introduction

Les premiers réseaux cellulaires implémentaient des techniques d'accès multiple orthogonales (OMA) telles que l'accès multiple à répartition temporelle (TDMA), l'accès multiple par répartition en fréquence (FDMA) ou l'accès multiple par répartition en code (CDMA) [KB16].

Dans la TDMA, les informations pour chaque utilisateur sont envoyées dans des intervalles de temps sans interférences, de sorte que les réseaux basés sur TDMA nécessitent une synchronisation précise, ce qui peut être difficile, en particulier en liaison montante. Dans les implémentations FDMA, telles que l'OFDMA, l'information pour chaque utilisateur est assignée à un sous-ensemble de sous-porteuses orthogonales. Cependant, avec l'évolution des technologies des réseaux cellulaires, ces techniques ne peuvent plus répondre aux exigences élevées des futurs systèmes d'accès radio [KB16].

Dans ce chapitre, nous introduisons une nouvelle famille de techniques d'accès multiple spécifiques aux systèmes de cinquième génération, à savoir : NOMA, SDMA et RSMA. Nous expliquons également leurs principes de fonctionnement et les schémas de transmission utilisés pour chaque technique.

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

Contrairement à l'accès multiple orthogonal (OMA), la technique NOMA permet la superposition des utilisateurs dans la même ressource temps-fréquence en répartissant la puissance en domaines ou par codes [MCL18c].

#### 2.2.1 La répartition de la puissance par domaines

Elle permet la distinction entre plusieurs utilisateurs partageant les mêmes ressources de temps, de fréquence et de code, en leur attribuant des niveaux de puis-

sance différents. Cette technique repose sur le codage de superposition (SC : Superposition coding) à l'émetteur et sur l'annulation successive des interférences (SIC : Successive Interference Cancellation) au récepteur, notée SC-SIC [VV21, MCL18c].

## 2.2.2 La répartition de code par domaines

Le concept de code-domaine NOMA est inspiré des systèmes classiques du CDMA, dans lesquels plusieurs utilisateurs partagent les mêmes ressources de temps et de fréquence, mais adoptent des séquences d'étalement uniques et spécifiques à l'utilisateur. Toutefois, la principale différence par rapport au CDMA est l'utilisation de séquences d'étalement clairsemées au lieu de séquences d'étalement denses, pour réduire les interférences au niveau de chaque chip [Dai+18, Dai+15].

Le multiplexage non orthogonal utilisant le codage de superposition au niveau de l'émetteur et le SIC au niveau du récepteur comme illustré dans la figure 2.1 est non seulement plus performant que le multiplexage orthogonal classique, mais il est également optimal pour atteindre la région de capacité des canaux de diffusion en liaison descendante [Dai+18].

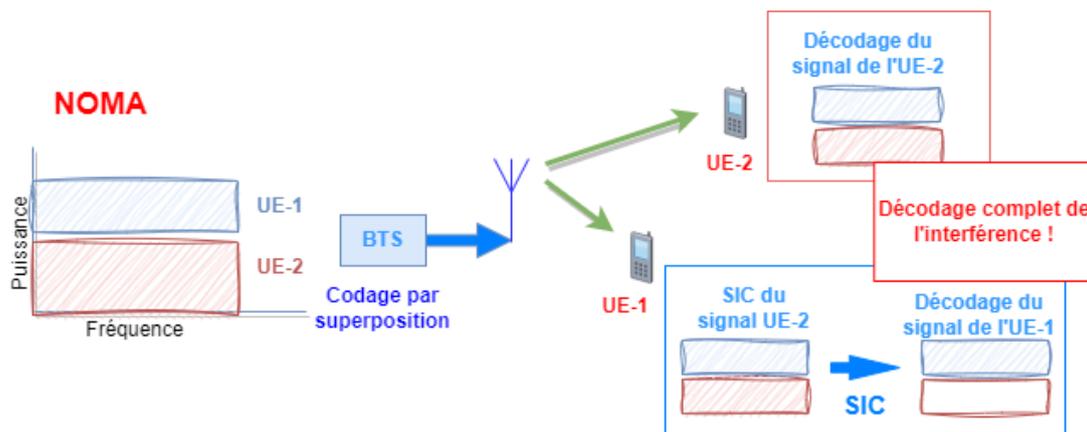


FIGURE 2.1 – Gestion des interférences sous NOMA.

### 2.2.3 La NOMA en liaison descendante

En utilisant la technique NOMA en liaison descendante, on attribue une puissance plus élevée à l'UE (User Equipment) qui est située plus loin de la station de base, tandis que l'UE le plus proche de la BS (Base Station) reçoit une puissance plus faible. Dans ce schéma de transmission, tous les utilisateurs reçoivent le même signal qui contient les informations de tous les utilisateurs, comme illustré dans la figure 2.2. Chaque utilisateur commence par décoder en premier le signal le plus fort, qui correspond au signal de l'utilisateur le plus éloigné de la BS. Ensuite, il soustrait le signal décodé du signal reçu. Le récepteur SIC répète cette opération de soustraction itérative jusqu'à ce qu'il parvienne à isoler son propre signal [KB16].

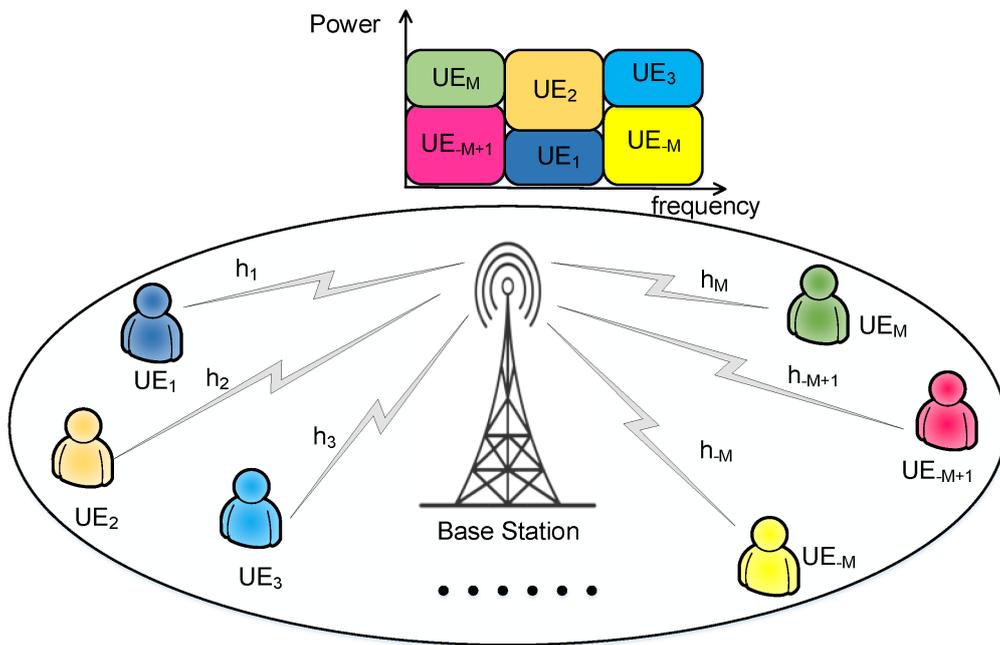


FIGURE 2.2 – NOMA en DownLink [Ali+20].

### 2.2.4 La NOMA en liaison montante

La mise en œuvre de la NOMA sur la liaison montante diffère légèrement de celle sur la liaison descendante. La station de base reçoit un signal contenant tous les signaux des utilisateurs. Elle décode d'abord le signal de l'utilisateur le plus proche, puis celui de l'utilisateur le plus éloigné [KB16].

Les utilisateurs peuvent à nouveau optimiser leurs puissances d'émission en fonction de leur emplacement, tout comme sur la liaison descendante. Cependant, nous supposons ici que les utilisateurs sont bien répartis dans la couverture cellulaire et que les niveaux de puissance reçus des différents utilisateurs sont déjà bien séparés [KB16].

## 2.2.5 La NOMA multi-antennes

Les deux principales stratégies utilisées dans les systèmes NOMA multi-antennes sont le SC-SIC et le SC-SIC par groupe. Le SC-SIC par groupe peut être considéré comme une variante du SC-SIC, dans laquelle les utilisateurs sont regroupés en plusieurs groupes distincts. Dans la suite, nous présentons de manière concise ces deux stratégies et examinons séparément les performances en termes de WSR (Weighted Sum Rate) et de SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio) qui leur sont associées [Shu21].

### 2.2.5.1 SC-SIC

Il s'agit d'une application directe de SC-SIC au MISO BC (Multiple Input Single Output-Broadcast Channel), qui consiste à utiliser un canal de diffusion multi-antennes dégradé [MCL18c].

Dans cette stratégie, le pré-codeur et l'ordre de décodage jouent un rôle très important. Pour atteindre le débit de chaque utilisateur, il est impératif de connaître précisément l'ordre de décodage de tous les utilisateurs. 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 [Shu21, MCL18c].

Le rapport signal sur interférences plus bruit (SINR) expérimenté par l'utilisateur  $\pi(i)$  lors du décodage du message de l'utilisateur  $\pi(k)$ , où  $k \leq i$ , est déterminé par l'équation 2.1 [MCL18c] :

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

où :

- $\mathcal{K}$  est l'ensemble d'utilisateurs.
- L'indice  $k$  désigne un utilisateur spécifique dont le message est en cours de décodage.
- L'indice  $j$  fait référence aux autres utilisateurs dans le système.
- L'indice  $i$  représente l'utilisateur qui reçoit ou décode le message.
- $\mathbf{h}_{\pi(i)}^H$  représente la transposée conjuguée du vecteur de canal entre la station de base (BS) et l'utilisateur  $\pi(i)$ . Ce vecteur de canal contient des informations sur les propriétés 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 représente la somme des puissances des interférences causées par les messages des autres utilisateurs  $\pi(j)$ , où  $j$  est supérieur à  $k$ . Cela mesure l'impact des signaux des autres utilisateurs sur la réception du message de l'utilisateur  $\pi(k)$ . En plus de cela, la puissance du bruit ajouté au signal est considérée comme 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 atteint par le SC-SIC est défini par l'équation 2.2 [MCL18c] :

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

sous la contrainte suivante :

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

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- $k$ .
- $R_k^{th}$  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.

avec :

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

### 2.2.5.2 SC-SIC par groupe

La stratégie SC-SIC par groupe consiste à regrouper les  $K$  utilisateurs en  $G$  groupes. Au sein de chaque groupe, les utilisateurs sont servis en utilisant SC-SIC pour une meilleure gestion des interférences. Entre les groupes, la technique SDMA est utilisée pour réduire les interférences inter-groupes. Les ordres de décodage des utilisateurs sont représentés par  $\pi_g(k)$  pour l'utilisateur- $k$  [MCL18c, Shu21].

Le SINR est alors donné par l'équation 2.3 [MCL18c] :

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

où :

- $g$  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  $\pi_g(i)$ .

Ainsi, le WSR obtenu avec le SC-SIC par groupe est donné par l'équation 2.4 [MCL18c] :

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

où :

- $\mathcal{G}$  représente l'ensemble des groupes dans le système. Cet ensemble contient les indices des groupes de 1 à  $G$ .
- $R_{\pi_g(k)}$  représente le débit atteint par l'utilisateur- $k$  dans l'ordre de décodage  $\pi_g$  spécifique au groupe  $g$ .

L'avantage de la NOMA à antennes multiples, est qu'elle permet de faire face à un régime surchargé dans lequel plusieurs utilisateurs ont des forces de canal/des pertes de trajet différentes et/ou sont étroitement alignés les uns sur les autres [MCL18c].

## 2.3 L'accès multiple par répartition spatiale (SDMA)

Dans les réseaux sans fil actuels, les points d'accès sont souvent équipés de plus d'une antenne. Cette dimension spatiale ouvre la voie à un autre type bien connu d'accès multiple, appelé SDMA. La SDMA superpose les utilisateurs sur la même ressource temps-fréquence et les sépare en utilisant de manière appropriée les dimensions spatiales [MCL18c].

### 2.3.1 La technique MU-LP

La technique de précodage la plus couramment utilisée pour les systèmes de diffusion multi-antennes, tels que le MIMO et le MISO BC, est le précodage linéaire multi-utilisateur (MU-LP). Cette technique repose sur la création de faisceaux distincts, où chaque faisceau reçoit une fraction de la puissance d'émission totale. Elle permet de superposer les utilisateurs dans le domaine de la puissance, tout comme la NOMA. Cependant, contrairement au NOMA, la SDMA utilise la technique de beamforming au niveau de l'émetteur pour séparer les utilisateurs, comme illustré dans la figure 2.3, plutôt que d'utiliser la technique SIC au niveau des récepteurs [MCL18c].

La SDMA basée sur le MU-LP est une technique d'accès multiple bien établie qui joue un rôle clé dans de nombreuses technologies 4G et 5G, telles que le MIMO multi-utilisateur (MU-MIMO), le multi-point coordonné (CoMP), le MIMO à ondes millimétriques (mmWave) et le massive MIMO. Elle permet à chaque utilisateur de ne décoder que son propre message, en traitant les interférences comme du bruit [MCL18c].

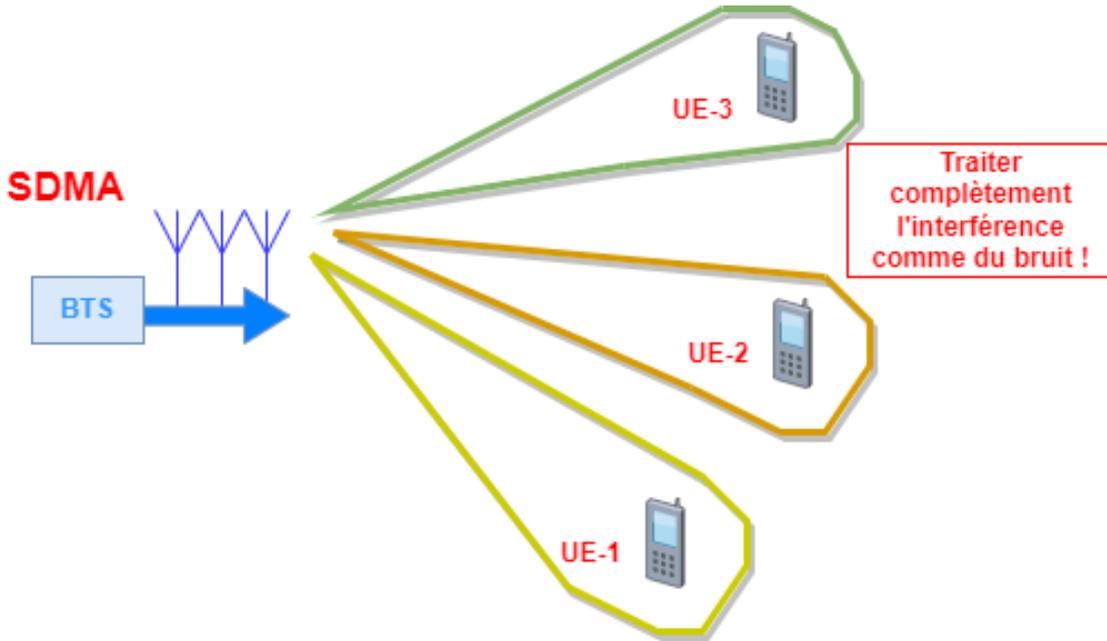


FIGURE 2.3 – Gestion des interférences sous SDMA.

Le SINR de l'utilisateur- $k$  est donnée par l'équation 2.5 [MCL18c] :

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

où :

- $\mathbf{h}_k^H$  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 décrit dans l'équation 2.6 [MCL18c] :

$$R_{\text{MU-LP}}(\mathbf{u}) = \max_{\mathbf{p}} \sum_{k \in \mathcal{K}} u_k R_k, \quad (2.6)$$

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- $k$ .

L'avantage de SDMA avec MU-LP est de bénéficier de tous les avantages du multiplexage spatial dans un système de diffusion multi-antenne avec une complexité réduite du précodeur et du récepteur [MCL18c].

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

### 2.4.1 Le concept du Rate Splitting

Ce concept n'est pas particulièrement nouveau. Ses racines remontent aux premiers travaux sur le canal d'interférence à deux utilisateurs (IC) réalisés par Carleial dans [Car78], ainsi que ceux réalisés par Han et Kobayashi dans [HK81]. Ces auteurs ont développé des stratégies de transmission basées sur le RS (Rate splitting) pour atteindre de nouvelles régions de débit. Dans le schéma de Han-Kobayashi, qui atteint la meilleure borne intérieure connue à ce jour, chaque source divise son message en une partie "privée" et une partie "commune" (parfois appelée partie "publique") [Cle+16].

Les deux parties sont codées en utilisant le codage de superposition et transmises simultanément. En plus de décoder son propre message composé de deux parties, chaque utilisateur décode également une partie de l'interférence, en particulier la partie commune de l'autre récepteur.

Le compromis d'exception développé par cette conception réside dans le fait qu'elle généralise deux stratégies : le traitement des interférences comme le bruit et le décodage des interférences [Cle+16], voir figure 2.4.



FIGURE 2.4 – Gestion des interférence entre NOMA, SDMA et RSMA

### 2.4.2 La technique RSMA

Rate-Splitting Multiple Access (RSMA) est un schéma d'accès multiple basé sur le concept du RS et le précodage linéaire pour les communications multi-utilisateurs et multi-antennes [Diz+20].

RSMA divise les messages des utilisateurs en deux parties : communes et privées. Les rapports décrivant la manière dont la division des messages est effectuée sont des paramètres de conception qui varient en fonction de la configuration. Les parties communes sont encodées en un ou plusieurs flux, tandis que les parties privées sont encodées dans des flux distincts. Les flux sont pré-codés en utilisant les informations sur l'état du canal à l'émetteur (CSIT) disponibles, qu'elles soient parfaites ou non, et ils sont ensuite transmis via le canal MIMO ou MISO [Diz+20, Cle+16].

Tous les récepteurs décodent d'abord le(s) flux commun(s), effectuent une annulation successive d'interférences (SIC), puis décodent leurs flux privés respectifs. Chaque récepteur reconstruit son message d'origine à partir de la partie de son message intégrée dans le(s) flux commun(s) et de son flux privé prévu [Diz+20].

La figure 2.5 présente un schéma détaillé de la réalisation de RSMA :

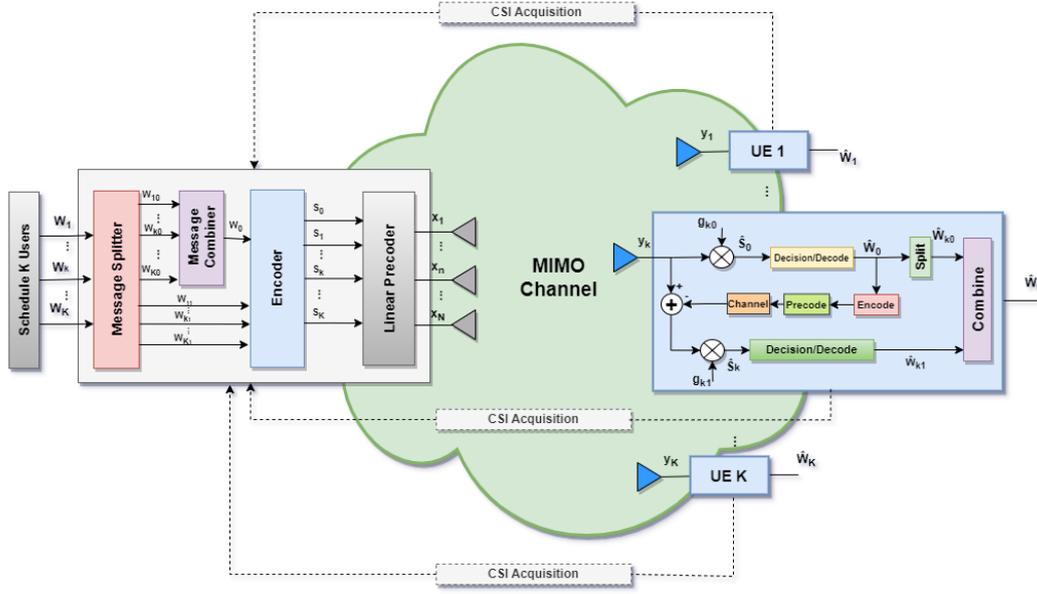


FIGURE 2.5 – Architecture globale de MU-MIMO avec RS.

Le principal avantage du RSMA est sa flexibilité en matière de gestion des interférences. Les transmissions de la RSMA en liaison descendante et en liaison montante explicitent cet avantage [Diz+20, Mis+22] :

#### 2.4.2.1 La RSMA sur 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  $s_{p,k} \in \mathbb{C}$  [Mao+22, 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 précodeur les flux commun et privé, respectivement. Le signal d'émission  $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^M$  est exprimé comme suit [Mis+22] :

$$\mathbf{x} = \mathbf{p}_c s_c + \sum_{k=1}^K \mathbf{p}_{p,k} s_{p,k}, \quad (2.7)$$

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

Le canal entre la station de base 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] :

$$y_k = \mathbf{h}_k^H \mathbf{x} + z_k, \quad (2.8)$$

avec :  $z_k$  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] :

$$\gamma_{c,k} = \frac{|\mathbf{h}_k^H \mathbf{p}_c|^2}{\sum_{i=1}^K |\mathbf{h}_k^H \mathbf{p}_{p,i}|^2 + \sigma_z^2} \quad (2.9)$$

où :

- $\mathbf{p}_c$  : 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] :

$$\gamma_{p,k} = \frac{|\mathbf{h}_k^H \mathbf{p}_{p,k}|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K |\mathbf{h}_k^H \mathbf{p}_{p,i}|^2 + \sigma_z^2} \quad (2.10)$$

où :

- $\mathbf{p}_{p,k}$  : 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.

Chaque utilisateur reconstitue son message en combinant respectivement sa partie commune et sa partie privée excrètent de  $s_c$  et  $s_{p,k}$ .

La présence du flux commun permet à RSMA d'exploiter le domaine de la puissance et d'ajuster la quantité d'interférence qui doit être décodée par les utilisateurs. En fonction de la précision du CSIT et de l'objectif de conception du précodeur, RSMA ajuste les rapports de répartition des messages et la puissance allouée aux flux commun et privé au niveau de l'émetteur. Du côté de l'utilisateur, l'utilisateur- $k$  décode une partie de l'interférence  $W_{c,i}, \forall i \neq k$  et traite le reste comme du bruit  $W_{p,i}, \forall i \neq k$  [Mis+22].

#### 2.4.2.2 La RSMA sur la liaison montante

Tout point de la région de capacité est réalisable via RSMA avec une complexité de codage relativement faible [RU96], nous supposons que les messages de tous les utilisateurs, sauf l'utilisateur- $K$ , sont divisés [Mis+22].

Chez l'utilisateur- $k$ ,  $k \in \{1, \dots, K-1\}$ , le message  $W_k$  à transmettre est divisé en deux sous-messages  $W_{k,1}$  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].

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- $k$ ,  $x_{k,1} \in \mathbb{C}$ , est donné par [Mis+22] :

$$x_k = \begin{cases} \sqrt{P_{k,1}}s_{k,1} + \sqrt{P_{k,2}}s_{k,2}, & \text{si } k \in \mathcal{K} \setminus \{K\} \\ \sqrt{P_K}s_K, & \text{si } k = K \end{cases} \quad (2.11)$$

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

$$\mathbf{y} = \sum_{k \in \mathcal{K}} \mathbf{h}_k x_k + \mathbf{n}_{ul} \quad (2.12)$$

où :

—  $\mathbf{n}_{ul}$  est le vecteur de bruit AWGN une moyenne nulle et une variance  $\sigma_{ul}^2$ .

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] :

$$R_{k,i} = \log_2 \left( 1 + \frac{P_{k,i} |\mathbf{d}_{k,i}^H \mathbf{h}_k|^2}{\sum_{\pi_{k',i'} > \pi_{k,i}} P_{k',i'} |\mathbf{d}_{k',i'}^H \mathbf{h}_{k'}|^2 + \sigma_{ul}^2} \right) \quad (2.13)$$

$$R_K = \log_2 \left( 1 + \frac{P_K |\mathbf{d}_K^H \mathbf{h}_K|^2}{\sum_{\pi_{k',i'} > \pi_K} P_{k',i'} |\mathbf{d}_{k',i'}^H \mathbf{h}_{k'}|^2 + \sigma_{ul}^2} \right) \quad (2.14)$$

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

En RSMA dans la liaison montante, chaque utilisateur crée des utilisateurs virtuels en divisant sa transmission en deux sous-messages. Bien que cette procédure implique des boucles de calcul supplémentaires dans la procédure SIC, elle crée automatiquement différents niveaux de puissance d'arrivée entre les utilisateurs, réduisant ainsi considérablement la complexité de sa mise en œuvre [DSR21].

L'un des principaux avantages de RSMA est l'augmentation du nombre d'ordres de décodage possibles, ce qui le rend viable pour atteindre des régions de capacité plus élevées. C'est également un grand défi dans les déploiements pratiques de RSMA et doit être optimisé, car l'ordre de décodage affecte le débit réalisable [DSR21].

### 2.4.3 Comparaison des stratégies RSMA

Dans cette étude, nous nous focalisons sur trois stratégies RSMA couramment utilisées : le 1-layer RS, le 2-layer HRS (Hierarchical Rate Splitting) et le RS généralisé. Ces stratégies ont été largement étudiées dans la littérature en raison de

leurs avantages respectifs en termes de complexité, de débit réalisable et de qualité de service. Bien qu'il existe d'autres stratégies RSMA, notre analyse se limite à ces trois approches, qui couvrent une gamme de schémas RSMA du plus simple au plus avancé.

### 2.4.3.1 1-layer RS

La figure 2.6 présente le modèle du système RS à une couche avec  $K$  utilisateurs. On peut observer que le flux commun  $s_c$  est partagé par tous les utilisateurs. Cette technique permet aux utilisateurs de décoder le message commun et leurs messages privés respectifs en utilisant une seule couche de SIC. Un avantage majeur de cette approche est qu'elle ne nécessite pas d'ordonner ou de regrouper les utilisateurs du côté émetteur. Ainsi, chaque utilisateur peut décoder les messages sans avoir besoin d'informations sur l'ordre des autres utilisateurs [MCL18c].

Il est également important de noter que le RS à une seule couche est un sous-schéma de la RS généralisée et un sur-schéma de MU-LP (car en n'allouant aucune puissance au message commun, le RS à une seule couche se réduit à MU-LP). Cependant, pour  $K > 2$ , SC-SIC et SC-SIC par groupe ne sont pas des sous-schémas de 1-Layer RS (bien qu'ils soient des sous-schémas de la RS généralisée) [MCL18c].

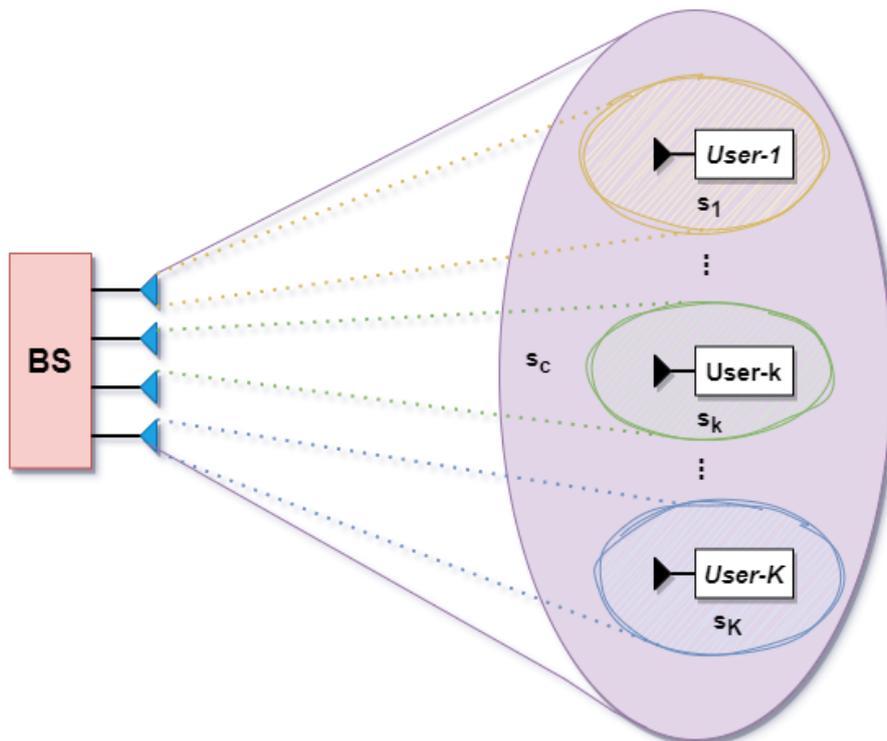


FIGURE 2.6 – Modèle RS à une couche de  $K$  utilisateurs.

### 2.4.3.2 2-layer HRS

La 2-layer HRS est une technique de transmission de messages qui divise les utilisateurs en groupes pour envoyer des messages communs et privés à chaque groupe. Elle utilise deux couches de SIC pour que chaque utilisateur puisse décoder le message commun avant d'accéder à son message privé respectif. Cette technique a été initialement proposée pour le FDD massive MIMO afin d'améliorer la robustesse face aux CSIT imparfaits et d'augmenter le débit réalisable de tous les utilisateurs [Mao+22].

Plus précisément, cette méthode permet la transmission d'un flux commun inter-groupe  $s_{\mathcal{K}}$ , ainsi que des flux communs intra-groupe  $s_{\mathcal{K}_g}$  et des flux privés  $s_k$ . Les groupes sont définis par  $\mathcal{G} = \{1, \dots, G\}$  avec  $\mathcal{K}_g, g \in \mathcal{G}$  utilisateurs dans chaque groupe [MCL18c].

Prenons l'exemple de la figure 2.7 d'un HRS à 2 couches avec  $K = 4$ ,  $G = 2$ ,  $\mathcal{K}_1 = \{1, 2\}$ ,  $\mathcal{K}_2 = \{3, 4\}$ , Trois flux de données doivent être transmis [MCL18c, 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.

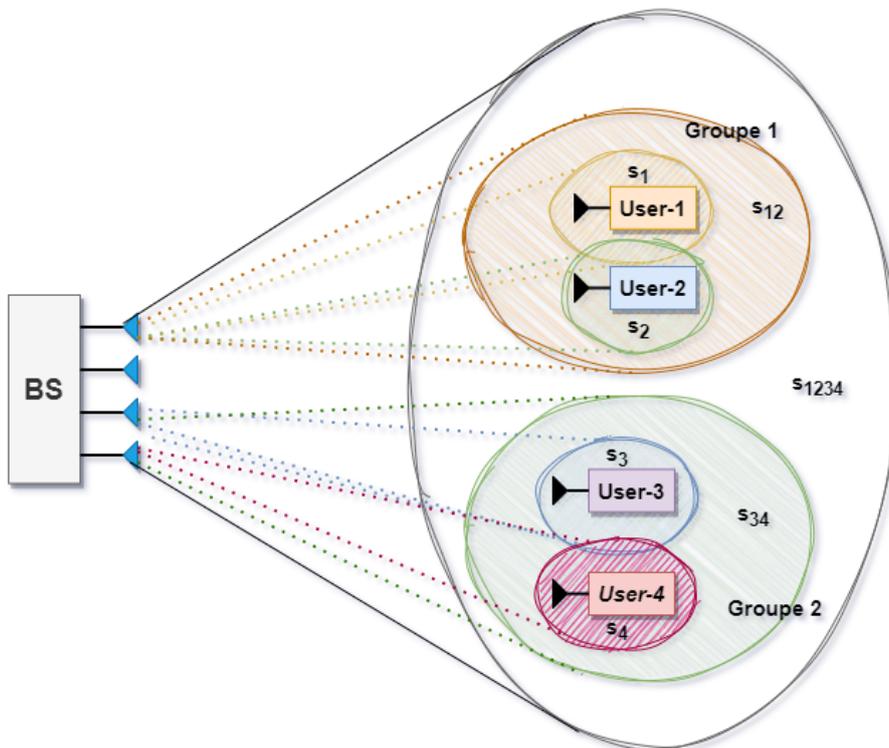


FIGURE 2.7 – Modèle de système HRS à 2 couches avec 4 utilisateurs.

Le flux  $s_{\mathcal{K}}$  est traité en premier en considérant les interférences des autres flux comme du bruit. Une fois décodé, il sera soustrait du signal reçu initial pour faciliter le décodage des autres flux. Ensuite, la technique SIC est utilisée pour décoder les flux  $s_{\mathcal{K}_g}$  et  $s_k$ . Pour décoder  $s_{\mathcal{K}_g}$ , chaque utilisateur doit considérer les autres flux communs de groupe et les flux privés de 1er ordre comme du bruit. Enfin, chaque utilisateur décode son propre flux privé  $s_k$  en considérant les autres flux comme du bruit [MCL18c].

Comparé à SC-SIC par groupe, qui nécessite  $|\mathcal{K}_g| - 1$  couches de SIC du côté des utilisateurs, le 2-layer HRS ne nécessite que deux couches de SIC par utilisateur. De plus, le problème d'ordonnancement des utilisateurs dans SC-SIC par groupe n'existe pas dans le 2-layer HRS. Les flux d'un ordre supérieur sont décodés avant ceux d'un ordre inférieur. Le 1-layer RS est l'architecture la plus simple car un seul SIC est nécessaire pour chaque utilisateur, et il s'agit d'un sous-schéma du 2-layer HRS. Nous notons également que nous pouvons obtenir un 1-layer RS par groupe à partir du 2-layer HRS en n'allouant aucune puissance à  $s_{\mathcal{K}}$ . Une autre chose à noter est que SC-SIC et SC-SIC par groupe ne sont pas nécessairement des sous-schémas du 2-layer HRS [MCL18c].

### 2.4.3.3 RS généralisé

Le schéma RS généralisé avec précodage linéaire vise à maximiser le débit et la qualité de service tout en augmentant la complexité des émetteurs et des récepteurs. Contrairement aux 1-layer RS et 2-layer HRS, le RS généralisé nécessite une augmentation de  $L$  (message splits) avec  $K$ , où  $L$  est défini comme  $L = 2^{K-1}$ , afin de synthétiser différents flux communs décodés par différents sous-ensembles d'utilisateurs de  $\mathcal{K}$ . Le nombre de couches SIC chez chaque utilisateur augmente également avec  $K$  selon la formule  $2^{K-1} - 1$  [Mao+22].

Au niveau de l'émetteur, le message  $W_k$  de l'utilisateur  $k$  est divisé en sous-messages  $\{W_k^{\mathcal{A}} | \mathcal{A} \subseteq \mathcal{K}, k \in \mathcal{A}\}$ . Pour chaque sous-ensemble  $\mathcal{A}$  d'utilisateurs appartenant à  $\mathcal{K}$ , la station de base transmet les sous-messages  $\{W_k^{\mathcal{A}} | k' \in \mathcal{A}\}$  avec le même exposant  $\mathcal{A}$  sur le flux de données  $s_{\mathcal{A}}$ . Ce flux est ensuite décodé par tous les utilisateurs de l'ensemble  $\mathcal{A}$  et considéré comme du bruit par les autres utilisateurs [Mao+22].

Le concept d'ordre de flux dans le RS généralisé peut être expliqué en plusieurs étapes [Mao+22] :

- Premièrement, les flux décodés par différents nombres d'utilisateurs sont définis comme des flux d'ordre  $l$ .
- Les flux d'ordre  $l$  sont formés par un ensemble de flux, noté  $\{s_{\mathcal{A}} | \mathcal{A} \subseteq \mathcal{K}, |\mathcal{A}| = l\}$ , où  $\mathcal{A}$  représente un sous-ensemble d'utilisateurs de  $\mathcal{K}$  contenant exactement  $l$  utilisateurs.
- Le vecteur de flux de données d'ordre  $l$ ,  $\mathbf{s}_l$ , est alors constitué de  $\binom{K}{l}$  éléments, représentant tous les flux d'ordre  $l$  possibles.
- Lorsque  $l = K$ , il existe un seul flux d'ordre  $K$  noté  $s_{\mathcal{K}}$ , qui est une simplification de  $s_{\mathcal{K}}$ . Par exemple, lorsque  $K = 3$ , le vecteur de flux d'ordre 3 est  $\mathbf{s}_3 = s_{123}$ . Les vecteurs de flux d'ordre 1 et d'ordre 2 sont respectivement  $\mathbf{s}_1 = [s_1, s_2, s_3]^T$  et  $\mathbf{s}_2 = [s_{12}, s_{13}, s_{23}]^T$ .
- Pour préparer la transmission, les flux d'ordre  $l$  sont soumis à un précodage

linéaire à l'aide d'une matrice de précodage  $\mathbf{P}_l$ .

- La matrice de précodage  $\mathbf{P}_l$  est composée de  $\{\mathbf{p}_{\mathcal{A}'} | \mathcal{A}' \subseteq \mathcal{K}, |\mathcal{A}'| = l\}$ , où chaque  $\mathbf{p}_{\mathcal{A}'}$  représente un vecteur de précodage spécifique pour le sous-ensemble  $\mathcal{A}'$ .

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

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

où :

- $\mathbf{p}_{\mathcal{A}'}$  est le coefficient de précodage associé à  $\mathcal{A}'$ .
- $s_{\mathcal{A}'}$  est le flux d'ordre  $l$  correspondant au sous-ensemble  $\mathcal{A}'$ .

Du côté de chaque utilisateur, il est nécessaire de procéder à un décodage SIC en utilisant  $2^{K-1} - 1$  couches pour décoder séquentiellement tous les flux communs prévus [MCL18c] :

- Le processus de décodage commence par le flux d'ordre  $K$  ( $s_{\mathcal{K}}$ ) et se poursuit jusqu'au flux privé d'ordre 1 ( $s_k$ ).
- Chaque utilisateur est impliqué dans plusieurs flux d'ordre  $l$ , à l'exception des flux d'ordre 1 et  $K$ .
- L'ensemble des flux d'ordre  $l$  à décoder pour l'utilisateur- $k$  est noté  $\mathcal{S}_{l,k} = \{s_{\mathcal{A}'} | \mathcal{A}' \subseteq \mathcal{K}, |\mathcal{A}'| = l, k \in \mathcal{A}'\}$ .
- Le décodage des flux d'ordre  $l$  ( $\mathbf{s}_l$ ) pour tous les utilisateurs est représenté par l'ordre de décodage  $\pi_l$ .
- En fonction d'un certain ordre de décodage  $\pi_l$ , le vecteur de flux d'ordre  $l$  à décoder pour l'utilisateur- $k$  est donné par  $\mathbf{s}_{\pi_l,k} = [s_{\pi_l,k(1)}, \dots, s_{\pi_l,k(|\mathcal{S}_{l,k}|)}]^H$ , où nous supposons que  $s_{\pi_l,k(i)}$  est décodé avant  $s_{\pi_l,k(j)}$  si  $i > j$ .

La SINR de l'utilisateur- $k$  pour décoder le flux d'ordre  $l$ ,  $s_{\pi_l,k(i)}$ , est [MCL18c] :

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

où :

- 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.

Le débit réalisable correspondant de l'utilisateur- $k$  pour le flux de données  $s_{\pi_l,k(i)}$  est [Mao+22] :

$$R_k^{\pi_{l,k}(i)} = \log_2 \left( 1 + \gamma_k^{\pi_{l,k}(i)} \right) \quad (2.17)$$

Pour garantir que les flux partagés par plus de deux utilisateurs sont décodés avec succès par tous les utilisateurs, le débit réalisable de chaque utilisateur dans le sous-ensemble  $\mathcal{A} (\mathcal{A} \in \mathcal{K}, 2 \leq |\mathcal{A}| \leq K)$  pour décoder le flux d'ordre- $|\mathcal{A}|$   $s_{\mathcal{A}}$  ne doit pas dépasser [MCL18c] :

$$\sum_{k \in \mathcal{A}} C_k^{\mathcal{A}} = \min_{k'} \{R_{k'}^{\mathcal{A}} | k' \in \mathcal{A}\}, \quad (2.18)$$

où :

- $C_k^{\mathcal{A}}$  : c'est la part du débit commun allouée à l'utilisateur- $k$  ( $k \in \mathcal{A}$ ) pour la transmission de  $W_k^{\mathcal{A}}$  via  $s_{\mathcal{A}}$ .

Par conséquent, le débit total réalisable de l'utilisateur- $k$  est [MCL18c] :

$$R_{k,\text{tot}} = \sum_{\mathcal{A}' \subseteq \mathcal{K}, k \in \mathcal{A}'} C_k^{\mathcal{A}'} + R_k. \quad (2.19)$$

Un exemple de RS généralisé à 3 utilisateurs est illustré dans la figure 2.8. Chaque message utilisateur est divisé en 4 sous-messages, c'est-à-dire que  $W_1$  est divisé en  $\{W_1^{123}, W_1^{12}, W_1^{13}, W_1^1\}$ . Les 12 sous-messages sont combinés et codés en un flux d'ordre-3 ( $s_{123}$ ), trois flux d'ordre-2 ( $s_2 = [s_{12}, s_{13}, s_{23}]^T$ ) et trois flux d'ordre-1 ( $s_1 = [s_1, s_2, s_3]^T$ ). Chaque utilisateur utilise 3 couches de SIC pour décoder les 4 flux souhaités dans l'ordre. La figure 2.8 représente le récepteur de l'utilisateur-1 lorsque l'ordre de décodage des flux d'ordre-2 est  $\pi_{2,1} = 12 \rightarrow 13$ . Nous avons  $s_{\pi_{2,1}(1)} = s_{12}$  et  $s_{\pi_{2,1}(2)} = s_{13}$  [Mao+22].

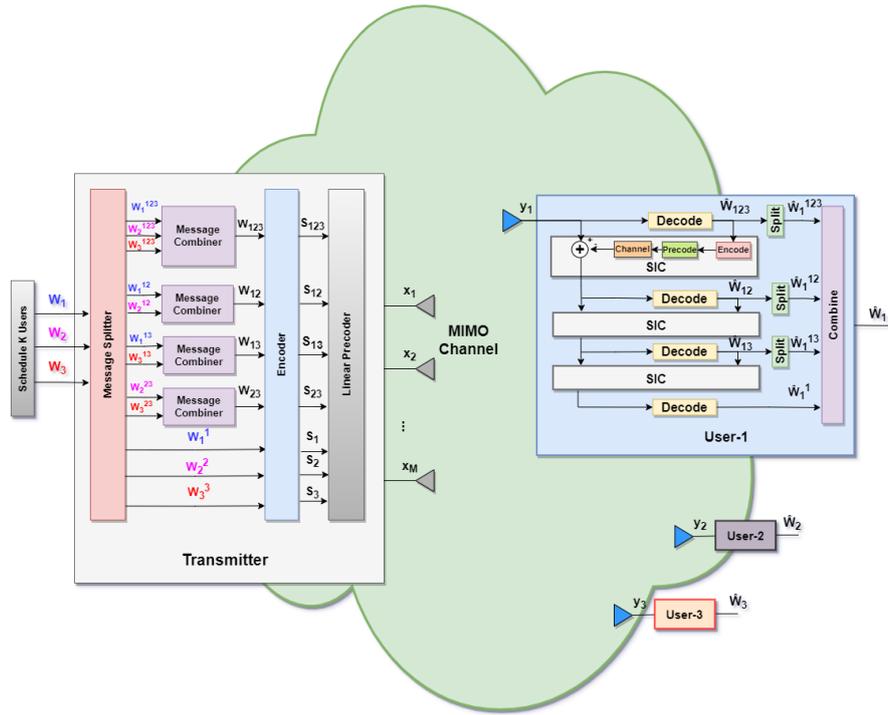


FIGURE 2.8 – Modèle de transmission à trois utilisateurs utilisant RS généralisé.

Après avoir examiné les différentes stratégies RSMA, nous pouvons maintenant comparer leurs performances en termes de caractéristiques clés. Le tableau 2.1 présente une comparaison des stratégies RSMA les plus couramment utilisées, en se basant sur des critères tels que le nombre de sous-messages découpés à partir de chaque message, le nombre de flux transmis et les couches de SIC pour chaque utilisateur.

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

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

## 2.5 Comparaison des stratégies d'accès multiple : NOMA, SDMA et RSMA

Le tableau 2.2 présente une comparaison des principales différences entre les stratégies d'accès multiple NOMA, SDMA et RSMA. Chacune de ces stratégies offre une approche unique pour gérer les interférences dans les réseaux de communication sans fil. Le tableau analyse également la complexité de l'encodeur et de l'ordonnanceur pour chaque stratégie, mettant en évidence les différences de complexité entre ces approches.

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'ordonnanceur	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 2.2 – Comparaison qualitative de la complexité de différentes stratégies d'accès multiple [Mao+22].

## 2.6 Conclusion

Cette étude approfondie du NOMA, du SDMA et particulièrement du RSMA nous a permis de mieux comprendre leurs différences par rapport aux techniques OMA, les approches spécifiques utilisées pour gérer les interférences dans chaque technique. Ce qui nous a conduit à conclure que SDMA et NOMA sont des sous techniques contenues dans RSMA.

# Chapitre 3

## Paramètres clés du système et mesures de performances des techniques d'accès

### 3.1 Introduction

L'évolution des systèmes de communication 5G a été marquée par la recherche de solutions visant à améliorer les performances des réseaux sans fil. Parmi ces solutions, l'introduction de la RSMA a suscité un intérêt croissant. Cependant, pour évaluer l'efficacité de cette technique et comprendre son impact sur les performances d'un système 5G, il est essentiel de considérer certains paramètres clés du système et de mesurer les performances des techniques d'accès. Ce chapitre se concentre sur ces aspects, en fournissant une vue d'ensemble des caractéristiques des systèmes de communication 5G, tels que la qualité du CSI (Channel State Information) et le rapport signal/bruit (SNR). Ainsi que la méthode de transmission conjointe unicast et multicast et la charge du réseau. Il présente aussi les mesures de performances telles que l'efficacité énergétique, la région de débits, la somme des débits pondérés et la région de degré de liberté.

### 3.2 Les caractéristiques des systèmes de communications 5G

Cette section vise à fournir un bref aperçu des caractéristiques et des paramètres qui influencent les performances des 5G-CS (5G-Communication System).

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

L'information sur l'état du canal CSI est l'un des concepts les plus fondamentaux des communications sans fil. Le CSI fait référence aux propriétés connues du canal d'une liaison radio. Elle peut caractériser l'effet combiné de l'affaiblissement du signal, de la diffusion, de la diffraction, de l'évanouissement, de l'ombrage, lors de la

propagation des signaux d'un émetteur à son récepteur correspondant via l'air. Le CSI est utilisé pour quantifier la qualité d'une liaison radio [Luo+18].

Le CSI détermine les paramètres et les schémas de la couche physique déployés pour les communications radio dans un système. Par exemple, la couche physique doit utiliser des schémas de modulation d'ordre faible lorsque les canaux sont médiocres et des schémas de modulation d'ordre plus élevé 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 vital pour l'amélioration des performances des communications de trouver un CSI précis [Luo+18].

En règle générale, nous pouvons obtenir un CSI précis en effectuant une estimation du canal. Jusqu'à présent, les chercheurs ont proposé de nombreuses méthodes d'estimation du canal, telles que l'estimation par maximum de vraisemblance (ML), l'estimation par moindres carrés (LS) et l'estimation par erreur quadratique minimale (MMSE) [Luo+18].

Ces dernières années, les systèmes des communications cellulaires ont évolué vers des 5G-CS en raison de la croissance explosive des appareils mobiles et du trafic mobile [Luo+18]. Afin de prendre en charge de manière optimale une variété d'applications dans des conditions de canaux d'utilisateurs omniprésents, il est essentiel pour le réseau d'acquérir des connaissances sur les conditions du canal radio et d'adapter rapidement les configurations et les schémas de transmission aux utilisateurs. Les informations sur les canaux peuvent aller de statistiques à long terme à des réponses en temps réel, et peuvent être utilisées à diverses fins d'optimisation des systèmes de communication [Li+23].

L'estimation du CSI dans 5G-CS est un problème d'estimation de canal à grande échelle qui est généralement très compliqué. En outre, l'utilisation de méthodes conventionnelles d'estimation du CSI nécessite d'effectuer des opérations matricielles à grande échelle avec une complexité de calcul élevée. Il est évident que l'obtention du CSI prend beaucoup de temps. Par conséquent, l'acquisition du CSI ne peut pas répondre à l'exigence de rafraîchissement du CSI à un rythme dans un système de communication sans fil 5G [Luo+18]. C'est pourquoi il est avantageux d'adopter des techniques d'accès multiples qui ne dépendent pas autant de la qualité du CSI dans les systèmes de communications 5G.

### 3.2.2 Le rapport Signal sur Bruit

Le rapport signal sur bruit (SNR : Signal-to-Noise Ratio), souvent abrégé S/B, représente le rapport entre la puissance du signal reçu et celle du bruit de fond. Le SNR est un indicateur utilisé pour évaluer la qualité du signal reçu. Sa valeur est exprimée en décibels (dB) et peut être calculée à l'aide de la formule suivante [NET] :

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

Un SNR positif indique que la puissance du signal est supérieure à la puissance du bruit, ce qui permettra au récepteur de démoduler le signal. En revanche, un SNR négatif indique que la puissance du signal est inférieure à celle du bruit [NET].

### 3.2.3 Les différents types de transmission

Il existent plusieurs types de transmission qui caractérisent les systèmes des communications. Dans cette partie on s'intéresse particulièrement à présenter la transmission conjointe unicast et multicast.

#### 3.2.3.1 La transmission conjointe unicast et multicast

Les termes unicast et multicast désignent des méthodes de transmission. La transmission unicast est une communication un à un et la transmission multicast est un processus de communication un à plusieurs [gad19]. La transmission unicast et multicast conjointe n'est qu'une transmission qui combine les deux méthodes. Sa réalisation varie d'une technique à une autre [MCL18b] :

- **La transmission unicast et multicast assisté par SC-SIC** : le message multicast dans SC-SIC est encodé simultanément avec le message unicast pour être d'abord décodé en un flux super-commun  $s_0$ .
- **La transmission unicast et multicast assisté 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. Cependant, MU-LP est sensible à l'orthogonalité et à la puissance des canaux des utilisateurs.
- **La transmission unicast et multicast assisté par RS** : dans la transmission unicast seule, RS nécessite une couche de SIC pour décoder les parties communes des messages unicast afin de permettre la capacité de décoder une partie des interférences multi-utilisateurs et de traiter une partie des interférences multi-utilisateurs comme du bruit. La SIC de RS dans la transmission conjointe unicast et multicast est utilisée pour séparer les flux unicast et multicast ainsi que pour mieux gérer l'interférence multi-utilisateurs entre les flux unicast. RS nécessite toujours une couche de SIC sans coût supplémentaire pour les récepteurs. Chaque message unicast est divisé en une partie commune et une partie privée à l'émetteur. Le message multicast est encodé avec les parties communes des messages unicast.

Le débit du message multicast est un paramètre qui détermine la taille du message unique. Il est essentiel de l'optimiser pour réduire les collisions, en particulier lorsque plusieurs utilisateurs communiquent simultanément [Adm].

### 3.2.4 La charge du réseau

Les réseaux de communication sans fil, en fonctionnement dynamique, peuvent être classés en deux catégories principales : sous-chargés et surchargés. Dans un régime sous-chargé, le nombre d'appareils programmés est inférieur au nombre d'antennes de transmission sur chaque point d'accès. En revanche, dans un régime surchargé, le nombre d'appareils programmés dépasse le nombre d'antennes de transmission sur chaque point d'accès. Ces deux états reflètent la capacité du réseau à gérer la demande croissante d'appareils connectés, notamment avec l'avènement de la cinquième génération (5G) et au-delà [LL21].

## 3.3 Les mesures de performances

### 3.3.1 L'efficacité Energétique

Le concept d'EE (Energy Efficiency) pour les Systems de communication a d'abord été étudié du point de vue de la théorie de l'information, en définissant une mesure appelée énergie minimale par bit comme le rapport entre la puissance consommée et le débit atteint, exprimé en J/bit [Sbo+19]. Récemment, la mesure EE, définie comme le rapport entre la capacité du canal  $C$  et la puissance consommée pour atteindre ce débit, et donné par [Sbo+19] :

$$EE = \frac{C}{P_c + P_{Tx}}, \quad (3.2)$$

où :

- $P_{Tx}$  est la puissance d'émission.
- $P_c$  est la puissance du circuit. Elle est donné par :  $P_c = N_t P_{dyn} + P_{sta}$  [MCL18a].
- $P_{dyn}$  désigne la consommation d'énergie dynamique. Il s'agit de la consommation d'énergie d'une chaîne de radiofréquences active [MCL18a].
- $P_{sta}$  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 [MCL18a].

### 3.3.2 La région de débits

Considerons un système Massive MIMO où une BS équipée de  $M$  antennes dessert deux utilisateurs. Les débits réalisables des utilisateurs 1 et 2 peuvent être exprimés sous la forme générale [CBL18] :

$$R_1 = \log_2 \left( 1 + \frac{\alpha_1 \eta_1}{\mu_{1,1} \eta_1 + \mu_{1,2} \eta_2 + 1} \right), \quad (3.3)$$

$$R_2 = \log_2 \left( 1 + \frac{\alpha_2 \eta_2}{\mu_{2,1} \eta_1 + \mu_{2,2} \eta_2 + 1} \right), \quad (3.4)$$

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 la 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.

En DL (DownLink) la contrainte de puissance au niveau de la BS est :  $0 \leq \eta_1 + \eta_2 \leq 1$ . En UL (UpLink), les contraintes de puissance des deux utilisateurs sont :  $0 \leq \eta_1 \leq 1$  et  $0 \leq \eta_2 \leq 1$  [CBL18].

La région de débit est décrite en trouvant les débits de données maximaux réalisable lorsque chaque utilisateur est soumis à une contrainte de puissance d'émission maximale [Cha+12].

### 3.3.3 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 prend en compte le débit réalisable par chaque utilisateur et son poids. Il est défini par la formule suivante :

$$WSR = \sum_{i=1}^K \mu_i R_i, \quad (3.5)$$

La maximisation du WSR est l'objectif principal des nouvelles techniques d'accès en tenant compte d'une contrainte de puissance pour la station de base et des contraintes de qualité de service (QoS) de chaque utilisateur [MCL18c].

Le problème de maximisation de WSR est traité avec des algorithmes WMMSE (Weighted Minimum Mean Square Error) en le transformant en un problème équivalent de WMMSE, puis le résoudre en appliquant l'approche d'optimisation alternative [MCL18c].

### 3.3.4 La région de DoF

Une région de DoF est définie comme l'ensemble de toutes les combinaisons possibles de DoF  $(d_1^{(j)}, \dots, d_K^{(j)})$  [Mao+22].

#### 3.3.4.1 Le degré de liberté (ou Degrees of Freedom)

Degré de liberté, ou gain de multiplexage, est une approximation de premier ordre du débit à rapport signal sur bruit élevé (SNR). Il représente le facteur pré-logarithmique du débit à SNR élevé et correspond au nombre ou à la fraction de flux sans interférence qui peuvent être simultanément transmis à un utilisateur ou à plusieurs utilisateurs. Le nombre de DoF atteint dépend de la stratégie de communication utilisée. Plus le nombre de DoF est élevé, plus le débit augmente avec le SNR. Par conséquent, une stratégie de communication idéale vise à atteindre le nombre maximal de DoF possible [Cle+23].

Le DoF de l'utilisateur- $k$  atteint par la stratégie de communication  $j$ ,  $j \in \{N, S, R\}$  ( $N$ ,  $S$  et  $R$  correspondent respectivement à NOMA, SDMA, RSMA), est défini par l'équation 3.6 [Cle+21] :

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

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 total est donné par la formule 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, où  $k$  varie de 1 à  $K$  utilisateurs.

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

Le gain de multiplexage MMF, ou Équité Max-Min (également appelé DoF symétrique) représente le DoF qui peuvent être simultanément atteints par tous les utilisateurs. La formule est donné par [Mao+22] :

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

où :

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

### 3.3.4.4 La comparaison des Sum-DoF et MMF-DoF pour les stratégies NOMA, SDMA et RSMA

Dans le contexte du MISO BC, les auteurs de l'étude [Cle+21] ont déduit les expressions de sum-DoF et de MMF-DoF pour les schémas d'accès multiple NOMA, SDMA et RSMA, en tenant compte de la connaissance parfaite ou imparfaite du canal (CSIT). Ces expressions sont résumés dans les deux tableaux 3.1 et 3.2, ce qui facilite leur consultation et leur comparaison.

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.

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 différentes stratégies avec une connaissance parfaite et imparfaite du canal (CSIT) [Cle+21].

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

TABLE 3.2 – Comparaison des MMF-DoF de différentes stratégies 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].

La figure 3.1 présente l'interprétation de  $\alpha$  en termes de bits de rétroaction.

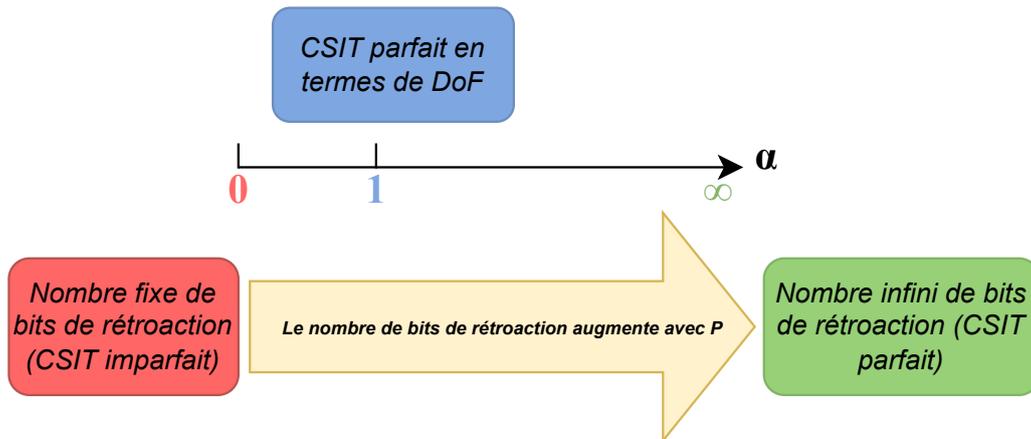


FIGURE 3.1 – Interprétation de  $\alpha$  en termes de bits de rétroaction

### 3.4 Conclusion

Ce chapitre a introduit l'ensemble des outils théoriques nécessaires à la compréhension 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

Ce dernier chapitre mène une comparaison entre les performances des techniques RSMA, NOMA et SDMA. Il a pour objectif de confirmer l'efficacité de la technique RSMA et sa capacité de répondre aux exigences massives des systèmes 5G.

Dans ce qui suit, nous présentons l'environnement dans lequel nous avons effectué nos simulations, ainsi que les outils supplémentaires nécessaires pour mener à bien notre étude. De plus, nous exposons les résultats de nos simulations, couvrant un large éventail de mesures de performances allant de la région de débits à la somme des débits pondérés (WSR), à la région d'efficacité énergétique (EE) arrivant à la région des degrés de liberté (région de DoF). Ensuite, nous analysons ces résultats et évaluons les performances des techniques NOMA, SDMA et RSMA. Nous terminons ce chapitre par une conclusion.

### 4.2 Présentation de MATLAB

MATLAB est un langage très performant dédié au calcul technique. Il intègre le calcul, la visualisation et la programmation dans un environnement convivial où les problèmes et les solutions sont exprimés dans une notation mathématique familière.

Les utilisations typiques sont les suivantes :

- Les mathématiques et le calcul.
- Le développement d'algorithmes.
- La modélisation, la simulation et le prototypage.
- L'analyse, l'exploration et la visualisation des données.
- Les graphiques scientifiques et techniques.
- Le développement d'applications, y compris la création d'interfaces utilisateur graphiques.

C'est un système interactif dont l'élément de données de base est un tableau qui n'a

pas besoin d'être dimensionné. Cela nous permet de résoudre de nombreux problèmes de calcul technique, en particulier ceux qui comportent des formulations matricielles et vectorielles, en une fraction du temps qu'il faudrait pour écrire un programme dans un langage scalaire non interactif. En fait, le nom MATLAB lui-même signifie laboratoire matriciel.

Au fil des années, MATLAB a évolué grâce à la contribution de nombreux utilisateurs. Il est largement utilisé dans les universités pour les cours de mathématiques, d'ingénierie et de sciences, ainsi que dans l'industrie pour la recherche, le développement et l'analyse à haute productivité.

Une caractéristique essentielle de MATLAB est sa collection de boîtes à outils spécifiques à chaque domaine. Ces boîtes à outils fournissent des solutions spécialisées dans des domaines tels que le traitement du signal, les systèmes de contrôle, les réseaux neuronaux, la simulation, et bien d'autres. Elles sont des collections complètes de fonctions MATLAB (fichiers M) qui étendent l'environnement MATLAB pour résoudre des classes particulières de problèmes [Bir].

### 4.2.1 CVX Toolbox

CVX est un système de modélisation basé sur Matlab utilisé pour l'optimisation convexe. Il permet de transformer MATLAB en un langage de modélisation, facilitant ainsi la spécification des contraintes et des objectifs à l'aide de la syntaxe d'expression standard de MATLAB [Ste20].

### 4.2.2 YALMIP Toolbox

YALMIP est un acronyme pour "Yet Another LMI Parser" (Encore un analyseur d'inégalités matricielles linéaires) en anglais. Cette bibliothèque open-source, développée pour MATLAB, simplifie la modélisation et la résolution de problèmes d'optimisation avec des contraintes linéaires et non linéaires. Elle utilise des inégalités matricielles linéaires (LMI) couramment utilisées dans les problèmes d'optimisation convexes et non convexes.

YALMIP offre une syntaxe conviviale et une interface simple pour interagir avec des solveurs externes tels que MOSEK, SDPT3, CPLEX, et d'autres. Il agit en tant qu'intermédiaire entre l'utilisateur et ces solveurs externes, facilitant ainsi la modélisation efficace et la résolution fiable des problèmes d'optimisation complexes.

Avec ses fonctionnalités avancées et son approche intuitive, YALMIP est largement adopté dans des domaines tels que l'ingénierie, les mathématiques appliquées, la recherche opérationnelle et l'automatisation [Löf23].

## 4.3 Présentation et analyse des résultats

Nous commençons par illustrer la région de débits réalisable des différentes stratégies, suivie par leurs WSR. Nous illustrons également leurs région d'EE et leurs région de DoF. Dans toutes les figures qui suivent :

- 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, et sa limite est calculée en faisant varier les poids attribués aux utilisateurs [MCL18c].

Le poids de l'utilisateur-1 est fixé à  $\mu_1 = 1$ , et le poids de l'utilisateur-2 varie comme suit :  $\mu_2 = 10^{[-3, -1, -0.95, \dots, 0.95, 1, 3]}$ . Les canaux des utilisateurs sont réalisés comme suit :  $h_1 = [1, 1, 1, 1]^H$ , et  $h_2 = \gamma \times [1, e^{j\theta}, e^{j2\theta}, e^{j3\theta}]^H$ . La station de base est équipée de 4 antennes  $N_t = 4$ , tout comme dans [MCL18c].

Dans les réalisations de canaux ci-dessus, les paramètres  $\gamma$  et  $\theta$  sont des variables de contrôle [MCL18c] :

- La perte de trajet supplémentaire que subit la puissance du canal de l'utilisateur-2 est contrôlée par  $\gamma$ . Si  $\gamma = 1$ , la puissance du canal de l'utilisateur-1 est égale à celle de l'utilisateur-2. Si  $\gamma = 0.75$ , l'utilisateur-2 subit une perte de trajet supplémentaire de  $1dB$  par rapport à l'utilisateur-1. Si  $\gamma = 0.5$ , l'utilisateur-2 subit une perte de trajet supplémentaire de  $3dB$  par rapport à l'utilisateur-1.
- Le paramètre  $\theta$  permet de régler l'angle formé entre les canaux utilisés par les deux utilisateurs. 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 sont orthogonaux l'un par rapport à l'autre.  $\theta$  adopte une valeur de  $\theta = [\frac{\pi}{9}, \frac{2\pi}{9}, \frac{3\pi}{9}, \frac{4\pi}{9}]$ . Intuitivement, lorsque  $\theta$  est inférieur à  $\frac{\pi}{9}$ , les canaux des utilisateurs sont suffisamment alignés et le SC-SIC donne de bons résultats. Lorsque  $\theta$  est supérieur à  $\frac{4\pi}{9}$ , les canaux des utilisateurs sont suffisamment orthogonaux et la méthode MU-LP est plus appropriée. Par conséquent, nous considérons des angles dans la plage de  $\frac{\pi}{9}$  à  $\frac{4\pi}{9}$ .

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

Dans le scénario de CSIT parfait, la région de capacité est atteinte par le DPC (Dirty Paper Coding). Ainsi, pour évaluer les performances des différentes techniques, nous comparons la région des débits réalisables avec la région de DPC [MCL18c]. La région de DPC est générée en utilisant l'algorithme décrit dans [VVH03].

Effet de la puissance du canal :

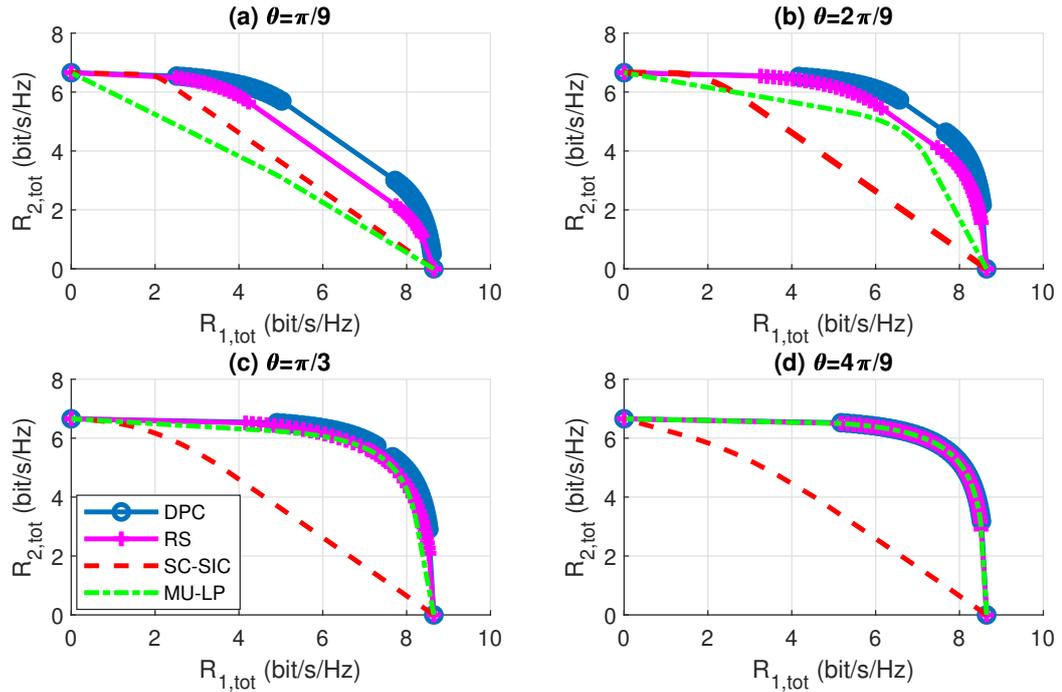


FIGURE 4.1 – La région de débits réalisables pour les différentes stratégies dans un déploiement à 2 utilisateurs sous-chargé, avec un CSIT parfait,  $\text{SNR} = 20$  dB,  $\gamma = 0.5$ .

Dans la figure 4.1, on remarque que la région RS surpasse les régions SC-SIC et MU-LP. Il est également remarqué que pour  $\theta = \frac{\pi}{9}$ , SC-SIC atteint une région plus large que MU-LP car les canaux sont alignés pour cet angle. Cependant, en augmentant la valeur de  $\theta$ , la région de MU-LP s'élargit et dépasse celle de SC-SIC, qui reste presque constante. Les performances de MU-LP continuent à s'améliorer jusqu'à atteindre la région de RS pour  $\theta = \frac{4\pi}{9}$ , c'est-à-dire lorsque les canaux sont suffisamment orthogonaux.

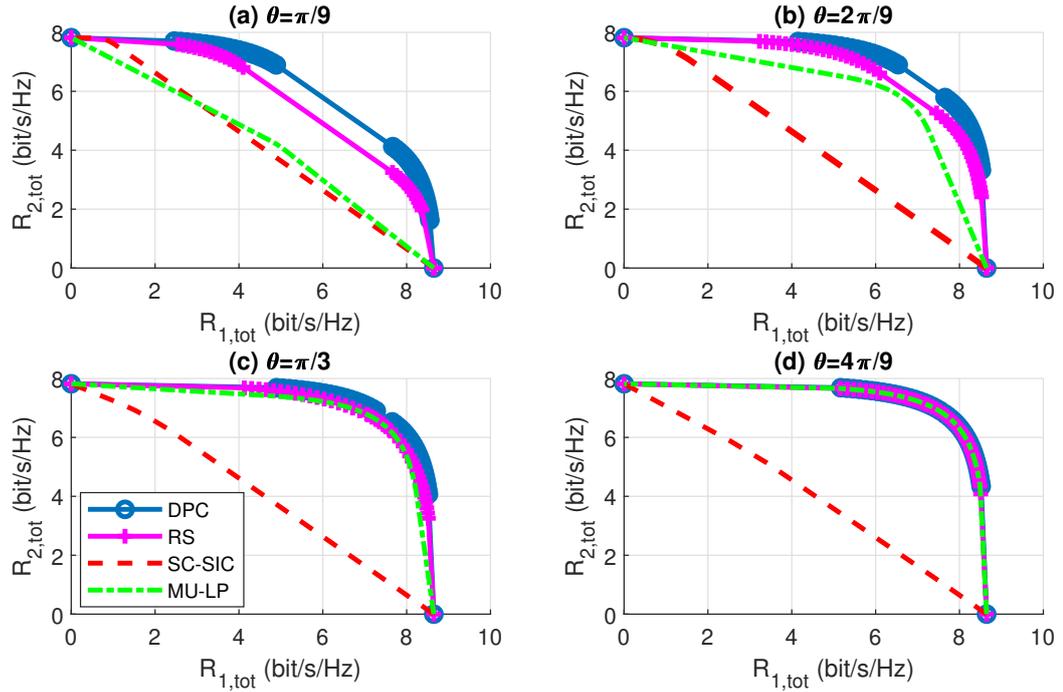


FIGURE 4.2 – La région de débits réalisables pour les différentes stratégies dans un déploiement à 2 utilisateurs sous-chargé avec un CSIT parfait,  $\text{SNR} = 20$  dB,  $\gamma = 0.75$ .

Dans la figure 4.2, on remarque que la région de débits pour les 3 stratégies s'étend sur l'axe des ordonnées par rapport à la figure 4.1. L'intervalle des valeurs de débits réalisables pour l'utilisateur-2 s'est élargi en raison de la réduction des pertes de trajet supplémentaires. On observe que la région MU-LP est supérieure à la région SC-SIC, sauf pour l'angle  $\frac{\pi}{9}$ , et cela se limite uniquement à l'intervalle d'étalement de  $R_{2,\text{tot}}$ .

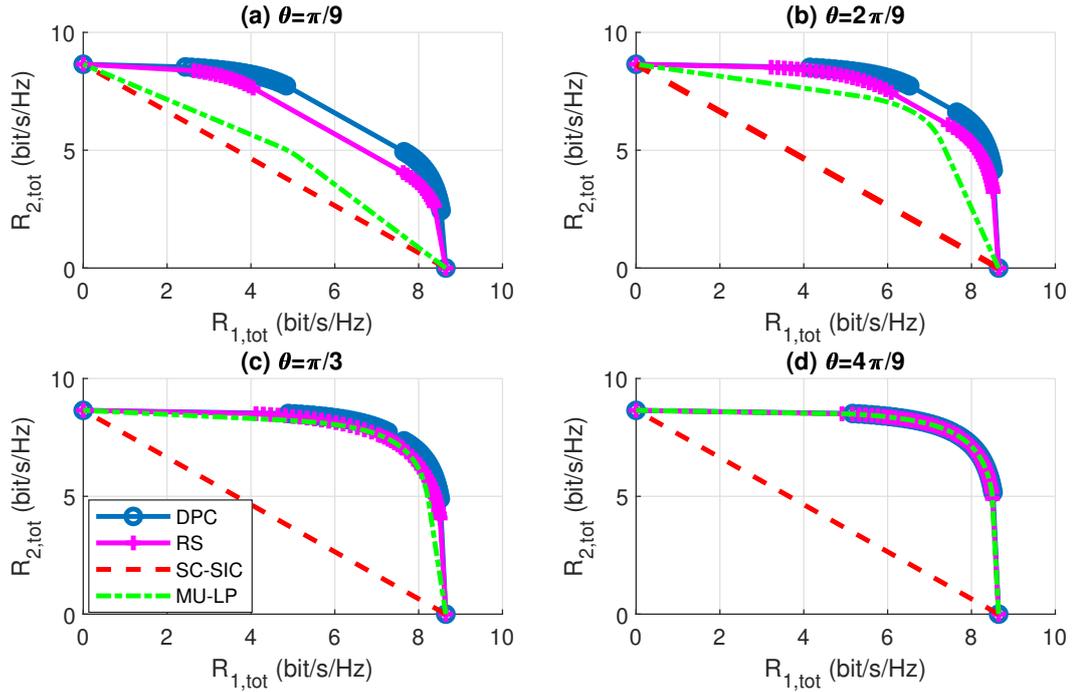


FIGURE 4.3 – La région de débits réalisables pour les différentes stratégies dans un déploiement à 2 utilisateurs sous-chargé avec un CSIT parfait,  $\text{SNR} = 20$  dB,  $\gamma = 1$ .

Dans la figure 4.3, on observe une région encore plus large pour toutes les stratégies, RS étant toujours la mieux performante. La région MU-LP est supérieure à la région SC-SIC pour tous les angles, et elle se rapproche le plus de la région RS.

Dans toutes les figures, on observe que la région de débits atteinte par RS est la plus large. De plus, RS permet d'atteindre la région de capacité pour  $\theta = \frac{4\pi}{9}$ .

On constate que RS atteint sa région de débits maximale lorsque les puissances de canal des deux utilisateurs sont identiques, c'est-à-dire lorsque  $\gamma = 1$ .

Effet du rapport signal/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.

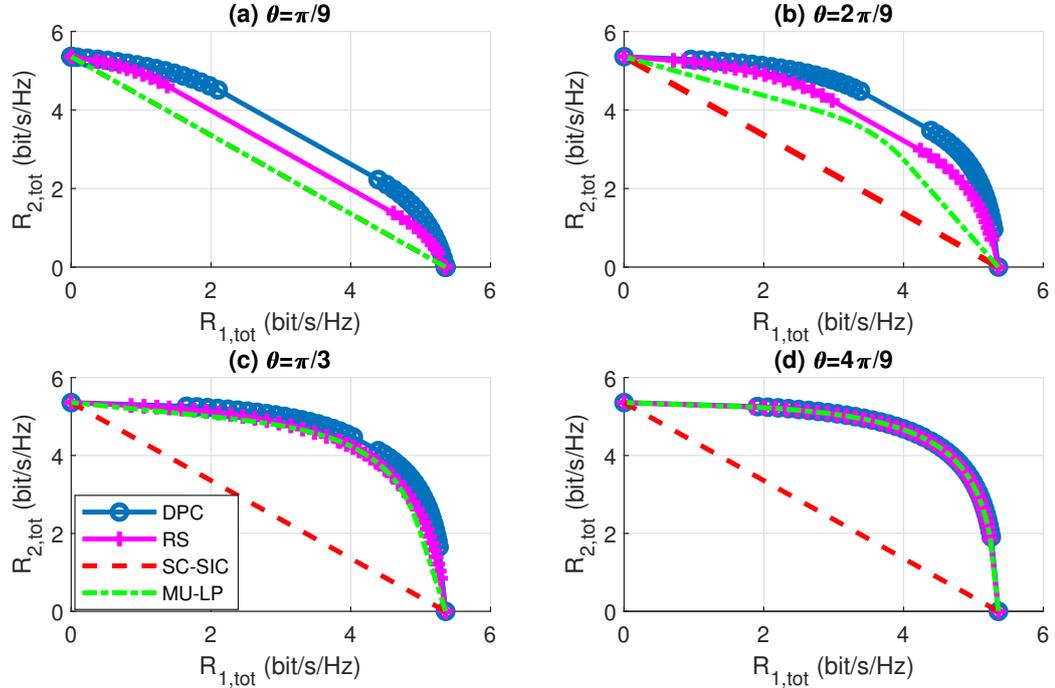


FIGURE 4.4 – la région de débits réalisable pour les différentes stratégies dans un déploiement à 2 utilisateurs sous-chargé un CSIT parfait,  $\gamma = 1$ , SNR= 10 dB.

Dans la figure 4.4, on observe que la diminution du SNR entraîne un rétrécissement de la région de capacité ainsi que des régions de débits réalisables pour les trois stratégies. Cette diminution est principalement due à l'augmentation de la puissance du bruit. La stratégie SC-SIC présente une région constante qui est la plus petite parmi les régions visualisées, ce qui indique ses limitations en termes de débits réalisables. En revanche, les régions de RS et de MU-LP s'améliorent à mesure que la valeur de  $\theta$  augmente. Parmi les deux, la région de RS reste constamment la plus large, démontrant ainsi sa supériorité par rapport aux autres stratégies.

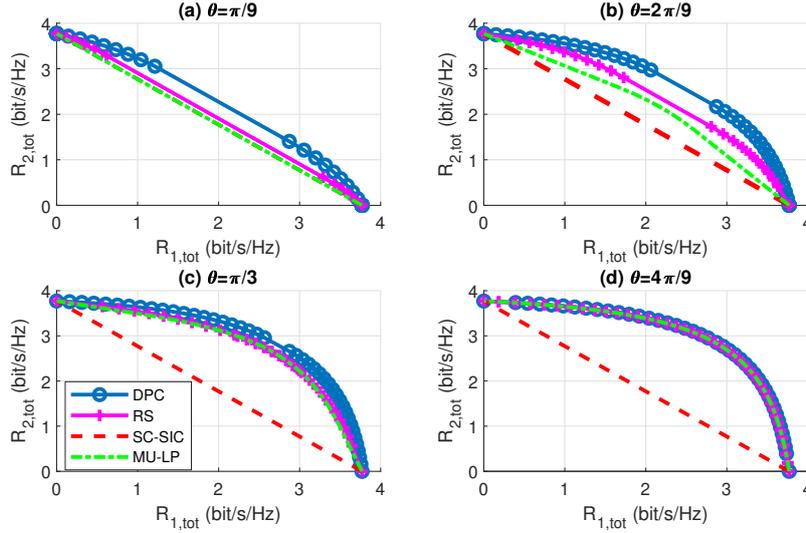


FIGURE 4.5 – la région de débits réalisable pour les différentes stratégies dans un déploiement à 2 utilisateurs sous-chargé un CSIT parfait,  $\gamma = 1$ , SNR= 5 dB.

Dans la figure 4.5, on observe des résultats similaires avec un SNR encore plus bas. La région de capacité et les régions de débits réalisables pour toutes les stratégies se rétrécissent davantage. Cependant, on constate que la stratégie RS conserve sa supériorité avec la plus grande région de débits réalisables, suivie par la stratégie MU-LP.

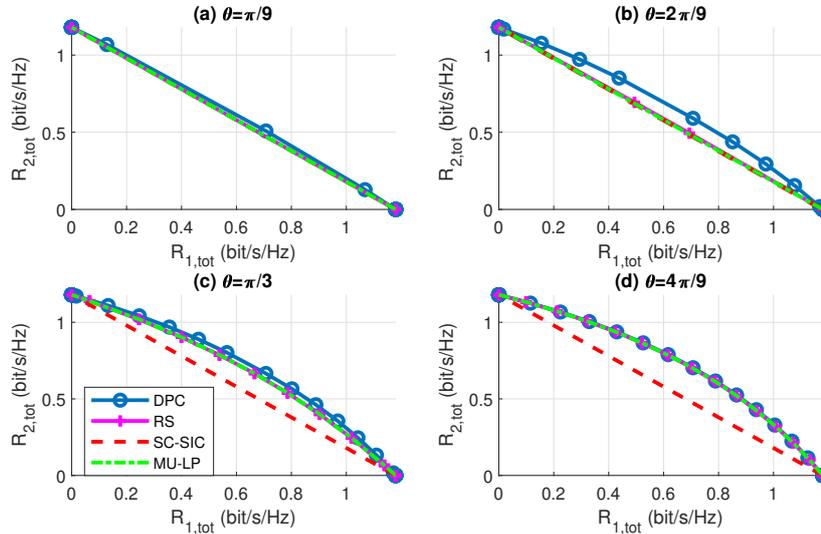


FIGURE 4.6 – la région de débits réalisable pour les différentes stratégies dans un déploiement à 2 utilisateurs sous-chargé un CSIT parfait,  $\gamma = 1$ , SNR= -5 dB.

Dans la figure 4.6, pour une valeur SNR de  $-5$  dB, on observe des pertes importantes dans toutes les régions. Cela signifie que le signal utile est négligeable par rapport au bruit. Dans cette condition de faible SNR, les débits réalisables pour toutes les stratégies sont fortement limités. Les performances de la stratégie RS restent relativement meilleures que celles de la stratégie SC-SIC et similaires à celles de MU-LP, mais la région de débits réalisables pour toutes les stratégies est significativement réduite.

#### 4.3.1.2 Dans une transmission conjointe unicast et multicast dans des déploiements sous-chargés de deux utilisateurs avec CSIT parfait

Dans cette section, nous étudions l'influence de la contrainte de débit multicast et de l'angle du canal entre les utilisateurs sur la région de débits.

où :

- $R_0^{\text{th}}$  représente le seuil de débit du message multicast.

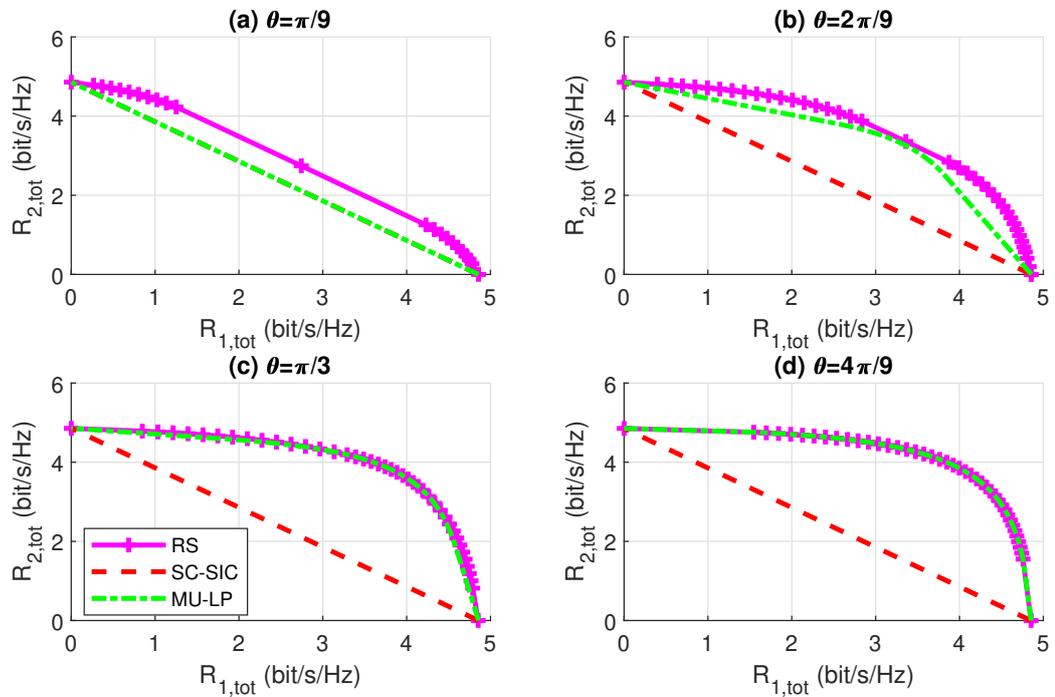


FIGURE 4.7 – la région de débits réalisable pour les différentes stratégies dans une transmission unicast et multicast avec un CSIT parfait,  $\gamma = 1$ ,  $R_0^{\text{th}} = 0.5$  bit/s/Hz.

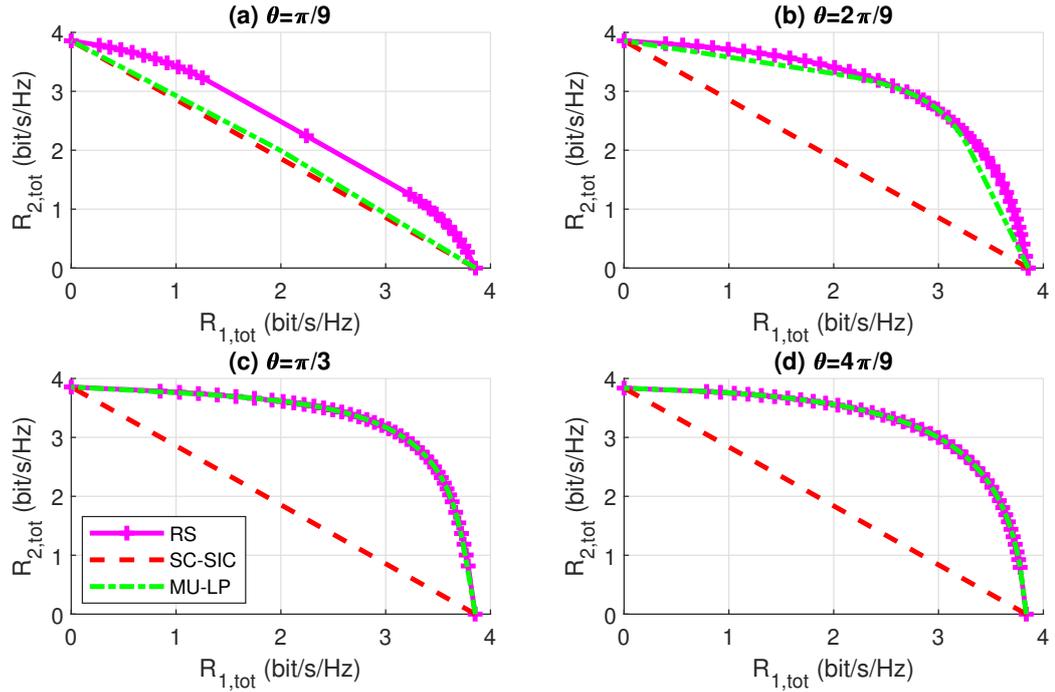


FIGURE 4.8 – La région de débits réalisable pour les différentes stratégies dans une transmission unicast et multicast avec un CSIT parfait,  $\gamma = 1$ ,  $R_0^{th} = 1.5$  bit/s/Hz.

On remarque des figures 4.7 et 4.8 que pour les deux valeurs du seuil, la région de débits atteinte par RS est la plus large. En augmentant l'angle entre les canaux des deux utilisateurs, la région de RS augmente légèrement. Bien que les performances de MU-LP s'améliorent largement et plus les deux canaux s'approchent de l'orthogonalité, la région MU-LP et la région RS se confondent. En revanche, la SC-SIC présente des performances constantes.

On remarque également qu'en augmentant le seuil de débit du message multicast, la région de débits diminue pour les trois techniques, car les collisions lors de la transmission du message multicast deviennent plus fréquentes.

### 4.3.1.3 Dans un déploiement sous-chargé à 2 utilisateurs avec un CSIT imparfait

Dans le scénario d'un CSIT imparfait nous supposons que les deux utilisateurs estiment parfaitement le canal, alors que l'estimation du canal instantané à la station de base est imparfaite [MCL18c].

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

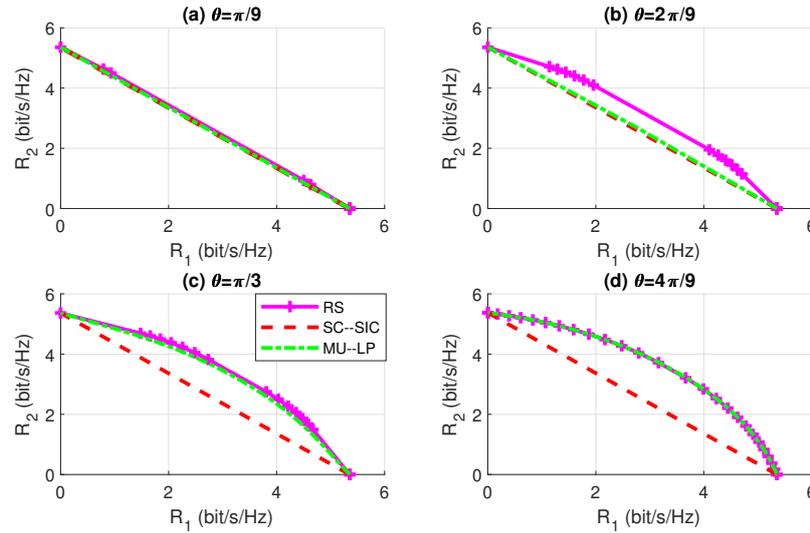


FIGURE 4.9 – la région de débits réalisable pour les différentes stratégies dans un déploiement à 2 utilisateurs sous-chargé un CSIT imparfait,  $\gamma = 1$ , SNR= 10 dB.

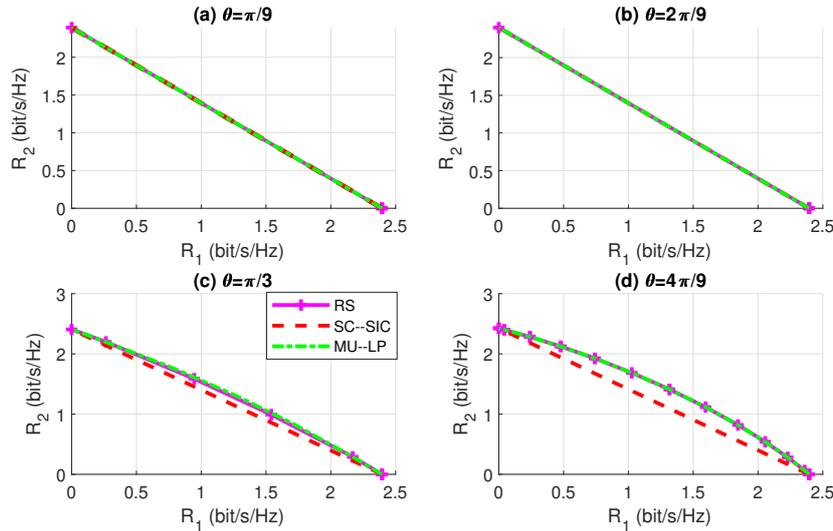


FIGURE 4.10 – la région de débits réalisable pour les différentes stratégies dans un déploiement à 2 utilisateurs sous-chargé un CSIT imparfait,  $\gamma = 1$ , SNR= 5 dB.

À travers les trois figures 4.9, 4.10 et 4.11, on observe que la diminution du SNR entraîne une réduction de la région de débits réalisables, ainsi que de la région de capacité, tout comme dans le cas du CSIT parfait.

On observe également que la stratégie RS présente la région la plus étendue. La région de MU-LP se rapproche de celle de RS lorsque les canaux des deux utilisateurs tendent vers l'orthogonalité. En revanche, la technique SC-SIC atteint sa région maximale lorsque les canaux sont alignés.

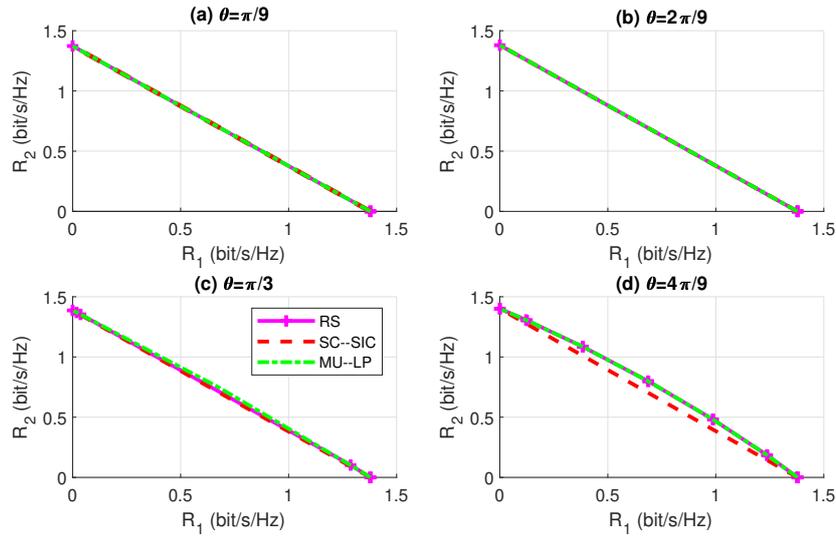


FIGURE 4.11 – la région de débits réalisable pour les différentes stratégies dans un déploiement à 2 utilisateurs sous-chargé un CSIT imparfait,  $\gamma = 1$ ,  $\text{SNR} = -5$  dB.

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

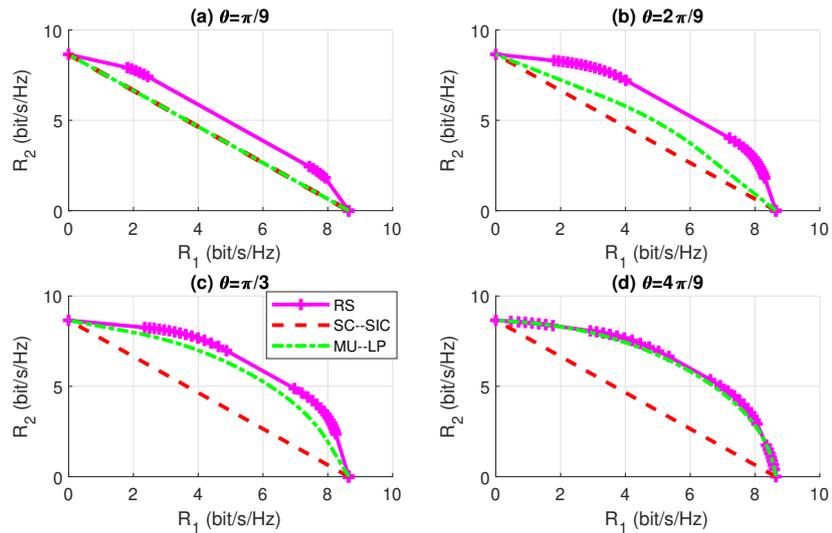


FIGURE 4.12 – la région de débits réalisable pour les différentes stratégies dans un déploiement à 2 utilisateurs sous-chargé un CSIT imparfait,  $\gamma = 1$ ,  $\text{SNR} = 20$  dB.

On observe que la région de gap entre RS et MU-LP visualisée dans la figure 4.12 avec un CSIT imparfait est plus large que celle visualisée dans la figure 4.3 avec un CSIT parfait. RS est donc la technique la plus performante dans le scénario de CSIT imparfait qui est le plus proche de la réalité.

Cette observation est due à l'introduction d'interférences résiduelles. L'élimination des interférences en utilisant MU-LP est perturbée, ce qui entraîne des interférences résiduelles au niveau du récepteur. Cela compromet le débit réalisable [MCL18c].

## 4.3.2 La somme des débits pondérés (WSR)

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

Lorsque  $K = 3$ , la région de débit de chaque stratégie forme une surface tridimensionnelle. Les écarts entre les régions de débits des différentes stratégies sont difficiles à représenter visuellement. Par conséquent, dans le cas d'un déploiement à trois utilisateurs, nous nous concentrons sur la comparaison des Weighted Sum Rates (WSR), plutôt que sur les régions de débit spécifiques à chaque stratégie de transmission [MCL18c].

Nous comparons les WSR du RS généralisé, du RS à une couche, du DPC, du SC-SIC et du MU-LP dans un scénario sous-chargé. Conformément au modèle présenté dans [MCL18c], 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. Les canaux des utilisateurs sont modélisés comme suit :  $h_1 = [1, 1, 1, 1]^H$ ,  $h_2 = \gamma_1 \times [1, e^{j\theta_1}, e^{j2\theta_1}, e^{j3\theta_1}]^H$ ,  $h_3 = \gamma_2 \times [1, e^{j\theta_2}, e^{j2\theta_2}, e^{j3\theta_2}]^H$ .

Il y a une différence de gain de canal de 5 dB entre l'utilisateur-1 et l'utilisateur-3, ainsi qu'entre l'utilisateur-2 et l'utilisateur-3 [MCL18c].

Nous supposons que la somme des poids attribués aux utilisateurs est égale à un, c'est-à-dire :  $\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 = 1$ .

Effet du signal/bruit (SNR) sur la somme des débits pondérés :

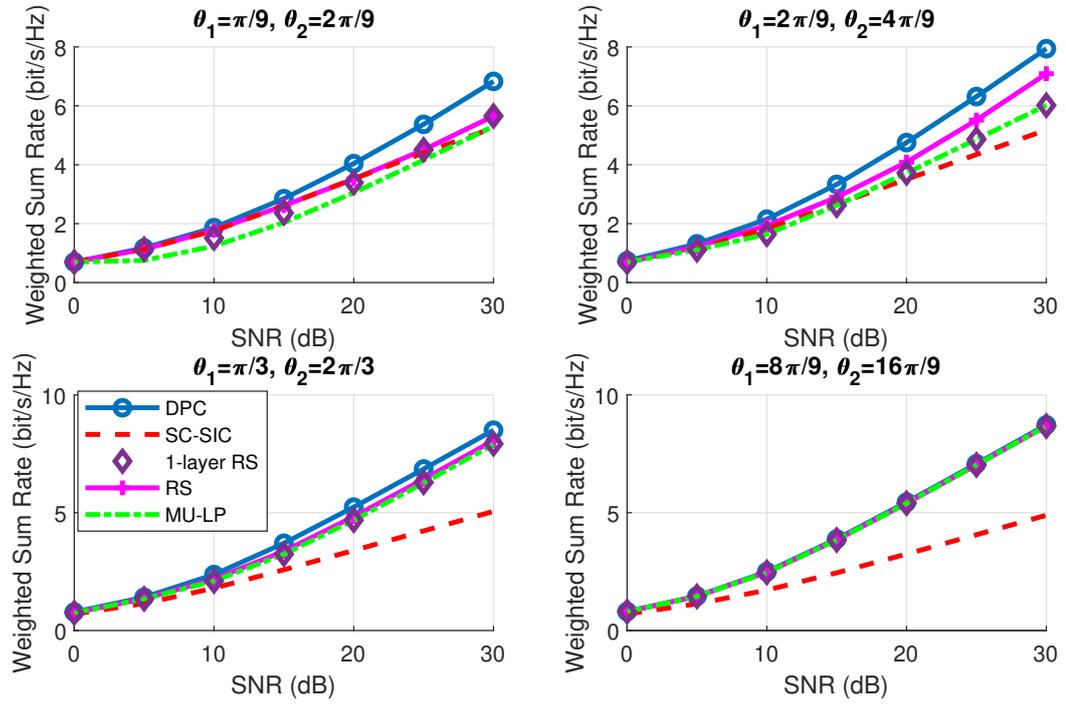


FIGURE 4.13 – WSR en fonction du SNR pour un déploiement sous-chargé à trois utilisateurs avec un CSIT parfait,  $\gamma_1 = 1$ ,  $\gamma_2 = 0.3$ ,  $\mu_1 = 0.2$ ,  $\mu_2 = 0.3$ ,  $\mu_3 = 0.5$ ,  $N_c = 4$ ,  $SNR \in [0 - 30]$  dB.

Dans la figure 4.13, nous examinons des valeurs de SNR dans la plage de  $[0 - 30]$  dB. Il est clairement observé que la stratégie RS est la plus performante, tandis que SC-SIC est la moins performante, indépendamment des valeurs des angles et sur l'ensemble de l'intervalle de SNR.

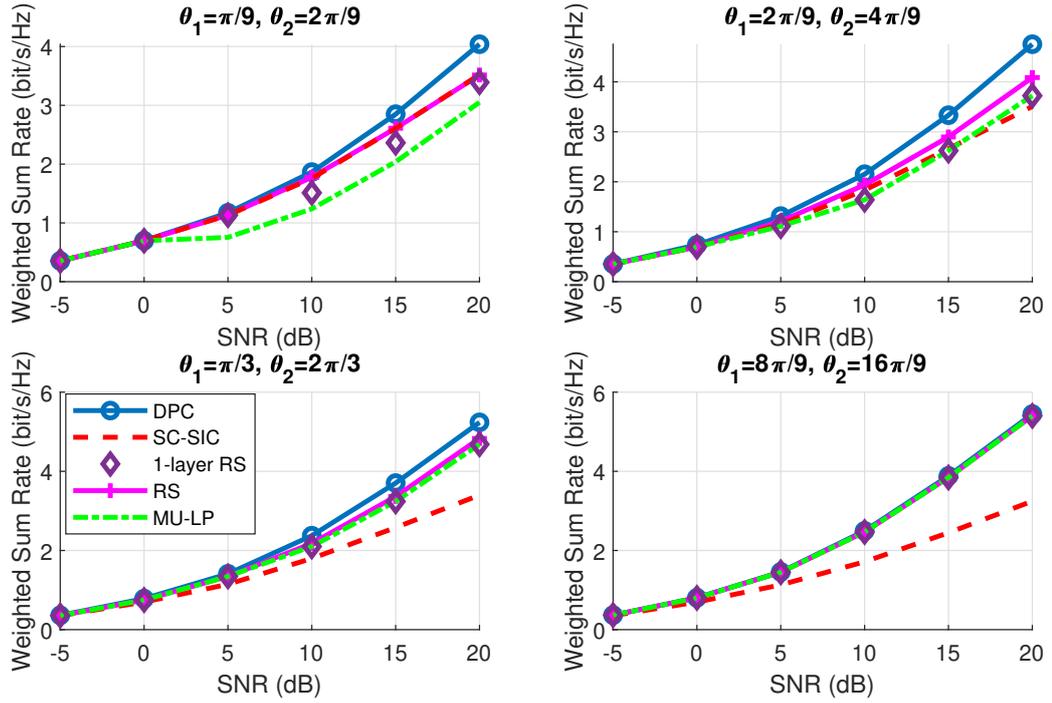


FIGURE 4.14 – WSR en fonction du SNR pour un déploiement sous-chargé à trois utilisateurs avec un CSIT parfait,  $\gamma_1 = 1$ ,  $\gamma_2 = 0.3$ ,  $\mu_1 = 0.2$ ,  $\mu_2 = 0.3$ ,  $\mu_3 = 0.5$ ,  $N_c = 4$ ,  $SNR \in [-10 - 20]$  dB.

Dans la figure 4.14, nous considérons des valeurs de SNR dans la plage de  $[-10 - 20]$  dB. Une réduction des régions de débits est observée pour toutes les stratégies dans l'intervalle de -5 à 20 dB de SNR. De plus, aucune variation du WSR n'est observée dans la plage de -10 à -5 dB. Cette observation peut être attribuée au fait que le signal est complètement noyé dans le bruit. Cela nous indique que le WSR est une mesure sensible à la qualité du signal.

### 4.3.3 La région d'efficacité énergétique réalisable

La région d'EE à deux utilisateurs est composée de toutes les paires d'EE individuelles réalisables (EE1, EE2). L'EE individuelle est définie comme le débit individuel réalisable divisé par la puissance totale [MCL18a].

Par exemple, l'EE individuel de l'utilisateur- $k$  en RSMA est donnée par l'équation suivante [MCL18a] :

$$EE_k = \frac{C_k + R_k(\mathbf{P})}{\frac{1}{\eta} \text{tr}(\mathbf{P}\mathbf{P}^H) + P_c}, \forall k \in 1, 2, \quad (4.1)$$

où :

- $C_k$  représente la quantité du débit réalisable de  $s_c$  allouée à l'utilisateur  $k$ .
- $\mathbf{P}$  est la matrice de précodage pour l'ensemble des flux de données.
- $R_k$  est le débit instantané de  $s_k$  à l'utilisateur  $k$ .
- $\text{tr}(\mathbf{P}\mathbf{P}^H)$  est la trace de la matrice résultante du produit de  $\mathbf{P}$  avec sa transposée conjuguée  $\mathbf{P}^H$ .
- $\eta$  est l'efficacité de l'amplificateur de puissance.
- $P_c$  est la puissance du circuit.

Le poids de l'utilisateur-1 est fixé à  $\mu_1 = 1$  et celui de l'utilisateur-2 varie comme suit :  $\mu_2 = 10^{[-3, -1, -0.95, \dots, 0.95, 1, 3]}$ . La station de base est supposée avoir quatre antennes d'émission  $N_t = 4$ . Une variance de bruit unitaire ( $\sigma_{n,k}^2 = 1$ ) et une largeur de bande unitaire ( $W = 1\text{Hz}$ ) sont prise en compte. La contrainte de puissance d'émission est  $P_t = 40$  dBm. La consommation d'énergie statique est  $P_{sta} = 30$  dBm et le rendement de l'amplificateur de puissance est  $\mu = 0.35$  [MCL18a].

Les canaux sont données par :  $h_1 = [1, 1, 1, 1]^H$  et  $h_2 = \gamma \times [1, e^{j\theta}, e^{j2\theta}, e^{j3\theta}]^H$

où :

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

Il est à noter que pour  $\gamma = 0.3$ , l'utilisateur-2 subit une perte de trajet supplémentaire de 5 dB par rapport à l'utilisateur-1.

Effet de la puissance dynamique :

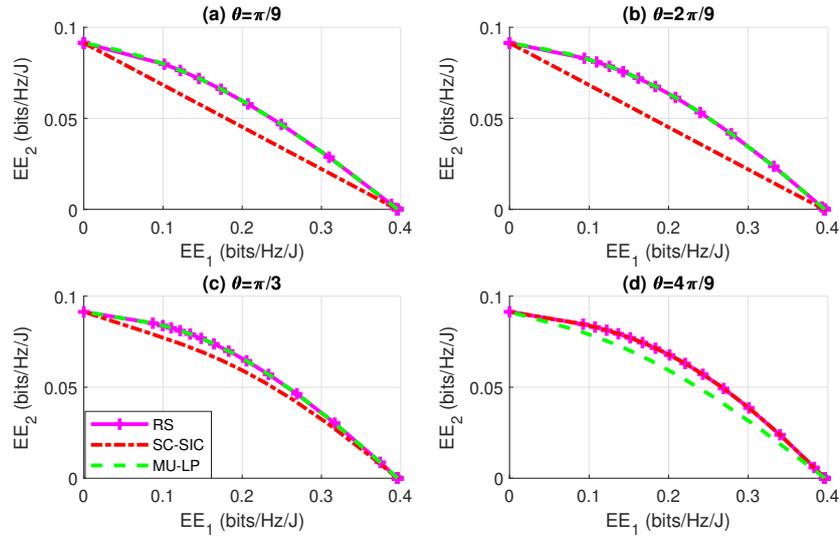


FIGURE 4.15 – Comparaison des régions d’efficacité énergétique réalisables différentes schémas,  $\gamma = 0.3$ ,  $P_{dyn} = 27\text{dBm}$ .

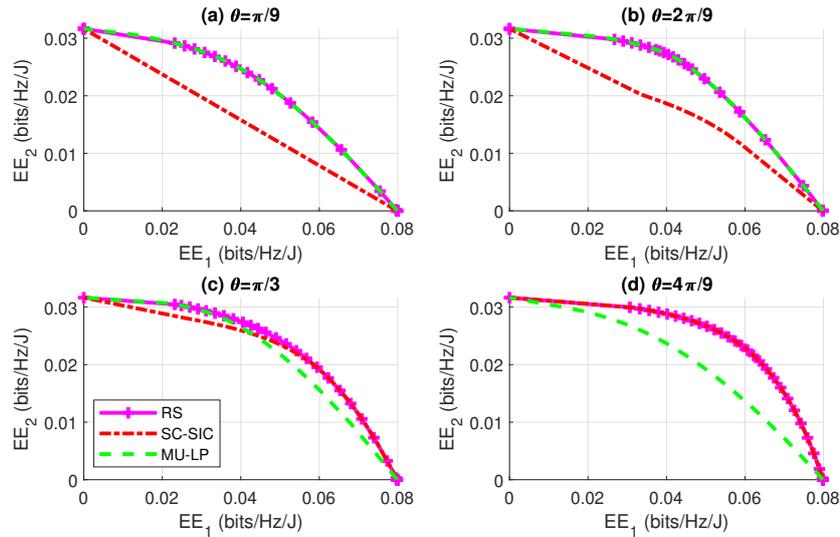


FIGURE 4.16 – Comparaison des régions d’efficacité énergétique réalisables différentes schémas,  $\gamma = 0.3$ ,  $P_{dyn} = 40\text{dBm}$ .

La figure 4.15 révèle de manière évidente que la région d’EE de RS dépasse celles de SC-SIC et MU-LP. On observe à partir des figures 4.15 et 4.16 qu’une augmentation de la puissance dynamique entraîne une réduction des régions d’EE car plus d’énergie sera nécessaire pour effectuer les transmissions. Cependant, il est possible d’améliorer cette région en éliminant les pertes de trajet supplémentaires pour l’utilisateur-2 comme montré dans la figure 4.17.

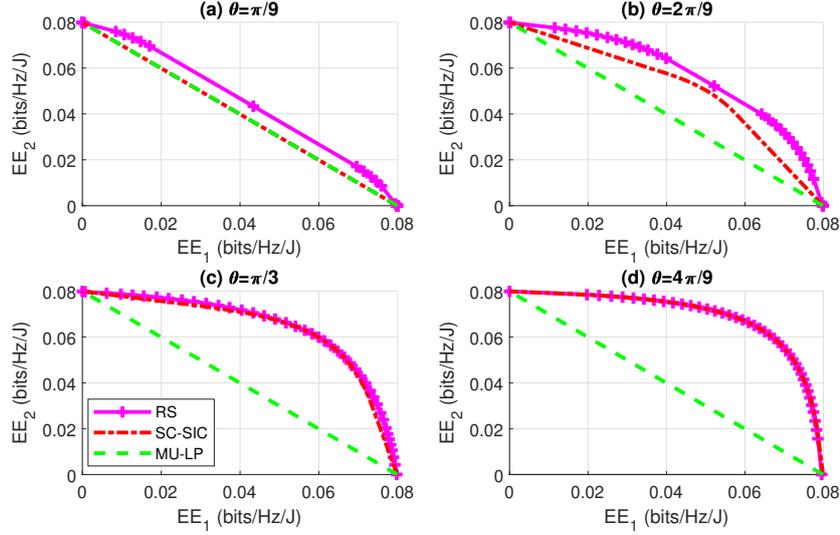


FIGURE 4.17 – Comparaison des régions d’efficacité énergétique réalisables différentes schémas,  $\gamma = 1$ ,  $P_{dyn} = 40\text{dBm}$ .

#### 4.3.4 La région de degré de liberté (DoF)

Les figures 4.18 et 4.19 présentent les résultats des gains de multiplexage total et du gain de multiplexage Max-Min Fairness (MMF) pour un système de communication avec  $M = 6$  antennes. Nous avons étudié ces gains en faisant varier le nombre d’utilisateurs  $K$  tout en considérant à la fois la qualité du CSIT (parfaite et imparfaite) et le facteur d’échelle CSIT  $\alpha = 0.5$ .

Dans la figure 4.18, les observations révèlent que les gains de multiplexage total du SC-SIC et du SC-SIC par groupe sont inférieurs à ceux du RS à une seule couche. Cette constatation suggère que le RS à une seule couche est plus efficace que NOMA.

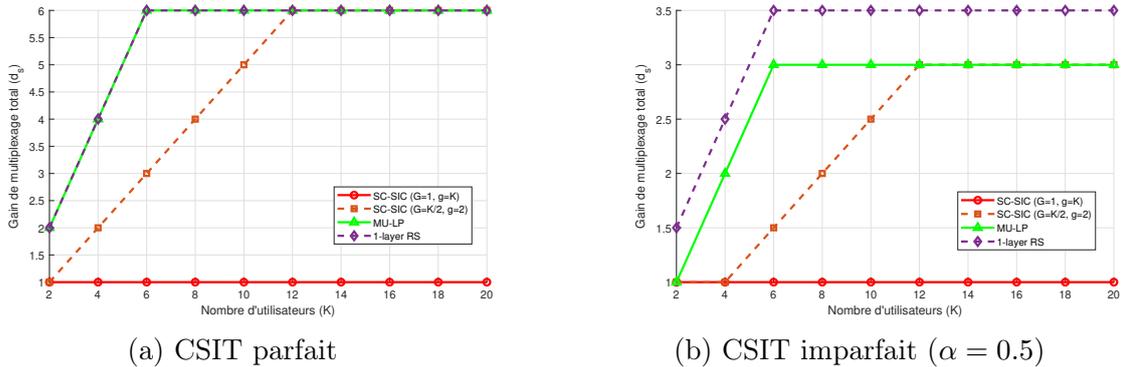


FIGURE 4.18 – Gain de multiplexage total en fonction du nombre d’utilisateurs  $K$  pour  $M = 6$ .

Les résultats de la figure 4.19 démontrent que SC-SIC avec  $K - 1$  couches de SIC est mieux adaptée que SC-SIC par groupe et MU-LP pour desservir un grand nombre d'utilisateurs lorsque  $K$  dépasse  $M$ . Pour  $K \geq 8$ , les gains de multiplexage MMF du SC-SIC par groupe et de MU-LP diminuent considérablement jusqu'à atteindre zéro, ce qui indique une difficulté à maintenir un débit minimal équitable avec l'augmentation du nombre d'utilisateurs. En revanche, SC-SIC présente un gain de multiplexage MMF toujours positif. De manière remarquable, malgré l'utilisation d'une seule couche de SIC, la technique RS à une seule couche surpasse les autres techniques en étant capable de prendre en charge un nombre plus élevé d'utilisateurs tout en maintenant une qualité de service satisfaisante.

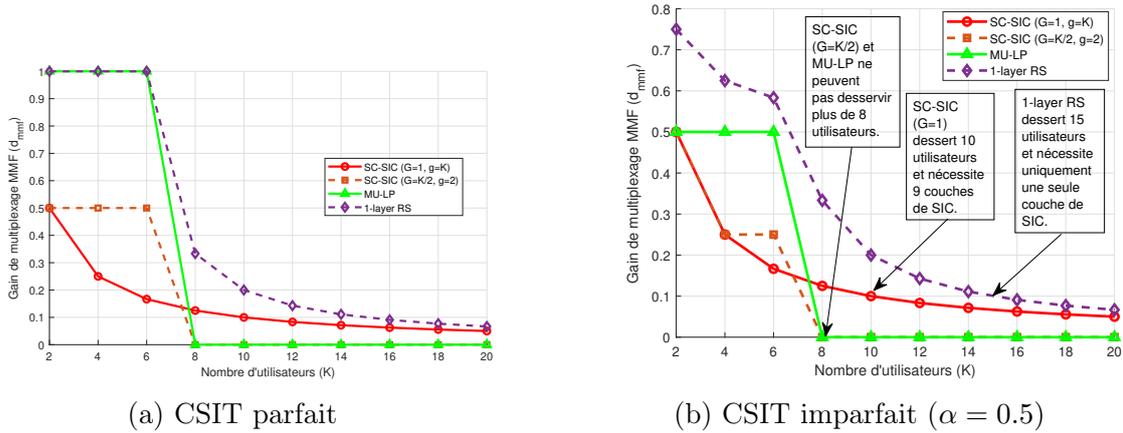


FIGURE 4.19 – Gain de multiplexage MMF en fonction du nombre d'utilisateurs  $K$  pour  $M = 6$ .

En utilisant un seuil de MMF-DoF de 0.1 pour tous les utilisateurs dans la figure 4.19b, nous constatons que la technique RS à une seule couche peut prendre en charge environ 15 utilisateurs avec une seule couche de SIC, tandis que la technique SC-SIC ne peut desservir que 10 utilisateurs au maximum avec 9 couches de SIC. De plus, la SC-SIC par groupe et MU-LP sont limités à un maximum de 8 utilisateurs. Ces résultats démontrent que RS à une seule couche est considérablement plus efficace que NOMA et SDMA.

## 4.4 Conclusion

L'observation et l'analyse des résultats obtenus nous a permis de retenir les points clés suivants :

- La diminution de la perte de trajet supplémentaire que subit la puissance du canal de l'utilisateur-2 (augmentation de  $\gamma$ ), élargie l'échelle des valeurs des débits réalisables de l'utilisateur-2. Ce qui améliore la région de débits, la somme des débits pondérés (WSR), et la région d'EE en cas d'augmentation de la puissance dynamique.
- Le rapport signal sur bruit (SNR) est le paramètre le plus influant sur la région de débits et le WSR dans tous les scénarios étudiés.
- La technique RSMA présente la meilleure résilience face à la diminution de la qualité du CSIT en comparaison avec les autres techniques.
- Le choix de la contrainte sur le débit du message multicast dans une transmission conjointe unicast et multicast est la clé pour réduire les collisions.
- La technique RS à une seule couche présente une meilleure efficacité en termes de capacité à desservir un plus grand nombre d'utilisateurs tout en maintenant un QoS satisfaisante, surpassant ainsi les techniques NOMA et SDMA.
- La technique RSMA est la plus performante dans tous les scénarios étudiés.

Ces déductions nous permettent d'affirmer que les mesures de performances d'une technique d'accès sont sensibles à plusieurs paramètres à savoir : puissance du canal, la qualité du CSIT, le SNR, le seuil du débit du message multicast et la puissance dynamique. De plus, il a été mis en évidence que l'efficacité de la technique RSMA et sa supériorité par rapport aux autres techniques n'est plus à démontrer. Ce qui signifie que RSMA est capable de maximiser les mesures de performances d'un système de communication 5G tout en exploitant efficacement ses ressources.

# 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. Avant de présenter les résultats des simulations, nous avons expliqué le principe de fonctionnement de chaque technique et souligné que SDMA et NOMA sont en réalité des sous-techniques de RSMA, car RSMA combine les deux en termes de gestion des interférences.

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 surpassé NOMA et SDMA en montrant une meilleure robustesse face au CSIT que les autres techniques. La diminution de la perte de trajet supplémentaire que subit la puissance du canal de l'utilisateur-2 (augmentation de  $\gamma$ ), élargie son échelle des valeurs des débits réalisables. Ce qui améliore la région de débits.

En ce qui concerne la mesure de la somme des débits pondérés, RSMA s'est également distinguée comme la technique la plus performante. Ses performances se réduisent avec la diminution des valeurs du SNR. Cependant, cette diminution n'est pas observée pour les valeurs de SNR inférieures à -5 dB.

La région d'efficacité énergétique réalisable augmente avec la réduction de la perte de trajet supplémentaires et diminue avec l'augmentation de la puissance dynamique.

Les résultats de la comparaison du gain de multiplexage MMF ont montré que RS avec une seule couche présente une meilleure efficacité en termes de capacité à desservir un plus grand nombre d'utilisateurs tout en maintenant un QoS satisfaisant, surpassant ainsi les autres techniques.

La diminution de rapport signal sur bruit entrain une réduction dans toutes les mesure de performance d'un système.

Les résultats de simulation vérifie que la technique RSMA est une généralisation des techniques NOMA et SDMA, et confirment sa flexibilité en matière de gestion des interférences.

Bien que ces mesures de performances sont suffisantes pour distinguer la technique la plus performante parmi les trois. Les performances de la technique RSMA dans plusieurs scénarios reste indéterminée.

Ces scénarios pourraient servir de pistes de recherche prometteuses afin d'explo-

rer pleinement la RSMA. Cela permettrait d'accroître considérablement la résilience de 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 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 systèmes de communications mobiles

Dans cette partie, nous allons présenter les quatre premières générations de technologies utilisées dans les systèmes de communication, et nous allons expliquer les raisons pour lesquelles il est devenu nécessaire de passer à une cinquième génération.

### A.1.1 La technologie de Première génération 1G

Les systèmes de communication de première génération ont été développés dans les années 1980 en utilisant la technologie AMPS (Advanced Mobile Phone System) pour des services vocaux. Cette technologie analogique modulait la fréquence et utilisait la technique FDMA (Frequency Division Multiple Access), pour offrir une capacité de canal de 30 kHz. La bande de fréquences utilisée s'étendait de 824 à 894 MHz et supportait un débit allant jusqu'à 2,4 Kbps.

En 1988, le spectre de la technologie AMPS s'est élargi avec l'ajout d'une bande de 10 MHz appelée « spectre étalé » [Gaw15].

### A.1.2 La technologie de deuxième génération 2G

Les systèmes de deuxième génération ont été introduits à la fin des années 1980. Contrairement aux systèmes de première génération, ces systèmes utilisaient des signaux numériques et employaient des techniques d'accès multiples plus avancées en plus de la FDMA, telles que TDMA (Time Division Multiple Access) et CDMA (Code Division Multiple Access) [Sha13].

la figure A.1 modélise ces trois technique d'accès :

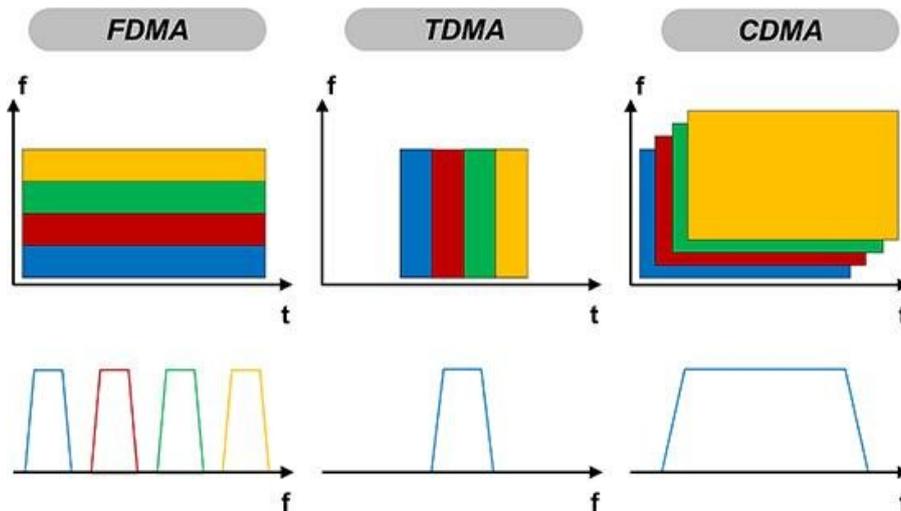


FIGURE A.1 – Techniques d'accès en GSM [Kar].

Les systèmes cellulaires de deuxième génération ont été lancés commercialement en 1991, basés sur la norme GSM (Global System for Mobile Communication). Le GSM a été conçu à partir de zéro et offre un débit de 9,6 kbps, utilisant 124 canaux par cellule [BDS17]. En plus des services de transmission de la voix, le GSM propose également des services tels que les messages courts (SMS), les messages photo et les messages multimédias (MMS) [Gaw15].

Avant l'avènement de la 3G, la 2G a connu d'autres évolutions telles que la 2.5G et la 2.75G [BDS17] :

- **GPRS (General Packet Radio System) (2,5G)** : le GPRS est utilisé par la plupart des utilisateurs de GSM. Théoriquement, il offre un débit de données de 160 kbps ainsi que des services d'internet.
- **EDGE (Enhanced Data Rate for Global Evolution) (2.75G)** : conçu pour surmonter les limites du GPRS, il pouvait fournir des débits de données allant jusqu'à 500 kbps.

### A.1.3 La technologie de Troisième génération 3G

Bien que les systèmes de communication des deux premières générations se concentrent sur la transmission de la voix, les systèmes 3G introduits en 2000 ont pour objectif principal de permettre aux utilisateurs d'accéder à Internet de n'importe où [PS04]. Les principales fonctionnalités de la technologie 3G incluent l'accès à des applications web sans fil, des services multimédias, des e-mails et des vidéoconférences.

La norme d'interface radio 3G W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access) offre un service sans fil basé sur des paquets "toujours actif", permettant aux ordinateurs, aux appareils de divertissement et aux téléphones de partager le même réseau sans fil et d'être connectés à Internet à tout moment et partout. Les systèmes 3G ont une mobilité, une vitesse et une efficacité spectrale élevée, ce qui leur permet de fournir des débits de données élevés allant jusqu'à 2 Mbps sur une largeur de

canal de porteuse de 5 MHz. Cependant, le débit de données pris en charge par les réseaux 3G dépend de l'environnement dans lequel l'appel est effectué [Hos13].

### A.1.4 La technologie de Quatrième génération 4G

Les systèmes LTE (Long-Term Evolution) ont été introduits à la fin des années 2000 en tant que réseaux entièrement basés sur le protocole IP. 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 cout, de multimédia et d'internet sur IP [Gaw15].

Les réseaux 4G LTE peuvent atteindre une bande passante de 100 MHz et envoyer des données à des débits très élevés. La 4G peut prendre en charge des débits allant de 20 à 100 Mb/s pour un utilisateur en déplacement et 1 Gbit/s pour un utilisateur fixe [AFS10].

## A.2 L'architecture générale d'un réseaux 5G

Le système 5G utilise les mêmes éléments que les générations précédentes, à savoir un UE (User Equipment) composé d'une MS (Mobile Station) et d'une USIM (Universal Subscriber Identity Module), ainsi que le réseau d'accès radio (NG-RAN : Next Generation Radio Access Network) et le réseau cœur (5GC : 5G Core Network) [Sul]. Ces éléments sont illustrés dans la figure A.2 :



FIGURE A.2 – Système de communication 5G [Sul].

Le gNB est l'entité principale du NG-RAN, où "g" signifie "5G" et "NB" signifie "NodeB", qui est un terme hérité de la 3G pour désigner l'émetteur radio. L'interface radio est nommée "NR-Uu", où "NR" (pour "New Radio") indique la 5G et "Uu" est également un terme hérité des générations précédentes. Le gNB peut être divisé en une unité centrale gNB (gNB-CU) et une ou plusieurs unités distribuées gNB (gNB-DU), reliées par l'interface F1 [Sul].

Le 5GC est représenté ici de manière schématique par l'entité AMF/UPF. La fonction de plan utilisateur (UPF) gère les données utilisateur et la fonction de gestion

d'accès et de mobilité (AMF) accède à l'UE et au réseau d'accès radio (RAN) dans le plan de signalisation. D'autres entités du 5GC sont présentées ci-dessous. Le point de référence entre les réseaux d'accès et le réseau principal appelé "NG" [Sul].

L'architecture 5GC est basée sur les services (SBA : Service Based Architecture ), où les éléments d'architecture sont définis en termes de fonctions de réseau (NF) plutôt que par des entités de réseau. L'approche SBA permet à chaque fonction de réseau (NF) de fournir ses services à toutes les autres NF autorisées, à tout utilisateur autorisé à les utiliser via des interfaces d'un cadre commun. Cette approche offre une grande modularité et une réutilisabilité des composants du réseau [Sul].

De ce fait on peut résumer les fonctions principales des réseaux 5G en ce qui suit [Sul] :

- **Les quatre entités déjà présentées, à savoir** : l'UE, le NG-RAN ou (RAN), l'UPF et l'AMF.
- **Le réseau de données externes (DN)** : principalement dans le Plan Utilisateur.
- **La Fonction d'Application (AF)** : contrôlant l'application (pouvant également être impliquée dans le Plan Utilisateur).
- **La Fonction de Gestion de Session (SMF)** : qui gère les appels et les sessions, et contacte l'UPF en conséquence.
- **La Gestion de Données Unifiée (UDM)** : fonctionnellement similaire au HSS des réseaux 3G et 4G (et au HLR des réseaux 2G).
- **La Fonction de Contrôle de Politique (PCF)** : qui contrôle que le trafic de données de l'utilisateur ne dépasse pas les capacités des porteurs négociés.
- **La Fonction de Référentiel de Réseau (NRF)** : qui contrôle les autres NFs en fournissant un service d'enregistrement, de dé-enregistrement et de mise à jour aux NF et à leurs services.
- **Les NFs liées à la sécurité** : Fonction d'Exposition de Réseau (NEF), Fonction de Serveur d'Authentification (AUSF), Fonctionnalité d'Ancre de Sécurité (SEAF), la Fonction de Sélection de Tranches de Réseau (NSSF).

La figure A.3 illustre les différentes fonctionnalités du réseau liées au plan utilisateur et au plan de signalisation :

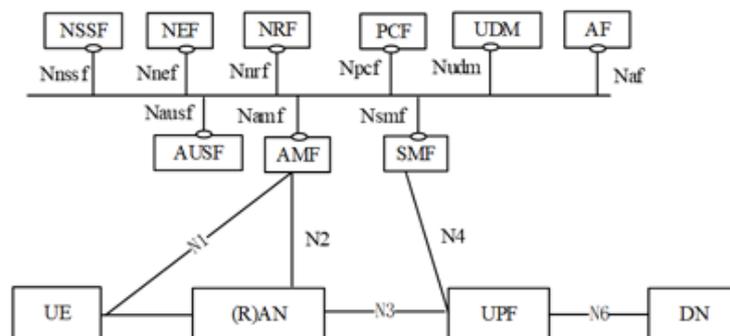


FIGURE A.3 – Architecture d'un système de communication 5G [Sul].

## A.3 Les modes de déploiement des réseaux 5G

Les réseaux 5G peuvent être déployés selon deux modèles : le modèle non-stand-alone (NSA) et le modèle stand-alone (SA). Dans le modèle NSA, l'opérateur peut utiliser les investissements existants et l'architecture LTE pour réduire les coûts d'investissement (CAPEX) et éviter une augmentation potentielle des coûts d'exploitation (OPEX) liée à un nouveau cœur de réseau. Cependant, le RAN doit être nouvellement mis en place, tandis que les opérations du réseau central sont prises en charge par l'EPC LTE existant. En revanche, dans le modèle SA, à la fois le RAN et le cœur (architecture basée sur les services, SBA) sont entièrement nouveaux et conformes aux recommandations du 3GPP, ce qui permet une séparation claire des différentes fonctions du réseau [Oro].

La figure A.4 montre la différence entre les deux modèles de déploiement :

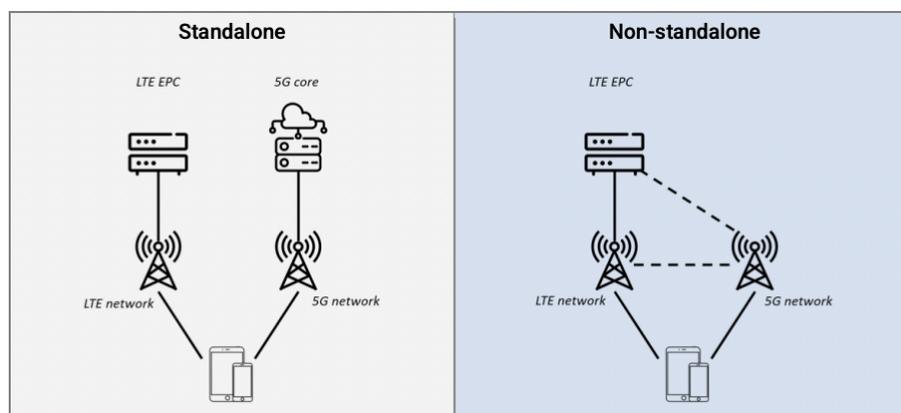


FIGURE A.4 – 5G stand-alone vs non-stand-alone [stl].

## A.4 Au-Delà de la 5G

Le monde est à l'aube d'une nouvelle révolution des communications avec l'arrivée prochaine de la 6G. Cette prochaine génération de réseaux de communication offrira une vaste gamme d'applications et de services inédits par rapport aux réseaux 4G et 5G. La 6G utilisera des bandes de fréquences beaucoup plus élevées dans les Téra hertz (300 GHz à 3 THz) que la 5G et offrira une vitesse de transmission incroyablement rapide dans la gamme téra-bit. Cette technologie nécessitera des antennes intelligentes, des téléphones portables avec une grande mémoire et d'énormes réseaux optiques [CA20].

L'avènement de la technologie 6G devrait révolutionner la façon dont nous communiquons et interagissons avec le monde qui nous entoure. L'AI (Artificial Intelligence) jouera un rôle majeur dans cette révolution, comme elle l'a fait dans la génération précédente de technologie sans fil. Les avantages de l'AI en 6G sont nombreux : elle peut améliorer la vitesse et l'efficacité des réseaux, renforcer la sécurité, améliorer l'expérience utilisateur et réduire les coûts de mise en place de ces réseaux. À mesure que la technologie 6G se développera, l'AI deviendra de plus en plus importante, et ses avantages deviendront de plus en plus évidents [AA+23].

# Annexe B

## B.1 La NOMA à antenne unique

L'avantage d'une technique NOMA à antenne unique utilisant SC-SIC est de pouvoir, malgré la présence d'une seule antenne d'émission dans un canal de diffusion unique SISO-BC (Single Input Single Output-Broadcast Channel), faire face à un régime surchargé d'une manière efficace en terme de spectre, même lorsque des utilisateurs multiples subissent des forces de canal/pertes de trajet potentiellement très différentes [MCL18c].

La limite d'une NOMA à antenne unique réside dans sa complexité lorsqu'il y a une augmentation du nombre d'utilisateurs, ce qui nécessite une augmentation du nombre de couches SIC pour chaque utilisation [MCL18c].

## B.2 La technique NOMA dans les systèmes Massive-MIMO

Dans le cadre des systèmes Massive-MIMO, l'utilisation de la technologie NOMA vise à optimiser l'efficacité spectrale et à obtenir un gain supplémentaire. La combinaison de ces deux technologies présente un potentiel significatif pour améliorer l'efficacité spectrale et fournir des services sans fil de meilleure qualité, notamment lorsque les utilisateurs faisant partie d'un groupe de multidiffusion sont situés à une distance importante de la station de base. Le principe de fonctionnement de ces systèmes repose sur l'utilisation des antennes d'émission multiples de la BS pour former différents faisceaux dans le domaine spatial, où chaque faisceau adopte la NOMA de base. Au niveau du récepteur, les interférences entre faisceaux peuvent être supprimées par filtrage spatial, puis le SIC intra-faisceau peut être utilisé pour éliminer les interférences entre utilisateurs [Dai+15, Xia+18].

Un avantage important de NOMA est l'amélioration de la capacité en appliquant un couplage d'utilisateurs, de sorte que les utilisateurs dont les conditions de canal sont mauvaises obtiennent une plus grande puissance d'émission. Cependant, cela peut créer des interférences intercellulaires (ICI) dans le système MIMO. Il est donc important de mettre en œuvre une méthode d'espace nul, assistée par l'annulation des interférences dans le schéma NOMA afin d'obtenir l'orthogonalité du canal entre les utilisateurs de multidiffusion et les utilisateurs de diffusion unique [Xia+18].

Le récepteur SIC décode les signaux d'information un par un de manière itérative pour obtenir le signal désiré. Après le décodage du signal, il faut régénérer la forme d'onde d'origine afin de la soustraire du signal reçu. Bien qu'il soit théoriquement possible d'effectuer ce processus sans aucune erreur, dans la pratique, on s'attend à ce qu'il y ait une certaine erreur d'annulation [KB16].

### B.3 Le Dirty Paper Coding (DPC)

Des études en théorie de l'information ont prouvé que le codage dirty paper (DPC) atteint la région de capacité du MIMO et MISO BC. Avec le DPC, les interférences multi-utilisateurs connues de manière non causale à l'émetteur peuvent être éliminées parfaitement sans perte d'information. Cependant, il est complexe et nécessite des ressources computationnelles élevées. C'est pourquoi le pré-codage linéaire est souvent considéré comme une alternative attrayante, car il permet de simplifier la conception de l'émetteur tout en offrant des performances acceptables [Tra+13, MCL18c].

### B.4 L'allocation des ressources sous la technique RSMA

La transmission multiporteuse est devenue l'un des schémas principaux utilisés dans les systèmes de communication sans fil à large bande tels que la 4G, la 5G et au-delà. L'allocation des ressources multiporteuses est un aspect crucial des systèmes RSMA multiporteuses (MC-RSMA). Dans cet article [Li+20], un algorithme d'allocation des ressources a été proposé pour ces systèmes.

Cet algorithme peut être décrit en trois étapes principales [Li+20] :

- **Étape 1** : Tout d'abord, on suppose que la puissance d'émission du système est répartie uniformément sur les différentes sous-porteuses. Ensuite, le schéma d'allocation de puissance pour chaque message sur une seule sous-porteuse est déterminé.
- **Étape 2** : Les sous-porteuses sont attribuées aux utilisateurs en fonction de la solution d'allocation de puissance obtenue à l'étape 1. Le problème de correspondance entre les utilisateurs et les sous-porteuses peut être transformé en un problème d'assignation. Pour résoudre ce problème, l'algorithme hongrois est utilisé avec une contrainte de puissance fixe.
- **Étape 3** : Les coefficients de répartition de puissance entre les différentes sous-porteuses sont calculés afin d'optimiser le débit total. L'allocation finale de puissance pour chaque utilisateur est ensuite mise à jour.

## B.5 L'exemple de RSMA à deux utilisateurs

Pour transmettre les messages  $W_1$  et  $W_2$  à leurs destinataires respectifs, les utilisateurs 1 et 2, un schéma de codage et de transmission est utilisé. Ce schéma est basé sur les étapes suivantes [MCL18c] :

- Les messages sont divisés en deux parties :  $\{W_1^{12}, W_1^1\}$  pour l'utilisateur 1 et  $\{W_2^{12}, W_2^2\}$  pour l'utilisateur 2.
- Les parties  $W_1^{12}$  et  $W_2^{12}$  sont combinées et codées ensemble dans un flux commun  $s_{12}$  à l'aide d'un livre de codes partagé par les deux utilisateurs.
- Les parties restantes des messages,  $W_1^1$  et  $W_2^2$ , sont encodées séparément dans les flux privés  $s_1$  pour l'utilisateur 1 et  $s_2$  pour l'utilisateur 2.
- En utilisant la méthode RS, le flux global de données à transmettre est représenté par le vecteur  $s = [s_{12}, s_1, s_2]^T$ . Ce vecteur contient le flux commun  $s_{12}$  ainsi que les flux privés  $s_1$  et  $s_2$  pour chaque utilisateur, permettant ainsi la transmission simultanée des messages aux destinataires appropriés.

Une fois que les flux de données ont été divisés et codés, ils sont ensuite soumis à une étape de précodage linéaire. Cette opération est réalisée à l'aide du précodeur  $\mathbf{P} = [\mathbf{p}_{12}, \mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2]$ , où  $\mathbf{p}_{12} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$  représente le précodeur appliqué au flux commun  $s_{12}$ . Le signal émis résultant de cette opération est donné par  $\mathbf{x} = \mathbf{P}\mathbf{s} = \mathbf{p}_{12}s_{12} + \mathbf{p}_1s_1 + \mathbf{p}_2s_2$  [MCL18c].

Il est supposé que la matrice de covariance du signal  $\mathbf{s}\mathbf{s}^H$  est tracée en tant qu'identité, c'est-à-dire  $\text{tr}(\mathbf{s}\mathbf{s}^H) = I$ . La trace d'une matrice correspond à la somme des éléments de sa diagonale principale. En imposant que cette trace soit égale à l'identité, on s'assure que la puissance des différents composants du signal est équilibrée. De plus, la puissance totale d'émission est contrainte par  $\text{tr}(\mathbf{P}\mathbf{P}^H) \leq P_t$ . Cette limitation assure un contrôle de la puissance globale du signal transmis dans le système, En respectant cette contrainte, on évite une surcharge du canal de transmission et en maintenant une qualité de communication satisfaisante [MCL18c].

Au niveau des utilisateurs, à la fois l'utilisateur 1 et l'utilisateur 2 décodent d'abord le flux de données  $s_{12}$  en considérant les interférences provenant de  $s_1$  et  $s_2$  comme du bruit. Par conséquent, chaque utilisateur décode une partie du message de l'autre utilisateur interférant encodé dans  $s_{12}$ . L'interférence est partiellement décodée par chaque utilisateur [MCL18c].

Le SINR du flux commun pour l'utilisateur- $k$  est [MCL18c] :

$$\gamma_k^{12} = \frac{|\mathbf{h}_k^H \mathbf{p}_{12}|^2}{|\mathbf{h}_k^H \mathbf{p}_1|^2 + |\mathbf{h}_k^H \mathbf{p}_2|^2 + 1} \quad (\text{B.1})$$

Une fois que  $s_{12}$  est décodé avec succès, sa contribution au signal reçu initial  $y_k$  est soustraite. Ensuite, l'utilisateur- $k$  décode son flux privé  $s_k$  en traitant le flux privé de l'utilisateur- $j$  ( $j \neq k$ ) comme du bruit [MCL18c].

Le SINR du décodage du flux privé  $s_k$  pour l'utilisateur- $k$  est [MCL18c] :

$$\gamma_k = \frac{|\mathbf{h}_k^H \mathbf{p}_k|^2}{|\mathbf{h}_k^H \mathbf{p}_j|^2 + 1} \quad (\text{B.2})$$

Les débits réalisables correspondants pour l'utilisateur- $k$ , pour les flux  $s_{12}$  et  $s_k$ , sont  $R_k^{12} = \log_2(1 + \gamma_k^{12})$  et  $R_k = \log_2(1 + \gamma_k)$ . Pour garantir que  $s_{12}$  est décodé avec succès par les deux utilisateurs, le débit commun réalisable ne doit pas dépasser  $R_{12} = \min\{R_1^{12}, R_2^{12}\}$ . Tous les points limites de la région de débit RS à deux utilisateurs peuvent être obtenus en supposant que  $R_{12}$  est partagé entre les utilisateurs de telle sorte que  $C_k^{12}$  soit la portion du débit commun du  $k$ ème utilisateur, avec  $C_1^{12} + C_2^{12} = R_{12}$ . En suivant la structure RS à deux utilisateurs décrite ci-dessus, le débit total réalisable pour l'utilisateur- $k$  est  $R_{k,\text{tot}} = C_k^{12} + R_k$ . Pour une paire de poids donnée  $\mathbf{u} = [u_1, u_2]$ , le WSR atteint par l'approche RS à deux utilisateurs est [MCL18c] :

$$R_{RS_2}(\mathbf{u}) = \max_{\mathbf{P}, \mathbf{c}} u_1 R_{1,\text{tot}} + u_2 R_{2,\text{tot}} \quad (\text{B.3})$$

avec :

- $C_1^{12} + C_2^{12} \leq R_{12}$ .
- $\text{tr}(\mathbf{P}\mathbf{P}^H) \leq P_t$
- $R_{k,\text{tot}} \geq R_k^{\text{th}}, k \in \{1, 2\}$
- $\mathbf{c} \geq 0$

où :

- $\mathbf{c} = [C_1^{12}, C_2^{12}]$  est le vecteur de débit commun doit être optimisé afin de maximiser le WSR.

Contrairement aux approches MU-LP et SC-SIC, le schéma RS décrit ci-dessus offre une formulation plus flexible. En particulier, au lieu de basculer de manière rigide entre MU-LP et SC-SIC, il permet à ces deux méthodes de fonctionner simultanément si nécessaire, ce qui assure une transition en douceur entre les deux. Dans l'extrême où l'interférence multi-utilisateur est traitée comme du bruit, le schéma RS se réduit à MU-LP en n'allouant aucune puissance au flux commun  $s_{12}$ . Dans l'autre extrême où l'interférence est entièrement décodée, le schéma RS se réduit à SC-SIC en obligeant un utilisateur, disons l'utilisateur-1, à décoder intégralement le message de l'autre utilisateur, disons l'utilisateur-2. Cela est réalisé en n'allouant aucune puissance à  $s_2$ , en encodant  $W_1$  dans  $s_1$  et en encodant  $W_2$  dans  $s_{12}$ , de telle manière que  $\mathbf{x} = \mathbf{p}_{12}s_{12} + \mathbf{p}_1s_1$ . L'utilisateur-1 et l'utilisateur-2 décodent  $s_{12}$  en considérant  $s_1$  comme du bruit, et l'utilisateur-1 décode  $s_1$  après avoir annulé  $s_{12}$ . Une stratégie de multidiffusion au niveau de la couche physique est obtenue en encodant à la fois  $W_1$  et  $W_2$  dans  $s_{12}$  et en n'allouant aucune puissance à  $s_1$  et  $s_2$  [MCL18c].

## B.6 L'exemple de RSMA à trois utilisateurs

Nous considérons un exemple à trois utilisateurs. Contrairement au cas à deux utilisateurs, le message de l'utilisateur 1 est divisé en  $\{W_1^{123}, W_1^{12}, W_1^{13}, W_1^1\}$ . De même, le message de l'utilisateur 2 et de l'utilisateur 3 est divisé en  $\{W_2^{123}, W_2^{12}, W_2^{13}, W_2^2\}$  et  $\{W_3^{123}, W_3^{12}, W_3^{13}, W_3^3\}$  respectivement. L'exposant représente un groupe spécifique d'utilisateurs dont les messages avec le même exposant seront encodés ensemble [MCL18c].

Dans cet exemple, les messages suivants sont encodés dans les flux de données correspondants [MCL18c] :

- Les messages  $W_1^{123}$ ,  $W_2^{123}$  et  $W_3^{123}$  sont encodés dans le flux commun  $s_{123}$  destiné aux trois utilisateurs.
- Les messages  $W_1^{12}$  et  $W_1^{13}$  sont encodés avec les messages de découpage (split) de l'utilisateur 2 ( $W_2^{12}$ ) et de l'utilisateur 3 ( $W_3^{13}$ ) respectivement, dans les flux de données  $s_{12}$  et  $s_{13}$ .
- Le flux  $s_{12}$  est le flux commun partiel destiné à l'utilisateur 1 et à l'utilisateur 2. Par conséquent, l'utilisateur 1 et l'utilisateur 2 décodent le flux  $s_{12}$ , tandis que l'utilisateur 3 considérera ce flux comme du bruit et décodera ses flux prévus séparément.
- De manière similaire, le flux partiellement encodé  $s_{23}$  est obtenu pour l'utilisateur 2 et l'utilisateur 3.
- Les messages  $W_1^1$ ,  $W_2^2$  et  $W_3^3$  sont encodés dans les flux privés  $s_1$ ,  $s_2$  et  $s_3$  respectivement.

Le vecteur des flux de données à transmettre est  $\mathbf{s} = [s_{123}, s_{12}, s_{13}, s_{23}, s_1, s_2, s_3]^T$ . Après la précodage linéaire à l'aide du précodeur  $\mathbf{P} = [\mathbf{p}_{123}, \mathbf{p}_{12}, \mathbf{p}_{13}, \mathbf{p}_{23}, \mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3]$ , les signaux sont superposés et diffusés. La procédure de décodage lorsque  $K = 3$  est plus complexe par rapport à celle de l'exemple à deux utilisateurs. La principale différence réside dans le décodage des flux communs partiels pour deux utilisateurs [MCL18c].

On définit les flux à décodé par  $l$  utilisateurs comme des flux d'ordre  $l$  [MCL18c] :

- Les flux d'ordre 2 à décodé par l'utilisateur 1 sont  $s_{12}$  et  $s_{13}$ .
- Les flux d'ordre 2 à décodé par l'utilisateur 2 et l'utilisateur 3 sont  $s_{12}$  et  $s_{23}$ , et  $s_{13}$  et  $s_{23}$  respectivement.

Comme les flux d'ordre 1 et 2 à décodé par les différents utilisateurs ne sont pas les mêmes, nous prenons l'utilisateur 1 comme exemple. La procédure de décodage est la même pour les autres utilisateurs [MCL18c] :

- L'utilisateur 1 décode les quatre flux  $s_{123}$ ,  $s_{12}$ ,  $s_{13}$  et  $s_1$  en utilisant SIC, tout en considérant les autres flux comme du bruit.
- La procédure de décodage commence par le flux d'ordre 3 (flux commun) et progresse vers le bas jusqu'au flux d'ordre 1 (flux privé). Plus précisément, l'utilisateur 1 décode d'abord  $s_{123}$  et soustrait sa contribution du signal reçu.

Le SINR du flux  $s_{123}$  pour l'utilisateur 1 est [MCL18c] :

$$\gamma_k^{123} = \frac{|\mathbf{h}_1^H \mathbf{p}_{123}|^2}{\sum_{i \in \{12,13,23\}} |\mathbf{h}_1^H \mathbf{p}_i|^2 + \sum_{k=1}^3 |\mathbf{h}_1^H \mathbf{p}_k|^2 + 1} \quad (\text{B.4})$$

Après cela, l'utilisateur 1 procède au décodage de deux flux,  $s_{12}$  et  $s_{13}$ , et traite l'interférence provenant du flux  $s_{23}$  comme étant du bruit. Dans le but de maximiser le WSR, il est nécessaire de prendre en compte différents ordres de décodage [MCL18c] :

- Pour décodé le flux de l'ordre 1, il existe un seul ordre de décodage, noté  $\pi_1$ .
- De même, il existe un seul ordre de décodage, noté  $\pi_3$ , pour décodé le flux de l'ordre 3.

- En revanche, chaque utilisateur doit décoder deux flux de l'ordre 2.
- Pour l'ordre de décodage  $\pi_2$ , une instance spécifique est  $12 \rightarrow 13 \rightarrow 23$ , où le flux  $s_{12}$  est décodé avant le flux  $s_{13}$ , qui est lui-même décodé avant le flux  $s_{23}$ , pour tous les utilisateurs.
- Chez l'utilisateur 1, les flux  $s_{12}$  et  $s_{13}$  sont décodés dans l'ordre spécifié par  $\pi_{2,1} = 12 \rightarrow 13$ .
- Ainsi, le flux de données  $s_{\pi_{2,1}(1)}$  correspond à  $s_{12}$  et le flux  $s_{\pi_{2,1}(2)}$  correspond à  $s_{13}$ .
- Chez l'utilisateur 1, le décodage du flux  $s_{\pi_{2,1}(1)}$  est réalisé avant le décodage du flux  $s_{\pi_{2,1}(2)}$ .

Les SINR des flux de décodage  $s_{\pi_{2,1}(1)}$  et  $s_{\pi_{2,1}(2)}$  chez l'utilisateur 1 sont [MCL18c] :

$$\gamma_1^{\pi_{2,1}(1)} = \frac{|\mathbf{h}_1^H \mathbf{p}_{\pi_{2,1}(1)}|^2}{|\mathbf{h}_1^H \mathbf{p}_{\pi_{2,1}(2)}|^2 + |\mathbf{h}_1^H \mathbf{p}_{23}|^2 + \sum_{k=1}^3 |\mathbf{h}_1^H \mathbf{p}_k|^2 + 1} \quad (\text{B.5})$$

$$\gamma_1^{\pi_{2,1}(2)} = \frac{|\mathbf{h}_1^H \mathbf{p}_{\pi_{2,1}(2)}|^2}{|\mathbf{h}_1^H \mathbf{p}_{23}|^2 + \sum_{k=1}^3 |\mathbf{h}_1^H \mathbf{p}_k|^2 + 1} \quad (\text{B.6})$$

L'utilisateur 1 décode finalement  $s_1$  en considérant les autres flux de données comme du bruit. Le modèle de transmission RS à trois utilisateurs avec l'ordre de décodage  $\pi_2 = 12 \rightarrow 13 \rightarrow 23$  est illustré dans la Figure 2.8. Le SINR du décodage de  $s_1$  chez l'utilisateur 1 est de [MCL18c] :

$$\gamma_1 = \frac{|\mathbf{h}_1^H \mathbf{p}_1|^2}{|\mathbf{h}_1^H \mathbf{p}_{23}|^2 + \sum_{k=2}^3 |\mathbf{h}_1^H \mathbf{p}_k|^2 + 1} \quad (\text{B.7})$$

Le débit correspondant de chaque flux de données est calculé de la même manière que dans l'exemple à deux utilisateurs. Voici les principaux points à retenir [MCL18c] :

- Pour garantir que  $s_{123}$  est décodé avec succès par tous les utilisateurs, le débit commun atteignable ne doit pas dépasser  $R_{123} = \min\{R_1^{123}, R_2^{123}, R_3^{123}\}$ .
- Pour garantir que  $s_{12}$  est décodé avec succès par l'utilisateur 1 et l'utilisateur 2, le débit commun atteignable ne doit pas dépasser  $R_{12} = \min\{R_1^{12}, R_2^{12}\}$ .
- De même, nous avons  $R_{13} = \min\{R_1^{13}, R_3^{13}\}$  et  $R_{23} = \min\{R_2^{23}, R_3^{23}\}$ .

Tous les points limites de la région de débit RS à trois utilisateurs peuvent être obtenus en supposant que  $R_{123}$ ,  $R_{12}$ ,  $R_{13}$  et  $R_{23}$  sont partagés par le groupe correspondant d'utilisateurs. On désigne la part du débit commun allouée à l'utilisateur- $k$  pour le message  $s_{123}$  par  $C_k^{123}$  [MCL18c] :

- $C_1^{123} + C_2^{123} + C_3^{123} = R_{123}$ .
- $C_1^{12} + C_2^{12} = R_{12}$ .
- $C_1^{13} + C_3^{13} = R_{13}$ .
- $C_2^{23} + C_3^{23} = R_{23}$ .

En suivant la structure RS à trois utilisateurs décrite ci-dessus, le débit total atteignable de chaque utilisateur est [MCL18c] :

- $R_{1,\text{tot}} = C_1^{123} + C_1^{12} + C_1^{13} + R_1.$
- $R_{2,\text{tot}} = C_2^{123} + C_2^{12} + C_2^{23} + R_2.$
- $R_{3,\text{tot}} = C_3^{123} + C_3^{13} + C_3^{23} + R_3.$

Pour un vecteur de poids donné  $\mathbf{u} = [u_1, u_2, u_3]$  et un ordre de décodage fixe  $\pi = [\pi_1, \pi_2, \pi_3]$ , le WSR obtenu par l'approche RS à trois utilisateurs est [MCL18c] :

$$R_{\text{RS}_3}(\mathbf{u}, \pi) = \max_{\mathbf{P}, \mathbf{c}} \sum_{k=1}^3 u_k R_{k,\text{tot}} \quad (\text{B.8})$$

avec :

- $C_1^{123} + C_2^{123} + C_3^{123} \leq R_{123}$
- $C_1^{12} + C_2^{12} \leq R_{12}$
- $C_1^{13} + C_3^{13} \leq R_{13}$
- $C_2^{23} + C_3^{23} \leq R_{23}$
- $\text{tr}(\mathbf{P}\mathbf{P}^H) \leq P_t$
- $R_{k,\text{tot}} \geq R_k^{\text{th}}, k \in \{1, 2, 3\}$
- $\mathbf{c} \geq 0$

où :

- $\mathbf{c} = [C_1^{123}, C_2^{123}, C_3^{123}, C_1^{12}, C_2^{12}, C_1^{13}, C_3^{13}, C_2^{23}, C_3^{23}]$  est le vecteur de débit commun qui doit être optimisé afin de maximiser le WSR.

De la même manière que dans le cas à deux utilisateurs, les stratégies SC-SIC et MULLP peuvent également être facilement identifiées comme des sous-stratégies spéciales de RS en désactivant certains flux de données [MCL18c].

## B.7 Les principaux avantages du RSMA [Mao+22, Cle+23]

- **Universalité** : RSMA est une approche d'accès multiple universelle qui intègre les schémas SDMA et NOMA comme sous-schémas. En regroupant ces différentes techniques, RSMA offre des performances équivalentes, voire supérieures, par rapport aux schémas d'accès multiple existants. Ainsi, plutôt que d'étudier séparément chaque schéma, il est préférable d'adopter l'approche unifiée de RSMA pour bénéficier de ses avantages.
- **Flexibilité** : RSMA est caractérisé par sa capacité à s'adapter à diverses charges de réseau et déploiements d'utilisateurs. Contrairement à d'autres techniques d'accès multiple telles que SDMA et NOMA, RSMA utilise des flux communs pour combiner intelligemment l'atténuation des interférences à la fois du côté émetteur et récepteur. En ajustant la quantité de ressources allouées aux flux communs, RSMA peut ajuster de manière flexible le niveau d'annulation des interférences. De plus, RSMA met en œuvre une stratégie de gestion des interférences souple en décodant partiellement les interférences et en les traitant partiellement comme du bruit. Selon les conditions du réseau, RSMA peut se simplifier en SDMA lorsque le réseau est sous-chargé et se réduire à NOMA lorsque le réseau est surchargé. Pour des conditions de canal complexes, RSMA exploite efficacement les flux communs pour gérer

les interférences et surpasse les autres schémas d'accès multiple.

- **Robustesse** : RSMA est robuste face à toute imprécision de la CSIT. Cela est très pertinent dans les déploiements modernes de réseaux multi-antennes en liaison descendante. Alors que NOMA et le SDMA subissent tous une perte de DoF en présence d'une CSIT imparfaite, RSMA est optimal en termes de DoF et, par conséquent, moins sensible aux imprécisions de la CSIT.
- **Efficacité spectrale** : RSMA offre une meilleure efficacité spectrale que les autres techniques d'accès multiple existantes en liaison descendante. Même en présence d'une connaissance imparfaite de l'état du canal (CSIT), RSMA avec précodage linéaire parvient à obtenir une région de débit plus grande que le DPC complexe, SDMA et NOMA. RSMA optimise l'utilisation des dimensions spatiales et de la CSIT, garantissant ainsi un débit optimal dans toutes les conditions CSIT. En liaison montante, RSMA surpasse NOMA sans nécessiter de partage temporel.
- **Efficacité énergétique** : L'efficacité énergétique de RSMA est supérieure ou égale à celle des techniques d'accès multiple SDMA et NOMA dans de nombreux déploiements d'utilisateurs, grâce à sa flexibilité et son universalité.
- **Amélioration de la QoS et de l'équité** : RSMA offre un avantage significatif par rapport à SDMA et NOMA lorsque les utilisateurs sont soumis à une contrainte de débit QoS ou lorsque des poids plus élevés sont attribués aux utilisateurs ayant des conditions de canal plus faibles. Cette capacité à décoder partiellement les interférences et à les traiter comme du bruit améliore la qualité de service (QoS) et favorise une plus grande équité entre les utilisateurs dans les architectures de réseaux sans fil.
- **Réduction de la complexité** : RSMA présente des améliorations de performances et une réduction de la complexité par rapport à NOMA. Contrairement à NOMA, RSMA simplifie le processus d'émission en éliminant le regroupement, l'ordonnancement et la commutation des utilisateurs. Au niveau des récepteurs, RSMA utilise une seule couche de SIC, ce qui réduit la complexité par rapport aux multiples couches de SIC de NOMA. De plus, RSMA convient à toutes les conditions de canal sans nécessiter une association complexe des utilisateurs comme dans SDMA. Il permet également de réduire la surcharge de rétroaction des informations de canal (CSI) grâce à l'utilisation de la rétroaction quantifiée. Cependant, il est important de noter que RSMA a une complexité de récepteur plus élevée que SDMA en raison de l'utilisation de la SIC.

# Bibliographie

- [Ali+20] Zuhura J ALI et al. « Novel resource allocation techniques for downlink non-orthogonal multiple access systems ». In : *Applied Sciences* 10.17 (2020), p. 5892.
- [Alo21] Mariem ALOUCH MAHDI. « Gestion intelligente des ressources radios dans les réseaux véhiculaires de la 4G vers la 5G ». Thèse de doctorat. Université Paris-Saclay, 2021.
- [AA+23] Abdullah M AL-ANSI, Ahmed AL-ANSI et al. « An Overview of Artificial Intelligence (AI) in 6G : Types, Advantages, Challenges and Recent Applications ». In : *Buletin Ilmiah Sarjana Teknik Elektro* 5.1 (2023), p. 67-75.
- [AFS10] M Junaid ARSHAD, Amjad FAROOQ et Abad SHAH. « Evolution and development towards 4th generation (4G) mobile communication systems ». In : *Journal of American Science* 6.12 (2010), p. 63-68.
- [Ate+18] Abdelhamied A ATEYA et al. « Study of 5G services standardization : specifications and requirements ». In : *2018 10th international congress on ultra modern telecommunications and control systems and workshops (ICUMT)*. IEEE. 2018, p. 1-6.
- [Att+22] Hani ATTAR et al. « 5G System Overview for Ongoing Smart Applications : Structure, Requirements, and Specifications ». In : *Computational Intelligence and Neuroscience 2022* (2022).
- [BDS17] Nikhil BHANDARI, Shivinder DEVRA et Karamdeep SINGH. « Evolution of cellular network : from 1G to 5G ». In : *International journal of engineering and techniques* 3.5 (2017), p. 98-105.
- [Car78] Aydano CARLEIAL. « Interference channels ». In : *IEEE Transactions on Information Theory* 24.1 (1978), p. 60-70.
- [Cha+12] Mohamad Awad CHARAFEDDINE et al. « Achievable and crystallized rate regions of the interference channel with interference as noise ». In : *IEEE Transactions on Wireless Communications* 11.3 (2012), p. 1100-1111.
- [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+16] Bruno CLERCKX et al. « Rate splitting for MIMO wireless networks : A promising PHY-layer strategy for LTE evolution ». In : *IEEE Communications Magazine* 54.5 (2016), p. 98-105.
- [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.
- [Cle+23] Bruno CLERCKX et al. « A primer on rate-splitting multiple access : Tutorial, myths, and frequently asked questions ». In : *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* (2023).
- [Dai+15] Linglong DAI et al. « Non-orthogonal multiple access for 5G : solutions, challenges, opportunities, and future research trends ». In : *IEEE Communications Magazine* 53.9 (2015), p. 74-81.
- [Dai+18] Linglong DAI 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.
- [DSR21] 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.
- [AA17] Naser AL-FALAHY et Omar Y ALANI. « Technologies for 5G networks : Challenges and opportunities ». In : *It Professional* 19.1 (2017), p. 12-20.
- [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.
- [HK81] Te HAN et Kingo KOBAYASHI. « A new achievable rate region for the interference channel ». In : *IEEE transactions on information theory* 27.1 (1981), p. 49-60.
- [HF17] Noha HASSAN et Xavier FERNANDO. « Massive MIMO wireless networks : An overview ». In : *Electronics* 6.3 (2017), p. 63.
- [Hos13] Saddam HOSSAIN. « 5G wireless communication systems ». In : *American Journal of Engineering Research (AJER)* 2.10 (2013), p. 344-353.
- [KB16] Refik Caglar KIZILIRMAK et Hossein Khaleghi BIZAKI. « Non-orthogonal multiple access (NOMA) for 5G networks ». In : *Towards 5G Wireless Networks-A Physical Layer Perspective* 83 (2016), p. 83-98.
- [Li+20] Lihua LI et al. « Resource allocation for multicarrier rate-splitting multiple access system ». In : *IEEE Access* 8 (2020), p. 174222-174232.
- [Li+23] Yang LI et al. « Artificial Intelligence Augmentation for Channel State Information in 5G and 6G ». In : *IEEE Wireless Communications* 30.1 (2023), p. 104-110.

- [LL21] Xingqin LIN et Namyoon LEE. « Introduction to 5G and Beyond ». In : *5G and Beyond : Fundamentals and Standards* (2021), p. 1-25.
- [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.
- [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 for multi-antenna non-orthogonal unicast and multicast transmission ». In : *2018 IEEE 19th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*. IEEE. 2018, p. 1-5.
- [MCL18c] 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.
- [Mao+22] Yijie MAO et al. « Rate-splitting multiple access : Fundamentals, survey, and future research trends ». In : *IEEE Communications Surveys & Tutorials* (2022).
- [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.
- [OMN20] Eoin O’CONNELL, Denis MOORE et Thomas NEWE. « Challenges associated with implementing 5G in manufacturing ». In : *Telecom. T.* 1. 1. MDPI. 2020, p. 5.
- [PS04] Vasco PEREIRA et Tiago SOUSA. « Evolution of Mobile Communications : from 1G to 4G ». In : *Department of Informatics Engineering of the University of Coimbra, Portugal* 4 (2004), p. 20-.
- [RU96] Bixio RIMOLDI et Rüdiger URBANKE. « A rate-splitting approach to the Gaussian multiple-access channel ». In : *IEEE Transactions on Information Theory* 42.2 (1996), p. 364-375.
- [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. 47-53.
- [Shu21] Aasheesh SHUKLA. « Optimal multiple access scheme for 5G and beyond communication network ». In : *Information and Communication Technology for Intelligent Systems : Proceedings of ICTIS 2020, Volume 1*. Springer. 2021, p. 45-54.

- [Tra+13] Le-Nam TRAN et al. « Beamformer designs for MISO broadcast channels with zero-forcing dirty paper coding ». In : *IEEE transactions on wireless communications* 12.3 (2013), p. 1173-1185.
- [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.
- [VVH03] Harish VISWANATHAN, Sivarama VENKATESAN et Howard HUANG. « Downlink capacity evaluation of cellular networks with known-interference cancellation ». In : *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 21.5 (2003), p. 802-811.
- [Won+17] Vincent WS WONG et al. *Key technologies for 5G wireless systems*. Cambridge university press, 2017.
- [XZS16] Wei XIANG, Kan ZHENG et Xuemin Sherman SHEN. *5G mobile communications*. Springer, 2016.
- [Xia+18] Ke XIAO et al. « Opportunistic NOMA-based massive MIMO precoding for 5G new radio ». In : *Wireless Communications and Mobile Computing* 2018 (2018).
- [You+21] Xiaohu YOU et al. « Towards 6G wireless communication networks : Vision, enabling technologies, and new paradigm shifts ». In : *Science China Information Sciences* 64 (2021), p. 1-74.

# Webographie

- [Adm] Home Network ADMIN. *Multicast Rate*. URL : <https://homenetworkadmin.com/multicast-rate/>.
- [Bir] University of BIRMINGHAM. *Overview of the MATLAB Environment*. URL : <https://intranet.birmingham.ac.uk/collaboration/hpc-research/matlab/about/index.aspx> (visité le 17/06/2023).
- [Com23] Essentra COMPONENTS. *5G Base Stations and the Challenge of Thermal Management*. 2023. URL : <https://www.essentracomponents.com/en-gb/news/industries/telecoms-data/5g-base-stations-and-the-challenge-of-thermal-management> (visité le 28/04/2023).
- [Cor21] Wavestone 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 28/04/2023).
- [gad19] GADGET-INFO.COM. *Différence entre monodiffusion et multidiffusion*. 2019. URL : <https://fr.gadget-info.com/difference-between-unicast> (visité le 09/06/2023).
- [Hua20] HUAWEI. *The Wonders of 5G Beamforming*. 2020. URL : <https://blog.huawei.com/2020/08/17/the-wonders-of-5g-beamforming/> (visité le 28/04/2023).
- [IEE23] IEEE SPECTRUM. *5G Bytes : Full Duplex Explained*. 2023. URL : <https://spectrum.ieee.org/5g-bytes-full-duplex-explained> (visité le 28/04/2023).
- [Kar] M. Ali KARABULUT. *Differences among CDMA, FDMA, and TDMA*. URL : [https://www.researchgate.net/figure/Differences-among-CDMA-FDMA-and-TDMA\\_fig2\\_353856800](https://www.researchgate.net/figure/Differences-among-CDMA-FDMA-and-TDMA_fig2_353856800) (visité le 28/04/2023).
- [Lit23] LITEPOINT. *An Introduction to the 5G Small Cell*. 2023. URL : <https://www.litepoint.com/blog/an-introduction-to-the-5g-small-cell/> (visité le 28/04/2023).
- [Löf23] Johan LÖFBERG. *YALMIP Toolbox*. 2023. URL : <https://yalmip.github.io/> (visité le 09/06/2023).
- [Met] METASWITCH. *Qu'est-ce que la formation de faisceaux 5G, la direction de faisceau et la commutation de faisceau avec MIMO massif*. URL : <https://www.metaswitch.com/knowledge-center/reference/what-is-beamforming-beam-steering-and-beam-switching-with-massive-mimo> (visité le 03/05/2023).

- [NET] THE THINGS NETWORK. *RSSI and SNR*. URL : <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/rssi-and-snr/> (visité le 17/06/2023).
- [Not21] Electronics NOTES. *5G OFDM waveform & modulation basics*. 2021. URL : <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/5g-mobile-wireless-cellular/waveforms-ofdm-modulation.php> (visité le 28/04/2023).
- [Not23] Electronics NOTES. *5G Multiple Access Scheme*. 2023. URL : <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/5g-mobile-wireless-cellular/multiple-access-scheme.php> (visité le 28/04/2023).
- [Ora21] Réseaux ORANGE. *Les bénéfices de la 5G*. 2021. URL : <https://reseaux.orange.fr/5g-benefices> (visité le 28/04/2023).
- [Oro] Yoseli OROZCO. *The Battle of 5G Titans : Standalone (SA) and Non-standalone (NSA) 5G Deployment Models*. URL : <https://www.comarch.com/telecommunications/blog/standalone-and-non-standalone-5g-deployment-models/> (visité le 28/04/2023).
- [Sol23] Viavi SOLUTIONS. *What is 5G Architecture ?* 2023. URL : <https://www.viavisolutions.com/en-us/what-5g-architecture> (visité le 28/04/2023).
- [Ste20] Michael Grant et STEPHEN BOYD. *CVX : Matlab Software for Disciplined Convex Programming, Version 2.2*. 2020. URL : <http://cvxr.com/cvx> (visité le 09/06/2023).
- [stl] STLPARTNERS. *5G Standalone vs Non-standalone : Deployment models*. URL : <https://stlpartners.com/articles/telco-cloud/5g-deployment-models-standalone-vs-non-standalone/> (visité le 28/04/2023).
- [Sul] Alain SULTAN. *5G System Overview*. URL : <https://www.3gpp.org/technologies/5g-system-overview> (visité le 28/04/2023).
- [Tec23] TECHTARGET. *Line of Sight (LOS)*. 2023. URL : <https://www.techtarget.com/whatis/definition/line-of-sight-LOS> (visité le 28/04/2023).

## Résumé

L'accès multiple par répartition de débit (RSMA) a émergé en tant que cadre puissant pour optimiser les 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 contexte de la 5G, RSMA permet de relever les défis posés par les exigences diverses en termes de qualité de service et la nécessité d'une connectivité massive. Il assure une transition fluide entre les stratégies de gestion des interférences, en équilibrant le traitement des interférences comme du bruit (SDMA) et le décodage complet des interférences (NOMA). Cela est réalisé en décodant partiellement les interférences et en considérant le reste comme du bruit, ce qui réduit la complexité du système. De plus, la RSMA offre la flexibilité nécessaire pour s'adapter aux niveaux variables d'interférences et aux déploiements des utilisateurs.

L'étude de RSMA ouvre de nouvelles possibilités pour améliorer les performances des réseaux sans fil et faire progresser la technologie sans fil. En exploitant les avantages du RSMA, nous pouvons efficacement répondre aux demandes évolutives de communication, faciliter la conception efficace des réseaux et répondre aux exigences des futurs systèmes sans fil. La RSMA permet d'améliorer l'efficacité spectrale, l'efficacité énergétique, l'équité, la fiabilité et la qualité de service dans un large éventail de charges réseau et de déploiements d'utilisateurs. De plus, le RSMA présente une robustesse à la qualité du CSIT, ce qui réduit la surcharge de rétroaction et la complexité.

## Abstract

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

In the context of 5G, RSMA addresses the challenges posed by diverse quality of service requirements and the need for massive connectivity. It ensures a smooth transition between interference management strategies by balancing the treatment of interference as noise (SDMA) and decoding interference completely (NOMA). This is achieved by partially decoding the interference and treating the remaining as noise, thereby reducing system complexity. Furthermore, RSMA provides the necessary flexibility to adapt to varying interference levels and user deployments.

The study of RSMA opens up new possibilities for enhancing wireless network performance and advancing wireless technology. By leveraging the advantages of RSMA, we can effectively meet the evolving communication demands, facilitate efficient network design, and fulfill the requirements of future wireless systems. RSMA improves spectral efficiency, energy efficiency, fairness, reliability, and quality of service across a wide range of network loads and user deployments. Additionally, RSMA exhibits robustness to channel state information at the transmitter (CSIT), reducing feedback overhead and complexity.