

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département d'Électronique

N° :/2022

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE: Télécommunication

SPECIALITE : Systèmes des Télécommunications

Thème

**Amélioration de l'efficacité énergétique d'un système
NOMA multi-utilisateur en présence d'un dispositif de
rétrodiffusion**

Présenté Par : Adem IKHLEF

Encadré Par : Sofiane HADDAD

Anis ZAHZOUH

Y. SOUKKOU

Date de soutenance : 13/07/2022

Jury de Soutenance

Président : Ammar SOUKKOU

Grade MCA

Univ MSB jijel

Encadreur : Sofiane HADDAD

Grade MCA

Univ MSB jijel

Y. SOUKKOU

Grade MRB

CRTI

Examineur : Chabane BOUBAKIR

Grade MCB

Univ MSB jijel

Promotion : 2021 /2022

Remerciements

*Avant tout, nous tenons à remercier Dieu,
Le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience
d'accomplir ce modeste travail.*

*Nous adressons notre sincère remerciement et notre gratitude à notre
encadreur **Mr. HADDAD Sofiane** maître de conférences au département de
d'électronique qui nous a fourni le sujet de ce mémoire et nous a guidés de
ses précieux conseils et suggestions, et la confiance qu'il nous a témoignés tout
au long de ce travail.*

*Nos vifs remerciements au **Mr. SOUKKOU Amar**, d'avoir accepté,
d'assurer la présidence du jury de notre mémoire de master.*

*Nous souhaitons exprimer nos sincères remerciements et notre profonde
gratitude à **Mr. BOUBAKIR CHAABANE**, pour l'honneur qu'elle me fait en
acceptant d'examiner et juger ce modeste travail.*

*Enfin, on adresse nos sincères sentiments de gratitude Et de reconnaissances à
toutes promotions de master et À toutes les personnes qui ont participé de près ou de
Et aussi **Mr. Boufersada** chef AOP à Mobilis pour son précieux temps qui nous a
donnés mille merci*

Loin à la réalisation de ce travail.

Un grand merci à toutes et tous.

Dédicace

Je me dois d'avouer pleinement ma reconnaissance à toutes les personnes qui m'ont soutenue durant mon parcours, qui ont su me hisser vers le haut pour atteindre mon objectif. C'est avec amour, respect et gratitude que je dédie ce travail..... A mes très chers parents,

Je ne saurais exprimer ma gratitude et ma reconnaissance envers vous. Merci d'être présents à tout moment et durant toutes mes années d'études, vous m'avez supportée dans tous mes états. Je ne cesserai de vous remercier, en espérant un jour que vous puissiez voir en moi ce que vous avez toujours voulu.

Puisse Dieu tout puissant vous préserver du mal, vous comblez de santé, de bonheur et vous accorder une longue et heureuse vie.

Je vous aime.

A mes deux chères sœur INES et LYNA, Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut pour vous dire que vous comptez pour moi. Ce travail est le symbole de tout l'amour et le respect que j'ai pour vous. Je vous remercie de votre gentillesse et de votre humilité. Vous êtes une bénédiction pour nous. Que Dieu vous protège et exauce tous vos vœux.

A mon binôme ADEM, on a beaucoup sacrifié pour réaliser ce travail.

A mes amis ABDOU, OUSSAMA et SEIFEDDINE vous représentez l'ami qui a toujours été présents à n'importe quel moment pour me consoler et m'encourager. Je ne cesserai de vous remercier.

Que Dieu garde cette précieuse amitiés, je vous souhaite tout le bonheur.

A mon grand-père RABAH et tous les membres de ma famille, mes professeures, mes collègues, et à la pensée de mes grands-parents.

AMS

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À Dieu d'abord qui m'a donné le courage pour finir ce travail

*À ma chère mère ...celle qui m'a indiqué la bonne voie en me
rappelant que la volonté fait toujours les bons hommes*

*À mon cher père « Essaid » ... Mon premier encadrant depuis ma
naissance ...*

À mon frère Seif Eddine et ma chère sœur Soumia.

*À mon ami soufiane qui a toujours été présent à n'importe quel
moment pour me consoler et m'encourager. Je ne cesserai de vous
remercier.*

À tous mes amis chacun par son nom.

À mon binôme Anis.

Un remercie spéciale pour les gens qui m'aide

À tous les étudiant de Master II télécom

*إن اللذين نجبهم ونعزهم مكانتهم ليست بين الأسطر والصفحات، لأن مقامهم أجل وأعلى
فالقلب سكناهم والذكرى ذكراهم، والفؤاد لن ينساهم*

ADEM

Résumé

Ce mémoire examine l'efficacité énergétique d'un système NOMA multi-utilisateurs en liaison descendante en présence de dispositifs de rétrodiffusion.

Nous dérivons une solution analytique qui représente le meilleur compromis entre le débit total et la consommation d'énergie, le tout pour un nombre quelconque d'utilisateurs. Tout d'abord, nous montrons que l'équation du coefficient de réflectance optimal peut être obtenue analytiquement.

Cela nous permet d'obtenir le problème de cartographie de puissance convexe. De plus, en réduisant la méthode itérative de Dinkelbach à une simple recherche linéaire, la solution analytique globale résultante est utilisée pour déterminer le rapport du débit total à la consommation d'énergie.

Mot clés : 5G, NOMA, OMA, MIMO, SC, SIC, RETRRODIFFUION, ...

ملخص

تبحث هذه المذكرة في كفاءة الطاقة لنظام NOMA متعدد المستخدمين للوصلة الهابطة في وجود أجهزة التشتت الخلفي. ظل قيود ميزانية الطاقة المحدودة وجودة الخدمة (QoS)، نشق حلاً تحليلياً يمثل أفضل مقايضة بين إجمالي الإنتاجية واستهلاك الطاقة، كل ذلك لأي عدد من المستخدمين. أولاً، نوضح أنه يمكن الحصول على معادلة معامل الانعكاس الأمثل بشكل تحليلي. هذا يسمح لنا بالحصول على مشكلة رسم الخرائط المحدبة للطاقة. بالإضافة إلى ذلك، من خلال تقليل طريقة Dinkelbach التكرارية إلى بحث خطي بسيط، يتم استخدام الحل التحليلي الشامل الناتج لتحديد نسبة إجمالي الإنتاجية إلى استهلاك الطاقة.

الكلمات المفتاحية: 5G, NOMA, OMA, MIMO, SC, SIC, RETRRODIFFUION, ...

Abstract

This thesis examines the energy efficiency of a downlink multi-user NOMA system in the presence of backscatter devices.

We derive an analytical solution that represents the best compromise between total throughput and power consumption, all for any number of users. First, we show that the equation for the optimal reflectance coefficient can be obtained analytically.

This allows us to obtain the convex power mapping problem. Additionally, by reducing Dinkelbach's iterative method to a simple linear search, the resulting global analytical solution is used to determine the ratio of total throughput to energy consumption.

Keywords: 5G, NOMA, OMA, MIMO, SC, SIC, RETRRODIFFUION, ...

Sommaire

Remerciements	I
Dédicace.....	II
Résumé.....	IV
ملخص	IV
Abstract	IV
Liste des figure.....	A
Glossaire	XI
INTRODUCTION GENERALE.....	
Chapitre I SYSTÈMES DE COMMUNICATION MOBILE 5G	3
I.1 Introduction :.....	4
I.2 Qu'est-ce qu'un réseau de téléphonie mobile ?	4
I.3 Bref historique des réseaux sans fil cellulaires :.....	4
I.3.1 Le réseau 1G	5
I.3.2 Le réseau 2G	5
I.3.3 Le réseau GPRS	6
I.3.4 Le réseau EDGE.....	6
I.3.5 Le réseau 3G	6
I.3.6 Le réseau 3G+, H+ et H+ Dual Carrier	6
I.3.7 Le réseau 4G	7
I.3.8 Le réseau 4G+	7
I.4 Vers la nouvelle génération des réseaux mobiles : 5G	7
I.4.1 Principe :	7
I.5 Architecture 5G :.....	8
I.5.1 C'est quoi le DSS ?	9
I.5.2 C'EST QUOI LA 5G SUB-6 ?.....	9
I.6 Architecture 5G 3GPP :	9
I.7 Spectre et fréquence de la 5G :.....	9
I.8 Beamforming	10
I.9 Technologies adoptées par la 5G.....	11
I.9.1 Technologie MIMO	11
I.9.2 Onde millimétrique	11
I.9.3 Multiplexage NOMA	11
I.10 Exigences et défis de la 5G	12
I.11 La génération du futur : 6G	12
I.12 Réseau GSM	12

I.13 Concept cellulaire	14
I.14 Conclusion	15
Chapitre II Accès multiple non orthogonal et ses variantes	16
II.1 INTRODUCTION	17
II.2 Principe de base d'accès multiple non orthogonal (NOMA).....	17
II.2.1 Le codage par superposition (SC : superposition coding)	17
II.2.2 Annulation d'interférences ou SIC (Successive interference cancelation)	20
II.3 NOMA vs OFDMA :	27
II.4 Système MIMO (état de l'art)	27
II.4.1 Principe de la technologie MIMO	28
II.5 Capacité de canal	29
II.5.1 Capacité d'un système SISO	30
II.5.2 Canal SIMO	30
II.5.3 Canal MIMO :	31
II.6 Liaison descendante MIMO.....	32
II.6.1 MIMO-OMA	33
II.6.2 MIMO-NOMA	34
II.7 Avantages de MIMO-NOMA par rapport au MIMO-OMA	37
II.8 Conclusion	37
Chapitre III Efficacité énergétique d'un système NOMA multi-utilisateurs en présence d'un dispositif de rétrodiffusion	38
III.1 INTRODUCTION	39
III.2 Architecture classique d'un système de transfert d'énergie sans fil.....	39
III.3 L'efficacité énergétique c'est quoi ?.....	40
III.4 La communication par rétrodiffusion	40
III.5 Architecture d'un dispositif de rétrodiffusion.....	40
III.6 Utilisation des communications par rétrodiffusion	41
III.6.1 Communication par rétrodiffusion, MIMO.....	41
III.6.2 Communication par rétrodiffusion et l'Internet des Objets (IoT)	42
III.7 Les avantages de la rétrodiffusion	42
III.8 Modèle de système de communication étudié et formulation du problème	43
III.8.1 Compromis entre le débit et la consommation d'énergie.....	46
III.9 SOLUTION ÉNERGÉTIQUE EFFICACE À FORME FERMÉE	46
III.9.1 Coefficient de réflexion optimale	47
III.9.2 Optimisation du vecteur d'allocation de puissance	47
III.9.3 Rapport entre le débit d'addition et la consommation d'énergie	48
III.10 RÉSULTATS DE LA SIMULATION ET DISCUSSION	50
III.11 Conclusion.....	54

CONCLUSION GENERALE	55
Référence	56

Liste des figure

Figure I.1 : Evolution de réseau mobile d'un point de vue au débit	5
Figure I.2 : Les trois groupes de fréquences utilisés par la 5G	8
Figure I.3 : Beamforming.....	10
Figure I.4 : Spectre électromagnétique.....	11
Figure I.5 : Architecture des réseaux GSM	13
Figure I.6 : Photos réelles des différents équipements dans le GSM.....	14
Figure I.7 : Le concept de réseau cellulaire.....	15
Figure II.1 : Signaux originaux	18
Figure II.2 : Données des deux utilisateurs avec une modulation BPSK.....	18
Figure II.3 : Données mise à l'échelle des deux utilisateurs	19
Figure II.4 : Codage par superposition.....	20
Figure II.5 : Annulation des interférences successive (SIC)	21
Figure II.6 : Signale codée par superposition.....	23
Figure II.7 : Le résultat de la démodulation BPSK sur le signal (X).....	24
Figure II.8 : Résultat de la soustraction.....	24
Figure II.9 : La démodulation de signal résultant.....	25
Figure II.10 : Diagramme fonctionnel d'un système de communication sans fil.....	25
Figure II.11 : Diagramme explicatif du processus SIC au niveau de récepteur.....	26
Figure II.12 : Diagramme explicatif du processus SC au niveau de l'émetteur.....	26
Figure II.13 : Comparaison simple entre le NOMA de liaison descendante et OMA (OFDMA)	27
Figure II.14 : La différence entre SISO, SIMO, MISO, MIMO systèmes.	28
Figure II.15 : Schéma fonctionnel des systèmes MIMO.	28
Figure II.16 : Système SISO	30
Figure II.17 : Système SIMO.....	31
Figure II.18 : Système MIMO.	31
Figure II.19 : Variation de la capacité dans un système SIMO en fonction de N antennes réceptrices et MIMO en fonction de M antennes émettrices et N antennes réceptrices.	32
Figure II.20 : Schéma fonctionnel de base de l'émetteur et du récepteur MIMO-NOMA en liaison descendante.	34
Figure III.1 : Architecture typique d'une chaîne d'émission réception de puissance sans fil	39
Figure III.2 : L'architecture d'un rétro-diffuseur	41
Figure III.3 : Modèle de système d'antennes multiples rétrodiffusées NOMA	43
Figure III.4 : Schéma illustrant le signal transmis avec et sans BD	44
Figure III.5 : Procédure de l'algorithme de Dinkelbach.....	49
Figure III.6 : Efficacité énergétique (GEE) en fonction du nombre d'utilisateurs K pour $R_{\min} = 1$ bit/s.	50
Figure III.7 : Coefficient de réflexion optimal ρ^* en fonction du nombre d'utilisateurs K pour $R_{\min} = 1$ bit/s.....	52
Figure III.8 : Gain relatif d'efficacité énergétique du NOMA et OMA par rapport à l'OMA classique en fonction de la puissance du bruit σ^2 pour K = 3 utilisateurs, $R_{\min} = 1$ bits/s et $P_{\max} = 50$ dBm	53
Figure III.9 : Efficacité énergétique.....	54

Glossaire

3GPP	3rd Generation Partnership Project
AC	Alternating Current
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BD	Backscattering Device
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BS	Base Station
BSC	Base Station Controller
BTS	Base Transceiver Station
CDMA	Code Division Multiple Access
CS	Compressive Sensing
CSI	Channel State Information
CSMA/CD	Carrier Sensing Multiple Access/Collision Detection
DC	Direct Current
DFT	Discrete Fourier Transform
DL	Deep Learning
DNN	Deep Neural Network
DSS	Dynamic Spectrum Switching
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
EE	Energy Efficiency
EP	Error Propagation
GEE	Global Energy Efficiency
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communication
HLR	Home Location Register
HSPA	High Speed Packet Access
IoT	Internet of Things
ITU	International Telecommunication Union

LDPC	Low Density Parity Check
LOS	Line-Of-Sight
<i>LTE</i>	<i>Long Term Evolution</i>
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MISO	Multiple Input Simple Output
<i>MMS</i>	<i>Multimedia Messaging Service</i>
MS	Mobile Station
MSC	Mobile Switching Center
NFP	Programmation Fractionnaire Non linéaire
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access
NR	New Radio
OEM	Onde ElectroMagnétique
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OMA	Orthogonal Multiple Access
PNL	Programmation Non Linéaire
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
RAN	Radio Access Network
RF	RadioFréquence
SC	Superposition Coding
SFR	Société Française du Radiotéléphone
SIC	Successive Interference Cancellation
SIMO	Simple Input Multiple Output
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio
SISO	Simple Input Simple Output
<i>SMS</i>	<i>Short Message Service</i>
SNR	Signal Noise Rate
TDMA	Time Division Multiple Access
THF	Trading Haute Fréquence
UE	User

UHF

Ultra Haute Fréquence

UMTS

Universal Mobile Telecommunications System

VLR

Visitor Location Register



INTRODUCTION GENERALE



INTRODUCTION GENERALE

Le besoin de communiquer est aussi important pour nous que l'air, l'eau, la nourriture et l'abri. Actuellement, grâce aux réseaux, nous sommes plus connectés que jamais [1]. Selon le rapport annuel de CISCO (2018-2023), les internautes seront près de deux tiers de la population mondiale, les connexions machine-to-machine représenteront la moitié des applications connectés, donc les applications d'internet des objets (IoT) aura plus de nécessité. Cette croissance exponentielle du trafic et des appareils connectés au cours de la dernière décennie a entraîné une consommation d'énergie et des émissions de carbone importantes [2]. Par conséquent, la minimisation de la consommation d'énergie sera l'un des enjeux majeurs des futurs réseaux de télécommunications. La feuille de route actuelle de la prochaine génération (6G) prévoit une efficacité énergétique 10 à 100 fois supérieure à celle des réseaux de 5^{ème} génération (5G) récemment normalisés [3].

Afin de répondre à ces exigences, l'amélioration d'efficacité énergétique des systèmes de communication est nécessaire. Cependant minimiser la quantité d'énergie absorbé tout en améliorant la performance du système reste un défi important à relever.

Pour se faire, l'accès multiple non orthogonal (NOMA) est reconnu comme une technique prometteuse pour améliorer l'efficacité spectrale et énergétique (EE) par rapport à l'accès multiple orthogonal (OMA) [4]. Les utilisateurs peuvent être multiplexés sur la même ressource radio en utilisant un codage superposé sur l'émetteur et une suppression continue des interférences (SIC) sur le récepteur. Des technologies telles que la communication coordonnée (via des relais), les surfaces réfléchissantes intelligentes et la communication par rétrodiffusion ont été développées pour améliorer les performances des liaisons sans fil et des systèmes d'accès multiples. Les relais transmettent des signaux de la source à la destination, entraînant une consommation d'énergie supplémentaire, tandis que les surfaces réfléchissantes intelligentes reflètent uniquement les signaux ambiants sans transmettre leurs propres messages. Contrairement aux relais d'amplification et de transmission (AF), qui amplifient un signal reçu bruyant, la communication par rétrodiffusion ambiante fournit un message propre tandis que les signaux ambiants de la station de base (BS) ou du point d'accès Wi-Fi sont réfléchis vers le récepteur cible. De plus, les dispositifs de rétrodiffusion consomment beaucoup moins d'énergie que les dispositifs traditionnels car ils ne nécessitent pas d'oscillateur local pour générer des fréquences porteuses. Par conséquent, nous étudions les performances des systèmes NOMA en présence d'un dispositif de rétrodiffusion qui peut

transmettre des informations sans consommer d'énergie et réfléchir les signaux RF environnants. A nos jours, des études récentes ont étudié les avantages de la technique d'accès NOMA en présence d'un dispositif de rétrodiffusion en termes de défaillances potentielles, de débit global et de débit utilisateur minimum, et par conséquent l'amélioration de l'efficacité énergétique.

L'objectif de ce mémoire peuvent être résumé comme suit :

- L'optimisation de coefficient de réflexion ρ pour un vecteur d'allocation de puissance qualitatif P dans le cas d'un système multi-utilisateurs,
- L'optimisation de la puissance allouée aux utilisateurs,
- Maximiser l'efficacité énergétique globale par le rapport entre le débit et la consommation d'énergie.


Le présent manuscrit est structuré autour de trois chapitres :

Chapitre I : Dans ce chapitre introductif, nous présentons les systèmes de communication, et on aborde l'évolution de réseau mobile, les principes de base de la génération 5G et le concept de réseau cellulaire.

Chapitre II : présente la technique d'accès NOMA et ses variantes tout en détaillons le principe fondamental de codage et décodage (SC/SIC).

Chapitre III : Après avoir appréhendé la méthode NOMA, nous avons l'étudié en présence d'un dispositif de rétrodiffusion dans le cas multi-utilisateurs. Des résultats de simulation sont présentés, avec une comparaison avec la technique OMA en absence et en présence de ce dispositif en termes de l'efficacité énergétique, le coefficient de réflexion, le gain énergétique et le débit minimum.

Finalement, et pour clôturer ce manuscrit, nous présentons quelques conclusions tout en synthétisant les différents aboutissements de ce travail et en proposant des perspectives envisagées pour poursuivre cette recherche.



Chapitre I
SYSTÈMES DE
COMMUNICATION
MOBILE 5G



I.1 Introduction :

Depuis quelques années, les besoins et les désirs des individus continuent d'augmenter, c'est pourquoi le secteur des télécoms ne cesse jamais à développer des nouvelles technologies des réseaux mobiles de génération en génération.

La génération déployée actuellement dans quelques pays s'appellera 5G. Elle basée sur une technique d'accès multiple dans le domaine des puissances, nommée NOMA. La première génération est caractérisée par une transmission purement analogique avant de passer au numérique. La deuxième génération (2G), comme le GSM, fournit des services aux utilisateurs type de voix mobile. L'UMTS de troisième génération (3G) fournit les services de communications plus rapides, en particulier la voix et Internet. LTE de la quatrième génération (4G), conçu pour permettre un transfert de données ultra-rapide avec une plus grande portée et des appels plus élevés par cellule.

La 5G est conçu pour répondre rapidement aux besoins de connectivité des différents services, des débits de données plus élevés, avec une latence réduite à 1 milliseconde, permettront à un objet de prendre en charge un grand nombre de connexions.

I.2 Qu'est-ce qu'un réseau de téléphonie mobile ?

Un réseau de téléphonie mobile est un réseau permettant un usage simultané d'un grand nombre de téléphones portables ou de terminaux connectés, mobiles ou statiques, et ce même en cas de déplacement à vitesse élevée.

I.3 Bref historique des réseaux sans fil cellulaires :

Chaque génération ou "G" de communication sans fil prend environ une décennie pour arriver à maturité. Le passage d'une génération à l'autre est principalement motivé par le besoin des opérateurs de réutiliser ou de réaffecter la quantité limitée de spectre disponible. Chaque nouvelle génération présente une meilleure efficacité spectrale, ce qui permet de transmettre les données plus rapidement et plus efficacement sur le réseau.

La première génération de communication sans fil, ou 1G, a débuté dans les années 1980 avec la technologie analogique. Elle a été rapidement suivie par la 2G, la première génération de réseau à utiliser la technologie numérique. La croissance de la 1G et de la 2G a d'abord été stimulée par le marché des téléphones mobiles. La 2G offrait également la communication de données, mais à des vitesses très faibles.

CHAPITRE I : Systèmes de communication mobile 5G

La génération suivante, la 3G, a commencé à monter en puissance au début des années 2000. La croissance de la 3G a de nouveau été tirée par les combinés, mais elle a été la première technologie à offrir des débits de données de l'ordre de 1 mégabit par seconde (Mbps), adaptés à une variété de nouvelles applications tant sur les smartphones que pour l'écosystème émergent de l'Internet des objets (IoT). Notre génération actuelle de technologie sans fil, 4G LTE, a commencé à monter en puissance en 2010.

Il est important de noter que La 4G LTE (Long Term Evolution) a une longue durée de vie. Il s'agit d'une technologie très performante et mature qui devrait être largement utilisée pendant au moins une autre décennie [4].



Figure I.1 : Evolution de réseau mobile d'un point de vue au débit

I.3.1 Le réseau 1G

Il s'agit de la toute première génération de réseau mobile, déployée en France dès 1986. Du nom de Radiocom 2000, le réseau était l'œuvre et la propriété de France Télécom. La 1G était accessible par le biais de téléphones analogiques transportables, essentiellement intégrés aux voitures. Avant qu'il ne cesse d'être utilisé, le réseau Radiocom 2000 rassemblait environ 60 000 clients.

I.3.2 Le réseau 2G

Le réseau 2G, aussi appelé GSM, déployé en 1982 et toujours actif, est actuellement le réseau le plus étendu en France avec plus de 99% de couverture territoriale sur l'ensemble des opérateurs. Il représente le passage de l'analogique au numérique. La 2G est suffisante pour appeler et envoyer des SMS voire des MMS légers. Le réseau 2G est par ailleurs précurseur dans le transfert de données par paquets. Les débits généralement observés en 2G sont de 9.6Kbits/s, loin des standards modernes.

I.3.3 Le réseau GPRS

Le réseau GPRS (*General Packet Radio Service*), aussi appelé **2,5G**, offre une amélioration notable en matière de débit par rapport à la 2G (171,2Kbits/s théorique, 40Kbits/s généralement en pratique). Le standard GPRS est **précurseur sur l'internet mobile**. Il permet aussi de facturer l'utilisateur au volume échangé plutôt qu'à la durée de connexion, pour rester connecté sans surcoût. Le GPRS et la 2G sont diffusés sur les bandes de fréquences 900 MHz et 1800 MHz.

I.3.4 Le réseau EDGE

Evolution du GPRS, le réseau **EDGE** utilise en émission des bandes de fréquences comprises entre 876 MHz et 915 MHz, contre 921 MHz et 960 MHz en réception. Le réseau EDGE, aussi appelé 2,75G, a permis la **transition entre la 2G et la 3G** via des débits pouvant atteindre 384Kbits/s en théorie et 100Kbits/s en pratique. L'EDGE a été développé dans le but d'optimiser la partie radio du réseau mobile au niveau des données et d'améliorer les débits de téléchargements.

I.3.5 Le réseau 3G

Le réseau 3G, aussi appelé UMTS, qui fonctionne sur les bandes de fréquences 900 MHz et 2100 MHz, est l'un des réseaux mobiles les plus utilisés en France. En 2021, il présente une couverture territoriale allant de 92% à 96% selon les opérateurs. Avec un débit de 1,9Mbits/s, la 3G a démocratisé l'utilisation de l'internet mobile (navigation web et réseaux sociaux, envoi de mail, échange de photos...). Sa mise en place à la fin des années 2000 coïncide d'ailleurs avec l'avènement des smartphones, qui offrent un meilleur confort de navigation et présentent une meilleure ergonomie que les téléphones portables classiques de l'époque.

I.3.6 Le réseau 3G+, H+ et H+ Dual Carrier

La 3G a connu trois améliorations successives avec la 3G+ (aussi appelée HSPA), le H+ (HSPA+) et le H+ Dual Carrier (DC-HSPA+). Il s'agit d'évolutions de l'UMTS visant à bénéficier de meilleurs débits : 3,6Mbits/s pour la 3G+, 5Mbits/s pour le H+ et 10Mbits/s pour le H+ Dual Carrier. Ces avancées ont permis d'aller plus loin dans les usages internet, avec la possibilité de visionner des vidéos instantanément, sans patienter le temps du chargement.

I.3.7 Le réseau 4G

Avec un débit théorique de 150Mbits/s et un débit pratique de 40Mbits/s, la 4G ou LTE (*Long Term Evolution*) donne aux usagers l'opportunité de surfer à très grande vitesse. L'utilisation des bandes de fréquences dépend de l'opérateur : tous utilisent le 2600 MHz alors que seul Bouygues Telecom utilise la fréquence 1800 MHz. Le 800 MHz est employé par tous les opérateurs excepté Free, qui emploie le 700 MHz. En France, le lancement de la 4G a débuté en 2013. Durant ses premières années, la 4G a constitué un argument de vente pour les opérateurs. Aujourd'hui, tous les opérateurs proposent des forfaits 4G. Sa couverture est d'ailleurs très complète et similaire à la 3G. La 4G permet de transférer des fichiers lourds, visionner des vidéos en HD, "live-streamer", etc.

I.3.8 Le réseau 4G+

Comme le GSM et l'UMTS, la norme LTE a connu des évolutions qui ont abouti au développement de la 4G+. Celle-ci offre des débits pouvant atteindre 1Gbit/s à l'arrêt et 100Mbits/s en mouvement. C'est Bouygues Telecom qui a pris les devants en se lançant dans la 4G+ dès juin 2014, avant qu'Orange ne lui emboîte le pas un mois plus tard. Chez SFR, l'ouverture à la 4G+ a dû attendre octobre 2014. Le déploiement de la 4G+ a suivi chez Free. Aujourd'hui, toutes les zones urbaines de France sont bien couvertes par la 4G+ [5].

I.4 Vers la nouvelle génération des réseaux mobiles : 5G

I.4.1 Principe :

La 5G est déployée sur les bandes actuelles de la 4G mais aussi sur de nouvelles bandes. Deux groupes peuvent être définis. D'un côté, nous avons les bandes sub-6 (fréquence inférieure à 6 GHz) et de l'autre, les bandes mmWave (ondes millimétriques avec une fréquence supérieure à 24 GHz). Pour faire simple, les premières ont une plus grande portée mais un plus faible débit à l'inverse des secondes. Étant donné les problèmes de portée et d'interférence, les opérateurs utilisent les bandes basses fréquences sub-6 pour aider à transporter la 5G sur de plus grandes distances et à travers les murs, ainsi que d'autres obstacles.

I.5 Architecture 5G :

L'objectif principal des précédentes générations de réseaux mobiles était simple : offrir des services de données mobiles rapides et fiables aux utilisateurs de réseaux. La 5G a élargi cette portée pour offrir un large éventail de services sans fil, fournis à l'utilisateur final à travers de multiples plateformes d'accès et via des réseaux à plusieurs couches.

La 5G constitue en réalité un cadre dynamique, cohérent et flexible pour de multiples technologies avancées prenant en charge une grande variété d'applications [6]. La 5G utilise une architecture plus intelligente, avec des réseaux d'accès sans fil (RAN) qui ne sont plus soumis aux contraintes de proximité avec la station de base ou d'infrastructure complexe. La 5G ouvre la voie vers un réseau d'accès sans fil (RAN) désagrégé, flexible et virtuel avec de nouvelles interfaces créant des points d'accès aux données supplémentaires.

Les considérations de conception d'une architecture de réseau 5G prenant en charge des applications très exigeantes sont complexes. Par exemple, il n'y a pas d'approche unique ; la gamme d'applications exige que les données parcourent des distances, de grands volumes de données, ou une certaine combinaison. L'architecture 5G doit donc prendre en charge le spectre à bande basse, moyenne et haute - provenant de sources sous licence, partagées et privées - afin de concrétiser pleinement la vision 5G.

C'est pourquoi la 5G est conçue pour fonctionner sur des fréquences radio allant de moins de 1 GHz à des fréquences extrêmement élevées, appelées "ondes millimétriques" (ou mmWave). Plus la fréquence est basse, plus le signal peut voyager loin. Plus la fréquence est élevée, plus le signal peut transporter de données.



Figure I.2 : Les trois groupes de fréquences utilisés par la 5G

I.5.1 C'est quoi le DSS ?

Le DSS, ou *dynamic spectrum switching*, permet de basculer à la volée directement depuis l'antenne entre la 4G et la 5G pour chaque bande de fréquences. Cela permet d'ajuster le réseau en temps réel selon la demande et de petit à petit basculer de la 4G LTE vers la 5G, à mesure que le parc installé d'appareils compatibles 5G augmente [7]

I.5.2 C'est quoi la 5G SUB-6 ?

La 5G sub-6 désigne les fréquences utilisées en 5G et sous la barre des 6 GHz. Ce sont des fréquences permettant une meilleure portée que les ondes millimétriques, mais un débit maximal plus faible [7]. Elles regroupent à la fois les bandes moyennes, qui sont nouvelles, et les bandes basses fréquences, qui réutilisent des fréquences utilisées par la 4G LTE.

On peut plus précisément distinguer les bandes moyennes, notamment entre 3,4 et 3,8 GHz en Europe qui sont nouvelles pour la 5G, des basses fréquences, qui ont une portée encore plus grande et sont utilisées par la 4G LTE.

I.6 Architecture 5G PPP :

Le 3rd Generation Partnership Project (3GPP) couvre les technologies de télécommunication, notamment les réseaux d'accès sans fil (RAN), les réseaux de transport de cœur et les capacités de services. La norme 3GPP établit des spécifications de système complètes pour l'architecture des réseaux 5G qui est beaucoup plus orientée vers les services que les générations précédentes.

Les services sont fournis par le biais d'un cadre commun aux fonctions de réseaux ayant l'autorisation d'utiliser ces services. La modularité, la capacité de réutilisation et l'autonomie des fonctions réseau constituent des considérations supplémentaires à prendre en compte pour une architecture de réseau 5G décrite par les spécifications du 3GPP [5].

I.7 Spectre et fréquence de la 5G :

Plusieurs plages de fréquence sont désormais dédiées au spectre New Radio (NR) de la 5G. La portion du spectre radio dont les fréquences se situent entre 30 et 300 GHz est connue sous le nom d'onde millimétrique, car ses longueurs d'onde varient de 1 à 10 mm. Les fréquences situées entre 24 et 100 GHz sont désormais dédiées à la 5G dans de nombreuses régions du monde.

Outre l'onde millimétrique, les fréquences UHF sous-utilisées situées entre 300 MHz et 3 GHz sont elles aussi réaffectées à la 5G. La diversité des fréquences employées peut être

CHAPITRE I : Systèmes de communication mobile 5G

adaptée à des applications uniques étant donné que les hautes fréquences se caractérisent par une bande passante plus élevée, bien que d'une portée plus courte. Les fréquences d'onde millimétrique sont idéales pour les zones densément peuplées, mais inefficaces pour les cellules larges. Dans ces bandes de hautes et basses fréquences dédiées à la 5G, les opérateurs ont commencé à s'adjuger leurs propres portions individuelles du spectre 5G [9].

I.8 Beamforming

Le beamforming est une autre technologie révolutionnaire essentielle au succès de la 5G. Les stations de base conventionnelles transmettaient des signaux dans de multiples directions, sans tenir compte de l'emplacement des utilisateurs ou des appareils ciblés. Grâce à des matrices MIMO (entrées multiples, sorties multiples) munies de douzaines de petites antennes combinées en une formation unique, il est possible d'utiliser des algorithmes de traitement des signaux pour déterminer le chemin de transmission le plus efficace vers chaque utilisateur, tandis que des paquets individuels peuvent être envoyés dans de multiples directions, puis orchestrés pour atteindre l'utilisateur final selon une séquence prédéterminée.



Figure I.3 : Beamforming

Comme la transmission de données de 5G occupe l'onde millimétrique, la perte de propagation en espace libre (proportionnelle à la taille plus petite de l'antenne) et la perte par diffraction (inhérente aux fréquences plus hautes et à l'absence de pénétration des murs) sont toutes deux considérablement plus élevées. D'un autre côté, la taille réduite de l'antenne permet à des matrices beaucoup plus grandes d'occuper le même espace physique. Avec chacune de ces petites antennes réaffectant potentiellement la direction du beam (faisceau directif) plusieurs fois par milliseconde, un beamforming massif capable de répondre aux défis posés par la bande passante 5G devient alors plus réalisable. Et avec une plus grande densité d'antennes dans un espace physique similaire, des beams (faisceaux directifs) plus fins

peuvent être obtenus avec le MIMO massif (Massive MIMO), ce qui fournit un moyen d'atteindre un haut débit associé à un suivi plus efficace des utilisateurs.

I.9 Technologies adoptées par la 5G

I.9.1 Technologie MIMO

La technologie MIMO se caractérise par l'utilisation d'un grand nombre de micro antennes intelligente sur un seul appareil actuellement de 8 à 128. Ces antennes forment un faisceau directif vers le terminal, qu'il soit fixe ou mobile. Les antennes MIMO permettent un débit et une capacité de transmission élevés de données inaccessibles en 4G aujourd'hui [9]. En effet, cette technologie permet à la fois d'élargissez la portée de la station de base et améliorez l'efficacité énergétique.

I.9.2 Onde millimétrique

La plupart des réseaux cellulaires actuels fonctionnent dans des bandes de fréquences extrêmement étroites En dessous de 2 GHz et où le signal parcourt une longue distance.

Onde millimétrique offre un rapport Bandes de fréquences plus grandes actuellement utilisées dans les télécommunications où l'utilisation de ces ondes nécessite l'installation de dizaines de milliers de nouvelles antennes[7].

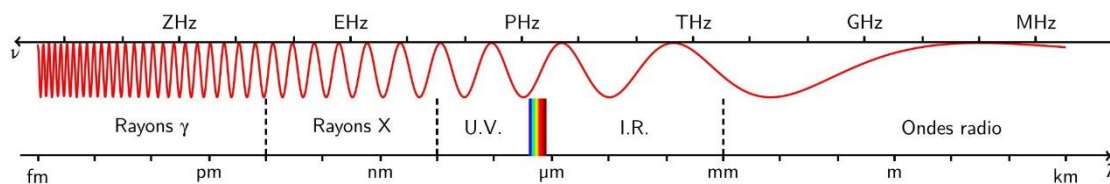


Figure I.4 : Spectre électromagnétique

I.9.3 Multiplexage NOMA

Récemment proposée comme technologie de transmission pour les réseaux 5G, la technologie NOMA promet des améliorations significatives de l'efficacité spectrale et énergétique par rapport aux normes 4G actuelles qui utilisent le multiplexage par répartition en fréquence OFDM orthogonal.

Le principe de cette modulation multiporteuse est de transmettre des données simultanément avec N sous-porteuses. Le débit global reste le même, mais chaque porteuse est moins sensible à l'étalement du trajet dans le canal de propagation [9].

I.10 Exigences et défis de la 5G

L'exigence de la 5G va au-delà de celles exigées par le secteur de la radiocommunication de l'ITU pour la 4G. Certaines des principales exigences de la 5G par rapport à la 4G sont :

- Une capacité en Mbits/s/km² multipliée par 1000,
- Un débit de données par utilisateur de 10 à 100 fois plus grand,
- Taux de connectivité plus élevé, 10 à 100 fois plus,
- Réduction du délai de 5 à 10 fois,
- Une durée de vie des équipements 10 fois plus élevée,
- Augmentation de 3 fois dans l'efficacité spectrale : une utilisation plus efficace de la bande passante.

I.11 La génération du futur : 6G

La gamme de fréquences 6G sera étendue de la fréquence des ondes millimétriques 5G à la fréquence Tera Hz.

La technologie devrait être plus de 100 fois plus rapide que la 5G, cela permet des données sans perte et sans perte dans l'espace pour réaliser des communications à longue portée avec moins de production d'énergie.

Le site Internet du ministère de la Science et de la Technologie indique que le gouvernement chinois a déjà commencé à mettre en œuvre des projets d'infrastructure et de développement pour explorer la faisabilité de la 6G et son application dans les industries nationales.

Cependant, il est encore trop tôt pour parler de la date et des détails de la technologie de sixième génération, car elle est encore en construction et en développement, et de nombreux obstacles ont été surmontés, les attentes parlent de la possibilité de le lancer après environ 10 ans.

I.12 Réseau GSM

GSM (Global System for Mobile Communication) est une norme élaborée au cours des années 80 et 90, et qui est toujours en évolution afin de définir les paramètres pour un réseau de communication cellulaire numérique. La norme GSM est utilisée pour les réseaux de communication sans fil à travers le monde.

CHAPITRE I : Systèmes de communication mobile 5G

Un réseau GSM compte une (ou plusieurs) station de base par cellule. La station mobile choisit la cellule selon la puissance du signal. Une communication en cours peut passer d'une cellule à l'autre permettant ainsi la mobilité des utilisateurs.

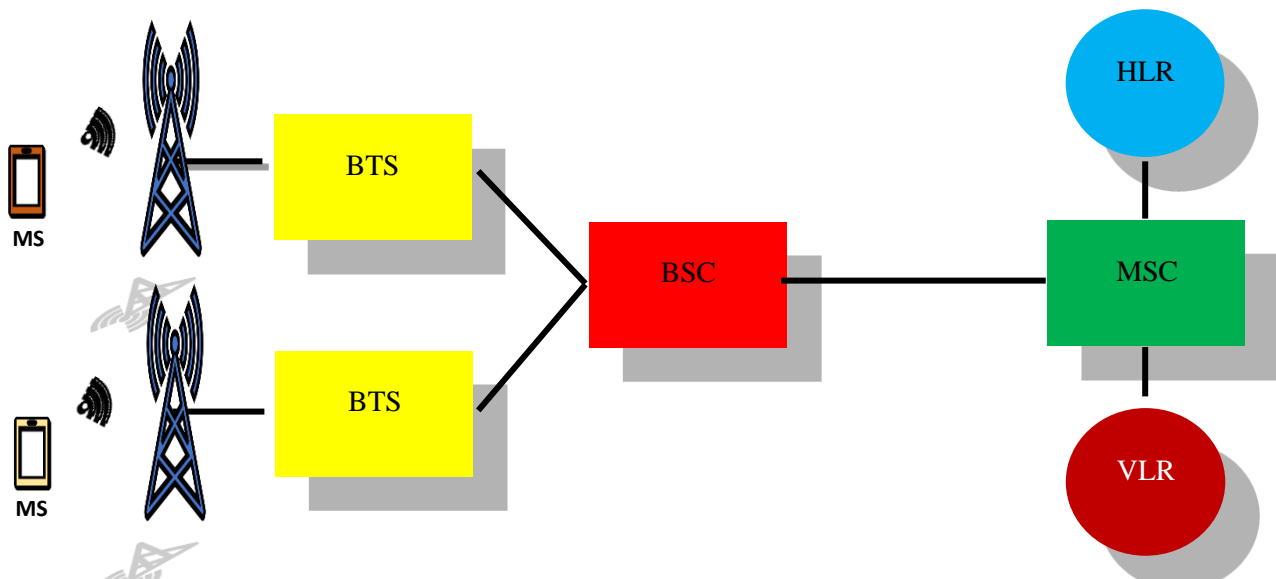


Figure I.5 : Architecture des réseaux GSM

MS : Mobile station

BTS : Base Transveiver station. Son rôle est la synchronisation temporelle et fréquentielle avec les MS et la transmission et l'émission des signaux radio et la modulation et le multiplexage des données envoyer par les MS.

BSC : base station controler. C'est le nœud intelligent de la partie radio. Sa fonctionnalité est de gérer les ressources radio et établir et terminer les appelle, aussi permettre de gérer la mobilité des utilisateurs d'une cellule a une autre, et aussi la gestion de la puissance d'émission.

MSC : mobile switching center. Son rôle et traité et gérer le trafic de signalisation et le trafic voix de plusieurs BSC

HLR : Home location register. C'est une base de données globales qui contient toutes les informations des donnée GSM (Globale Systeme Mobile).

VLR : visitor location register. C'est une base de données d'une zone particulière appeler location area.



Figure I.6 : Photos réelles des différents équipements dans le GSM

I.13 Concept cellulaire

Dans un système cellulaire, la zone de couverture est divisée en cellules, comme illustré à la Figure 1. Une cellule est circulaire, mais cela dépend en fait du terrain de la zone desservie par l'antenne de la cellule. Pour plus de clarté, ils peuvent être illustrés par des hexagones. Au centre de la cellule, on trouve un ou un groupe d'émetteurs/récepteurs correspondant à des bandes de fréquence [10]. La taille de l'unité dépend de la puissance de son émetteur-récepteur. Si un émetteur-récepteur est très puissant, il aura une large portée, mais sa bande de fréquence deviendra vite saturée de communications. D'autre part, en utilisant des cellules plus petites (émetteurs-récepteurs moins performants), la même bande de fréquences peut être réutilisée davantage, augmentant ainsi le nombre de communications possibles.

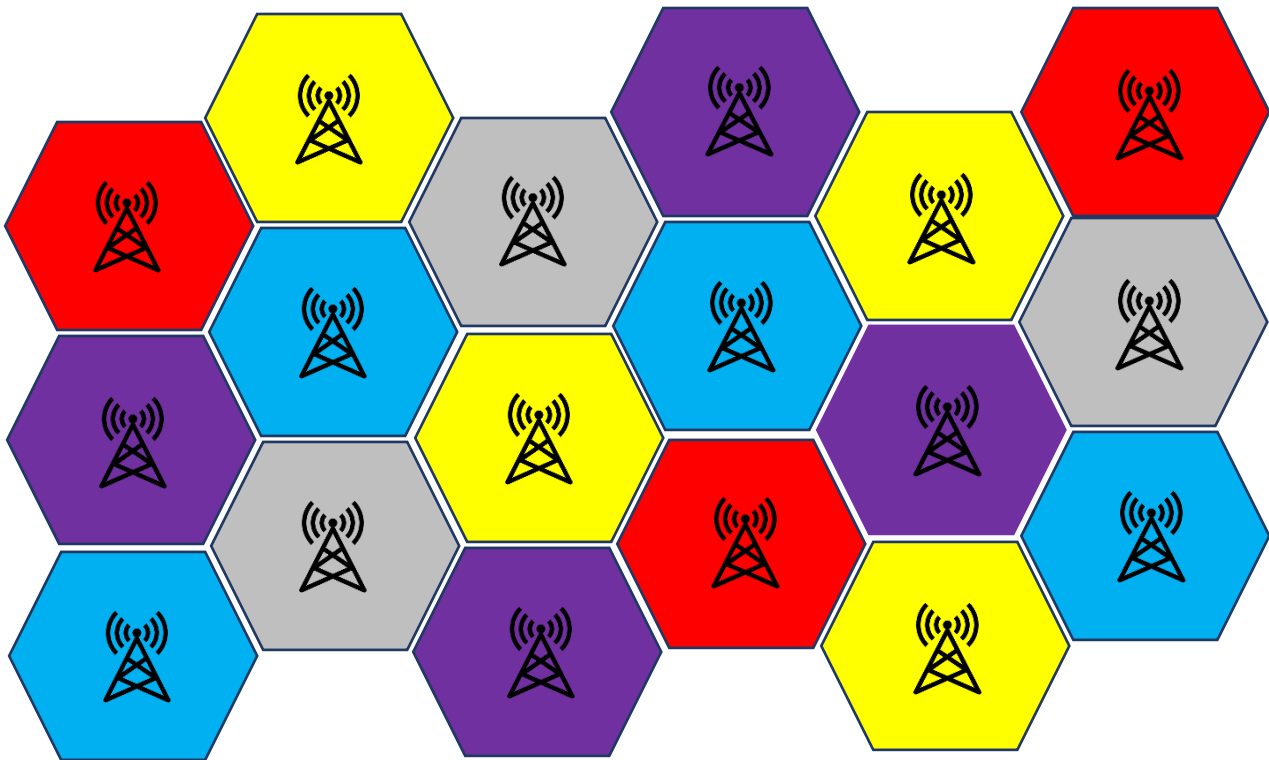


Figure I.7 : Le concept de réseau cellulaire

Lors de la conception d'un réseau cellulaire, les aspects suivants doivent être pris en compte :

- La topographie
- La densité de communications
- Deux cellules adjacentes ne peuvent pas avoir la même bande de fréquence pour éviter les interférences. La distance entre deux cellules avec la même bande devrait être de 2 à 3 fois le diamètre de la cellule.

I.14 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons discuté quelque base sur le réseau cellulaire notamment de son évolution à travers le temps (1G, 2G, 3G, 4G, 5G, 6G).

Par suit nous avons détaillé quelque notion sur la technologie 5G son principe, architecture et les technologies MIMO, NOMA adopté par cette dernière. En fin nous avons éclaircie le système de communication GSM (Concept cellulaire). Dans le chapitre qui suit nous concentrons sur l'accès multiple non orthogonal (NOMA) et ces variantes.



Chapitre II
Accès multiple non
orthogonal et ses
variantes



II.1 INTRODUCTION

L'accès multiple est une technique qui permet à un certain nombre de terminaux ou de stations d'utiliser simultanément les ressources d'un moyen de transmission, d'une façon prédéterminée ou en fonction du volume des échanges. Parmi les exemples de systèmes d'accès multiple, citons le TDMA (Time Division Multiple Access) utilisé dans le GSM, le CDMA (Code Division Multiple Access) utilisé dans l'UMTS et le CSMA/CD (Carrier Sensing Multiple Access/Collision Detection) utilisé par Ethernet. Dans ce chapitre on vise à illustrer d'une façon détaillée le principe de base d'une technique d'accès multiple développée pour les réseaux 5G, appelée NOMA (Non Orthogonal Multiple Access), en commençant sur ces deux principales opérations : SC (superposition coding) et SIC (Successive interference cancelation) dans le cadre de codage et décodage, et en terminant par son utilisation hybride avec système MIMO (Multiple Input and Multiple Output) pour donner une diversité spectrale et par conséquent maximiser la capacité du canal.

II.2 Principe de base d'accès multiple non orthogonal (NOMA)

L'accès multiple non orthogonal (NOMA), permet à plusieurs utilisateurs de transmettre et de recevoir simultanément dans le domaine des puissances en utilisant la même fréquence. Les deux opérations clés qui rendent NOMA possible sont le codage de superposition ou SC (superposition coding) qui doit être effectué du côté de l'émetteur et l'annulation successive des interférences (également appelée SIC : successive interference cancellation) du côté du récepteur. Dans ce qui suit, nous verrons plus précisément le principe de ces deux approches (SC, SIC).

II.2.1 Le codage par superposition (SC : superposition coding)

Supposons que deux utilisateurs user1 et user2 communiquent en même temps et sur la même fréquence, Nous considérons :

- x_1 : les données du premier utilisateur (user 1)
- x_2 : les données du deuxième utilisateur (user 2)

Pour simplifier les choses et faciliter le processus de compréhension, nous supposons que chaque utilisateur envoie quatre bits, c'est-à-dire :

- Le premier utilisateur envoie 4 bits
- Le deuxième utilisateur envoie 4 bits

CHAPITRE II : Accès multiple non orthogonal et ses variantes

Soit $\mathbf{x}_1 = \mathbf{0101}$ et $\mathbf{x}_2 = \mathbf{1001}$. Ces deux séquences de bits (x_1 et x_2) sont présentées ci-dessous.

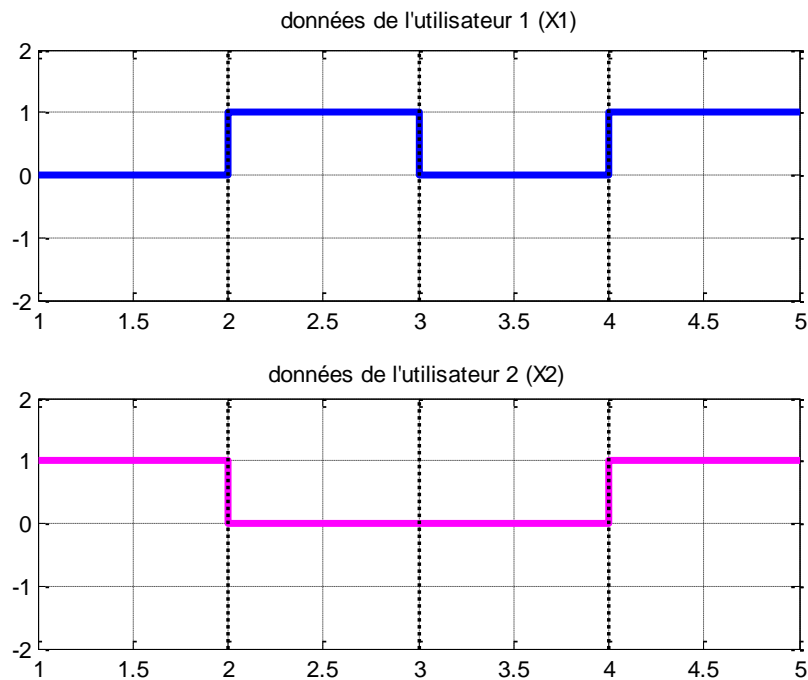


Figure II.1 : Signaux originaux

x_1 et x_2 doivent subir une modulation numérique avant la transmission. Ici, nous utilisons la modulation BPSK (Binary Phase Shift Keying) pour sa simplicité. La BPSK code les 0 par des -1 et les +1 par des 1, comme indiqué ci-dessous.

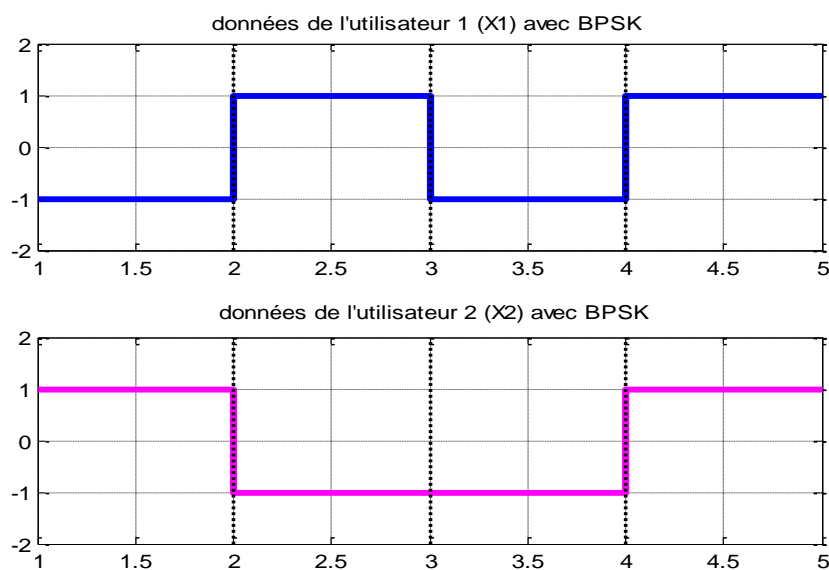


Figure II.2 : Données des deux utilisateurs avec une modulation BPSK

CHAPITRE II : Accès multiple non orthogonal et ses variantes

Après tout ce que nous avons vu précédemment, nous sommes arrivés à l'étape principale, qui consiste à additionner x_1 avec x_2 , mais avant nous devons les multiplier avec différents niveaux de puissance, ensuite nous faisons le processus d'addition.

D'après la figure précédente, nous pouvons voir que x_1 et x_2 ont une amplitude de crête de ± 1 . Cela signifie qu'ils ont tous les deux une puissance unitaire + (1 watt).

Nous donnons les poids de puissance $a_1 = 0,75$ W à l'utilisateur 1 et $a_2 = 0,25$ W à l'utilisateur 2, une règle à suivre ici est que a_1 et a_2 doivent avoir une somme égale à 1.

Ici, nous avons utilisé une allocation de puissance fixe. C'est-à-dire des valeurs fixes de a_1 et a_2 .

D'abord avant de multiplier x_1 et x_2 avec les deux puissances a_1 et a_2 , on calcule les racines carrées de a_1 et a_2 car a_1 et a_2 représentent les facteurs de mesure de la puissance.

Il s'agit de la relation : **puissance = amplitude²**

Donc l'amplitude = $\sqrt{\text{puissance}}$

Et à partir de là $a_1 = \sqrt{0.75} = 0.866$

$$a_2 = \sqrt{0.25} = 0.5$$

Par conséquent, le résultat de la multiplication nous donne ce qui suit :

Données mises à l'échelle de l'utilisateur 1 = $\sqrt{a_1}x_1 = -0.866 \ 0.866 \ -0.866 \ 0.866$

Données mises à l'échelle de l'utilisateur 2 = $\sqrt{a_2}x_2 = 0.5 \ -0.5 \ -0.5 \ 0.5$

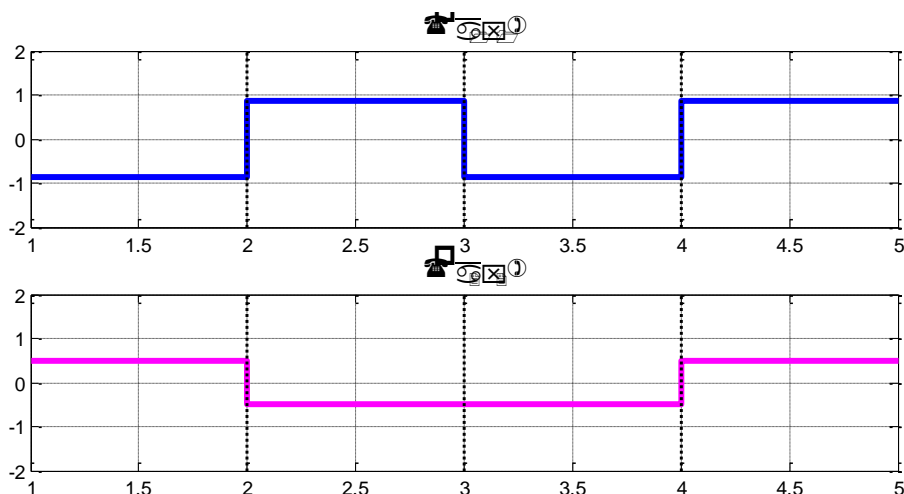


Figure II.3 : Données mise à l'échelle des deux utilisateurs

CHAPITRE II : Accès multiple non orthogonal et ses variantes

Maintenant on ajoute les deux signaux mis à l'échelle ensemble. Le signal résultant est appelé signal codé par superposition et il est désigné par $X = \sqrt{a_1}x_1 + \sqrt{a_2}x_2$. En les additionnant, nous obtenons

$$X = -0,366 \ 0,366 \ -1,366 \ 1,366.$$

Une représentation graphique de X est présentée ci-dessous. On mentionne que chaque terme correspondant de $\sqrt{a_1}x_1$ et $\sqrt{a_2}x_2$ de la figure précédente sont additionnés les uns aux autres pour obtenir le graphique de X illustré ci-dessous.

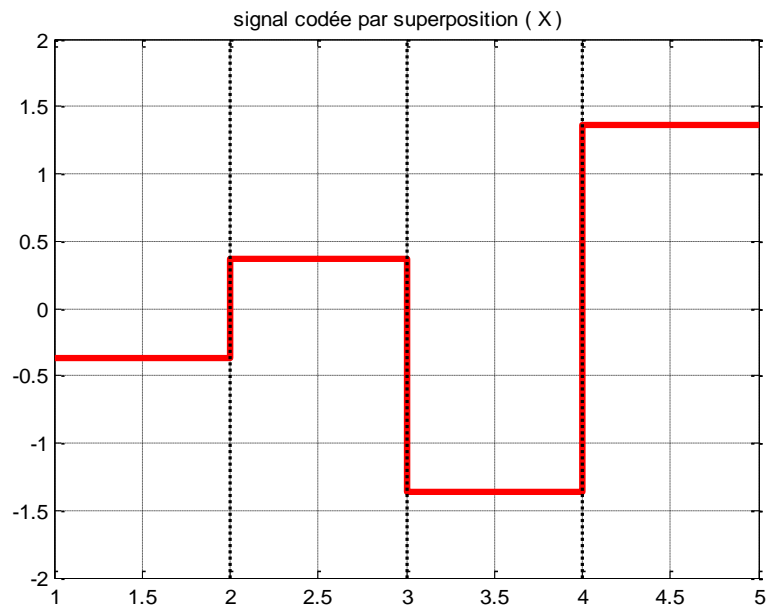


Figure II.4 : Codage par superposition

- ✓ Ce signal X est le signal NOMA codé par superposition qui est effectivement transmis dans le canal. C'est ainsi que se fait le codage par superposition. On note que X est une combinaison linéaire de x_1 et x_2 . Dans le suivant, nous verrons comment nous pouvons récupérer x_1 et x_2 à partir de X en utilisant la technique d'annulation d'interférences successives (SIC).

II.2.2 Annulation d'interférences ou SIC (Successive interference cancelation)

II.2.2.1 Le principe

Au niveau du récepteur, le SIC décode les signaux un par un jusqu'à ce qu'il trouve le signal souhaité. La figure II.1 illustre le concept. Dans l'illustration, les trois signaux d'information indiqués par des couleurs différentes sont superposés sur

CHAPITRE II : Accès multiple non orthogonal et ses variantes

l'émetteur. Le signal reçu au niveau du récepteur SIC comprend ces trois signaux. Le premier signal que SIC décode est le plus fort tandis que les autres sont des interférences. Le premier signal décodé est alors soustrait du signal reçu et si le décodage est parfait, la forme d'onde avec le reste des signaux est obtenue avec précision. SIC itère le processus jusqu'à ce qu'il trouve le signal souhaité.

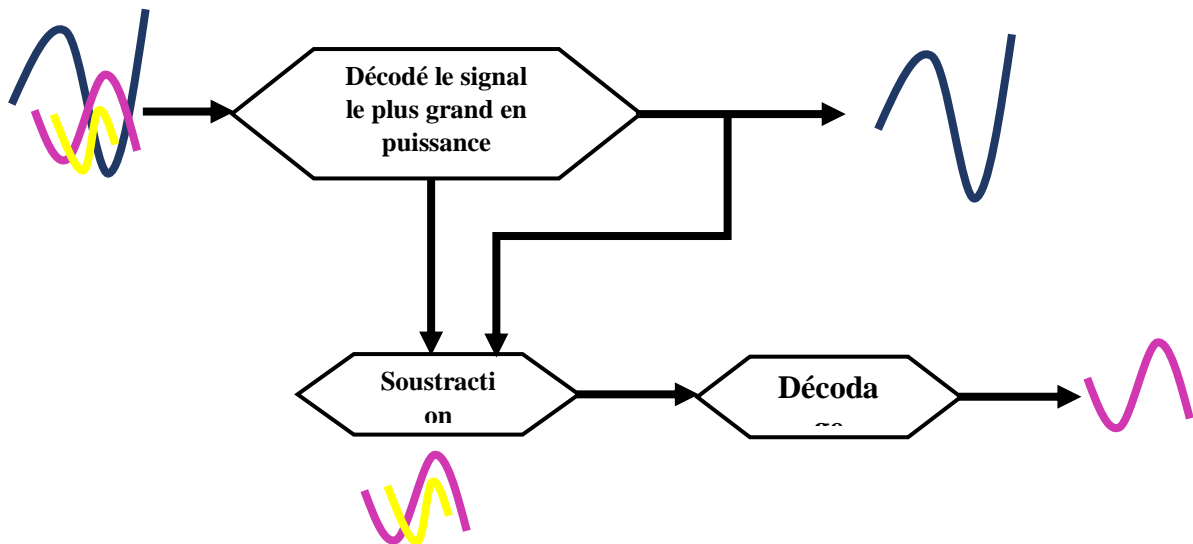


Figure II.5 : Annulation des interférences successive (SIC)

Avant de décoder, regardons l'algorithme SIC. SIC est un algorithme itératif où les données sont décodées dans l'ordre des niveaux de puissance décroissants.

Pour notre cas simple d'un système NOMA à deux utilisateurs, les étapes impliquées dans SIC sont décrites ci-dessous. On rappelle que :

- x_1 : représente les données du premier utilisateur (0101)
 - x_2 : représente les données du deuxième utilisateur (1001)
 - a_1 : est la puissance du premier utilisateur (0.75 W)
 - a_2 : est la puissance du deuxième utilisateur (0.25 W)
 - X : est le signal superposé
- Étape 1 : Décodant directement le signal X superposé et nous donnant le signal avec la plus grande puissance.

Par exemple, si x_1 reçoit plus de poids (c'est-à-dire $a_1 > a_2$), le décodage direct de X donne x_1 .

CHAPITRE II : Accès multiple non orthogonal et ses variantes

- Étape 2 : Multipliez le signal décodé à l'étape 1 par la racine carrée de la puissance correspondant et soustrayez-le de X .

Par exemple, si x_1 est décodés à l'étape précédente, soustrayez $\sqrt{a_1}x_1$ de X . Cela nous donnerait $X - \sqrt{a_1}x_1$.

- Etape 3 : Décodez le signal obtenu à l'étape 2 pour obtenir l'autre signal qui a été multiplexé à faible puissance.

Par exemple, le décodage de $X - \sqrt{a_1}x_1$ obtenu à l'étape précédente nous donnerait x_2

Ces étapes peuvent vous sembler un peu floues et incompréhensibles,

Mais ne vous inquiétez pas, complétez avec nous jusqu'à la fin et vous verrez que l'algorithme SIC est efficace et fonctionne bien.

Maintenant, nous allons appliquer SIC (Ici, nous avons fait une hypothèse SIC parfaite) à notre exemple précédent, c'est-à-dire que nous allons décoder le signal composé X que nous avons reçu de l'émetteur après le processus SC.

On sait que l'émetteur a utilisé la modulation BPSK

Et à partir de là, afin de décoder le signal X au niveau de récepteur, nous utiliserons la démodulation BPSK directement sur X .

Nous pourrions penser que nous aurions des problèmes car sachez que X contient une combinaison linéaire de x_1 et x_2 , qui sont deux messages différents. Mais nous verrons bientôt que SIC gère très bien ce problème. Alors allons-y et effectuons une démodulation BPSK sur X .

La démodulation BPSK est essentiellement un simple seuillage. Fixons le seuil à zéro. Pour chaque symbole, si l'amplitude dépasse zéro, nous allons le décodé en 1, et 0 sinon.

Il s'agit d'un tracé de X , et le seuil est indiqué par une ligne horizontale noire continue.

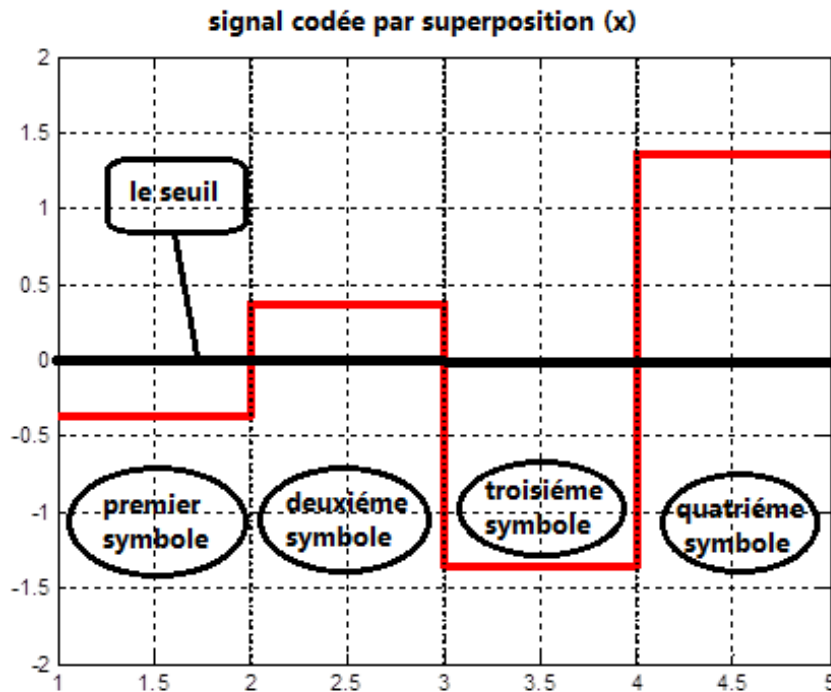


Figure II.6 : Signale codée par superposition

Décodons X symbole par symbole. Nous observons que les premiers et troisièmes symboles se situent en dessous de seuil de zéro.

Ainsi, nous décidons que les premier et troisième bits transmis sont des zéros

Le deuxième et le quatrième symbole se situent au-dessus du seuil. Ainsi, nous décidons que les deuxième et quatrième bits transmis sont des uns.

Ainsi, la séquence décodée dans l'ordre est 0101. Ce qui équivaut à x_1

En d'autres termes, nous sommes arrivés à x_1 en effectuant directement une démodulation BPSK sur X , ignorant totalement le fait que X avait aussi une composante de x_2 . Cela a été possible car nous avons attribué un poids de puissance plus élevé à la composante x_1 de X . Ainsi, la présence de l'autre composant x_2 dans X peut être ignorée en toute sécurité. En d'autres termes, nous traitons x_2 comme une interférence.

Nous avons terminé l'étape 1 du processus SIC. Le graphique ci-dessous montre le résultat :

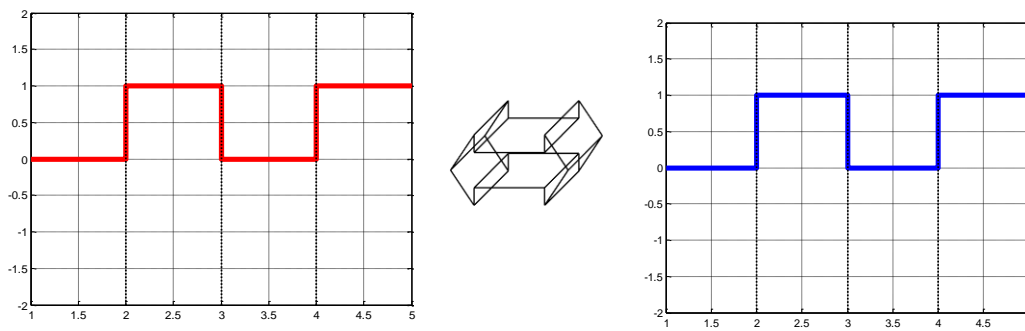


Figure II.7 : Le résultat de la démodulation BPSK sur le signal (X)

On sait $X = \sqrt{a_1}x_1 + \sqrt{a_2}x_2$. Les valeurs de $\sqrt{a_1}$ et $\sqrt{a_2}$ sont appelées car ce sont des choix de conception. De plus, nous avons obtenu x_1 en suivant l'étape 1. Donc, si nous soustrayons $\sqrt{a_1}x_1$ de X, il nous restera $\sqrt{a_2}x_2$. A partir de $\sqrt{a_2}x_2$, il est assez facile d'obtenir x_2 .

Passons à l'étape 2. Nous devons multiplier la composante x_1 par son poids de puissance correspondant et la soustraire de x . Nous devons être prudents maintenant. Nous avons obtenu que x_1 valoir 0101. Mais x_1 est présent dans X sous sa forme modulée BPSK. En d'autres termes, X ne contient pas x_1 en tant que 0101. X contient x_1 en tant que $-1 \ 1 \ -1 \ 1$, qui est la version modulée BPSK de 0101. Nous devons donc soustraire cette version modulée BPSK du composant x_1 de X. Après soustraction, le graphique ressemblerait à ceci.

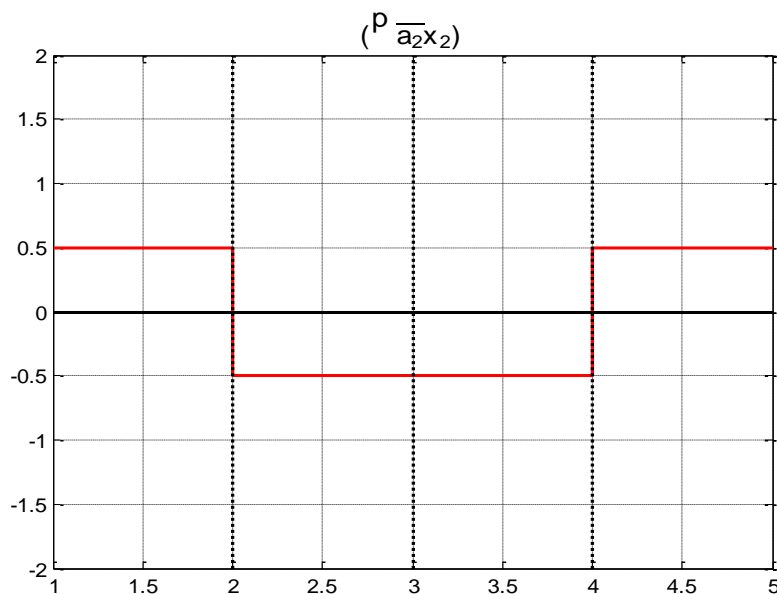


Figure II.8 : Résultat de la soustraction

CHAPITRE II : Accès multiple non orthogonal et ses variantes

On remarque que ce graphe est le même que le graphe du deuxième utilisateur après avoir effectué le processus des mises à l'échelle ($\sqrt{a_2}x_2$) que l'on a vu dans le processus sic

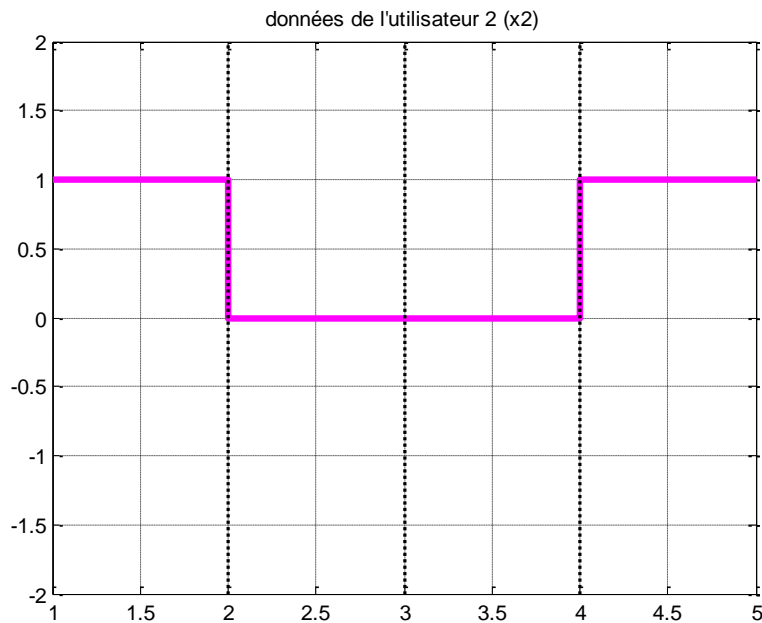


Figure II.9 : La démodulation de signal résultant

Nous en avons terminé avec l'étape 2. Passons à l'étape 3. Après la soustraction, nous devons simplement démoduler le signal résultant en utilisant la règle BPSK comme précédemment. En suivant la règle BPSK, nous voyons que le premier et le quatrième symbole seraient démodulés en uns et les autres symboles seraient démodulés en zéros. Ainsi, le signal démodulé, mis dans l'ordre est 1001, qui est identique à x_2 .

- **Des diagrammes résumant la communication de l'expéditeur au destinataire :**

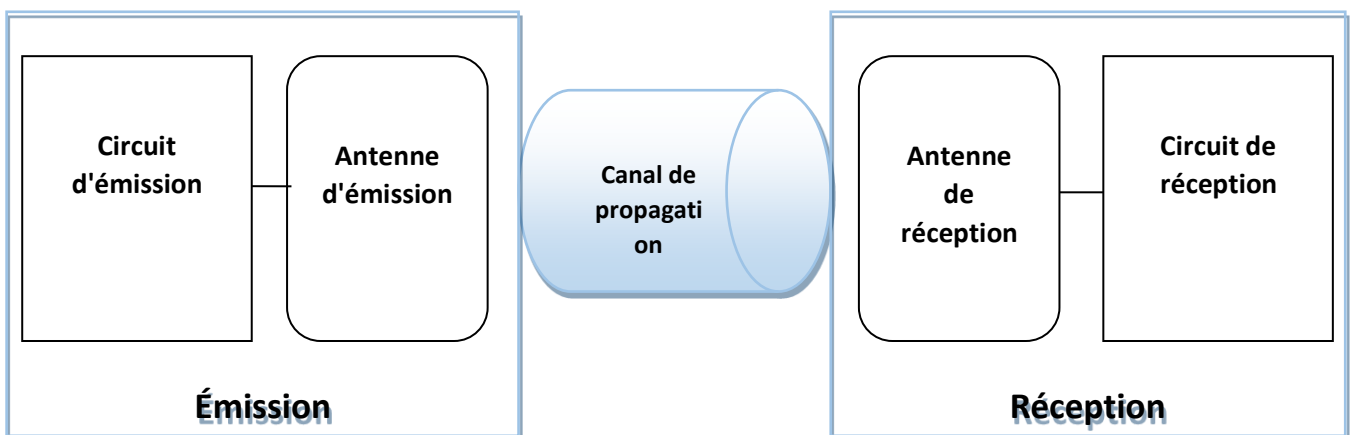


Figure II.10 : Diagramme fonctionnel d'un système de communication sans fil

CHAPITRE II : Accès multiple non orthogonal et ses variantes

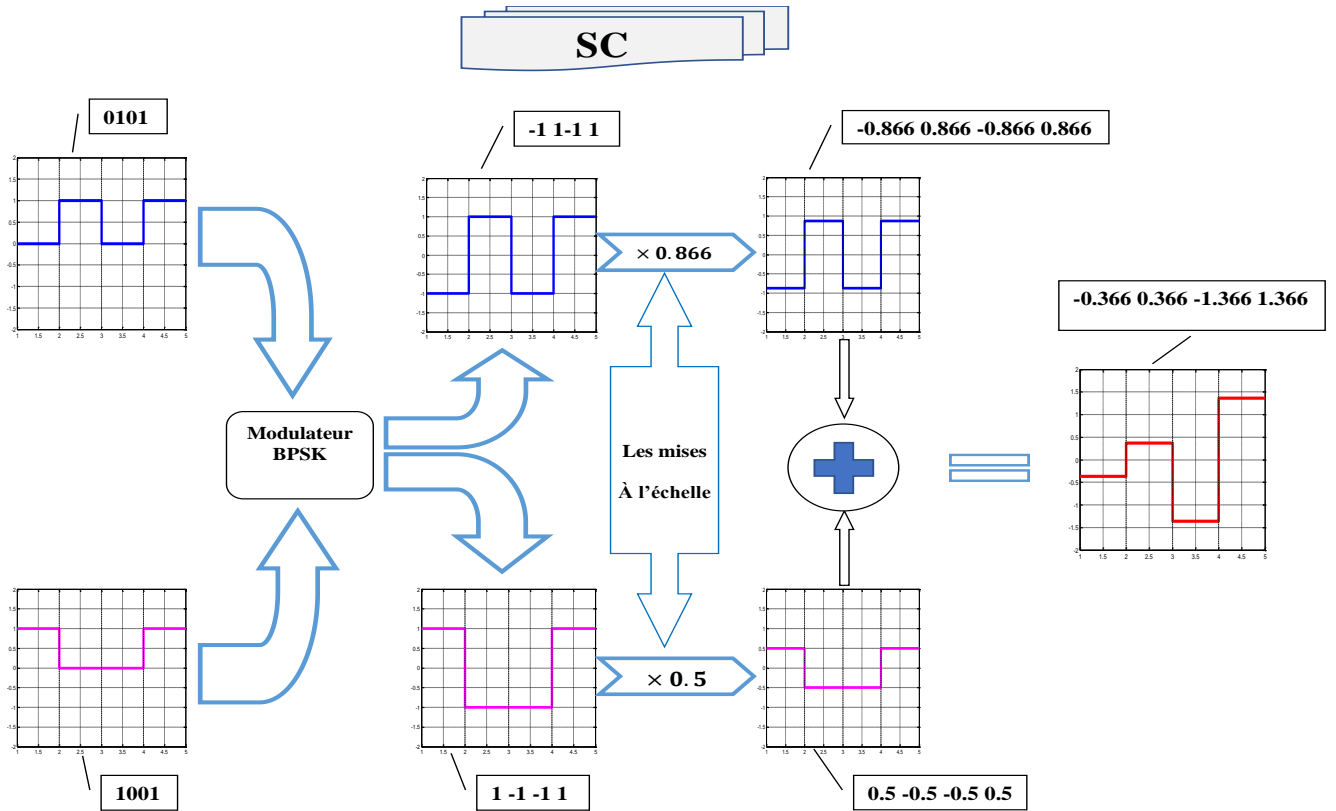


Figure II.12 : Diagramme explicatif du processus SC au niveau de l'émetteur

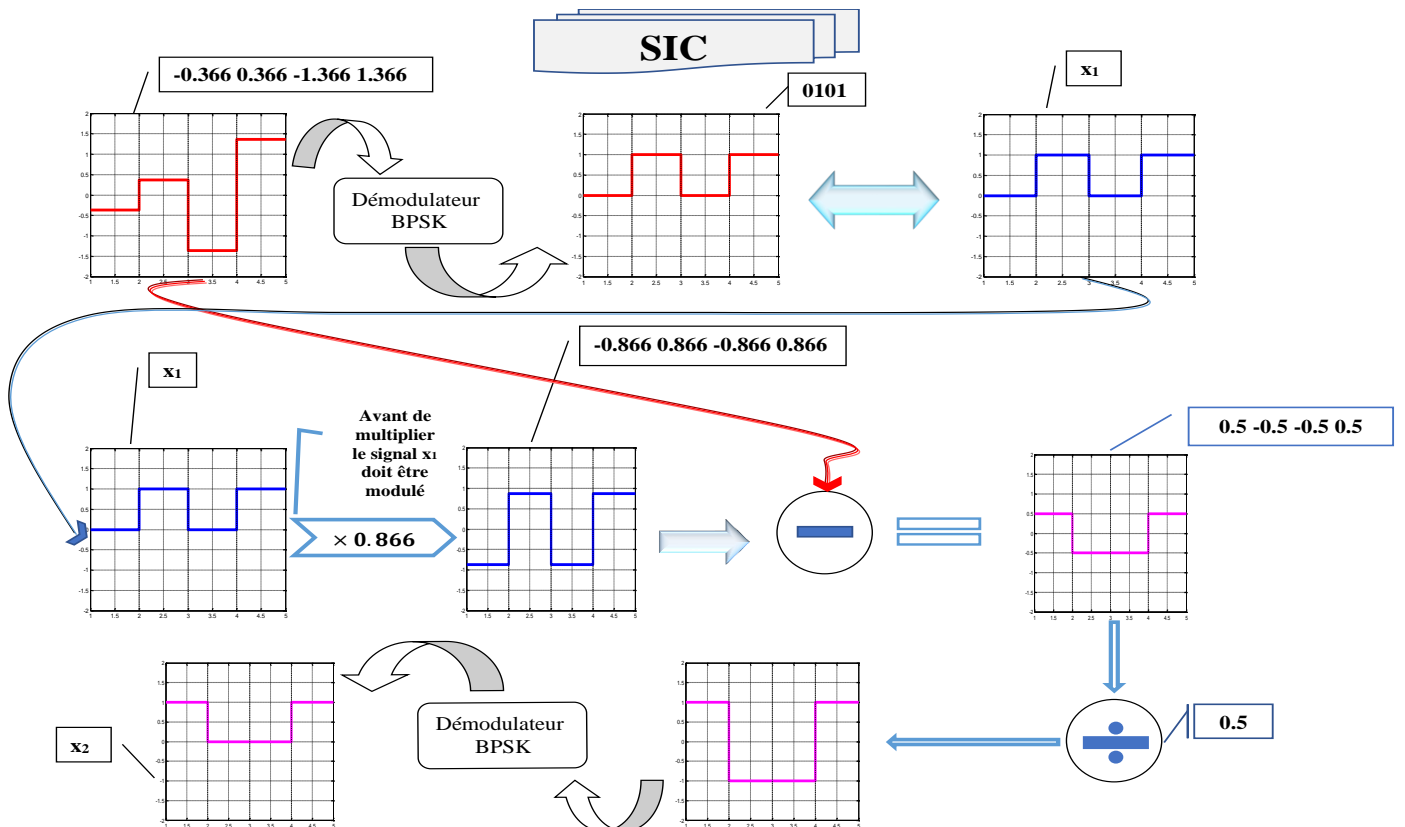


Figure II.11 : Diagramme explicatif du processus SIC au niveau de récepteur

II.3 NOMA vs OFDMA :

Nous considérons le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) comme schéma de modulation et NOMA comme schéma d'accès multiple. Dans les réseaux 4G conventionnels, en tant qu'extension naturelle de l'OFDM, l'accès multiple par répartition orthogonale de la fréquence (OFDMA) est utilisé où les informations de chaque utilisateur sont attribuées à un sous-ensemble de sous-porteuses. Dans NOMA, en revanche, toutes les sous-porteuses peuvent être utilisées par chaque utilisateur. La figure II.12 illustre le partage de la puissance et la fréquence pour OFDMA et NOMA pour deux utilisateurs. Le concept applique à la fois la transmission en liaison montante et en liaison descendante.

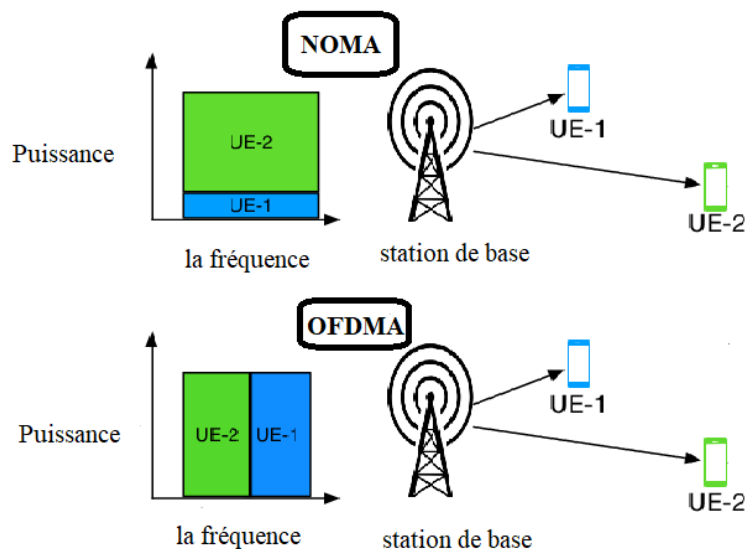


Figure II.13 : Comparaison simple entre le NOMA de liaison descendante et OMA (OFDMA)

II.4 Système MIMO (état de l'art)

Dans les systèmes de communications traditionnels, il n'existe qu'une antenne à l'émission et une antenne à la réception (SISO). Or les futurs services de communications mobiles sans fils demandent plus de transmissions de données (augmentation de la capacité de transmission). Ainsi pour augmenter la capacité des systèmes SISO et satisfaire ces demandes, les bandes passantes de ces systèmes et les puissances à transmettre ont été largement augmentées. Mais les récents développements ont montré que l'utilisation de plusieurs antennes à l'émission et à la réception permettait d'augmenter le débit de transmission des données et cela sans augmenter ni la bande passante de l'antenne réceptrice

CHAPITRE II : Accès multiple non orthogonal et ses variantes

du système SISO, ni la puissance du signal à l'émission. Cette technique de transmission s'appelle MIMO (Multiple Input and Multiple Output). Un système MIMO tire profit de l'environnement multi-trajets en utilisant les différents canaux de propagation créés par réflexion et/ou par diffraction des ondes pour augmenter la capacité de transmission. D'où l'intérêt aussi d'obtenir des signaux indépendants sur les antennes [14].

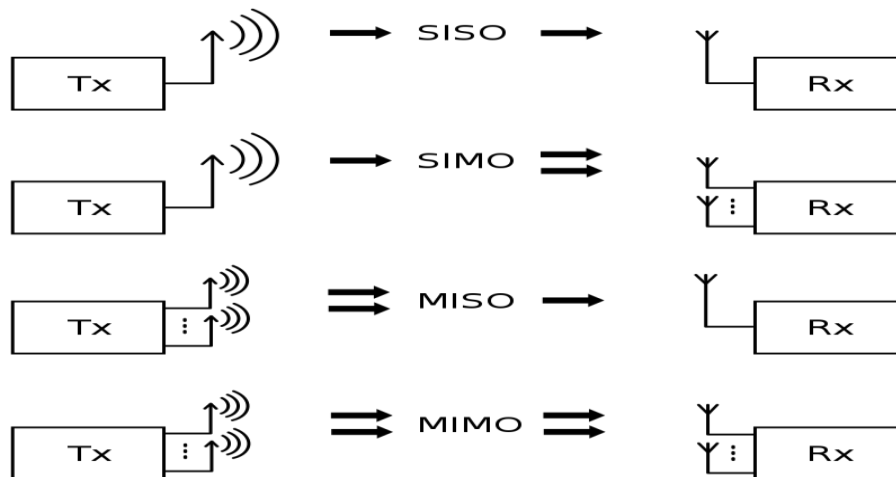


Figure II.14 : La différence entre SISO, SIMO, MISO, MIMO systèmes.

II.4.1 Principe de la technologie MIMO

Le principe de la technologie MIMO consiste à émettre dans un même canal des signaux transmis sur des antennes différentes. A la réception aussi et avec un certain nombre d'antennes et des traitements adéquats, il s'agit de simuler cette réception dans une même bande de n canaux différents.

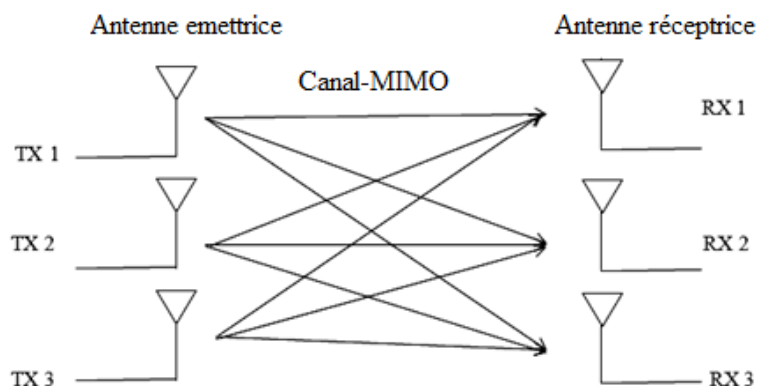


Figure II.15 : Schéma fonctionnel des systèmes MIMO.

Le flux est divisé en différents flux de même fréquence qui sont envoyés à travers trois (3) émetteurs à trois 3 récepteurs. L'algorithme permet ensuite d'identifier les différents flux

CHAPITRE II : Accès multiple non orthogonal et ses variantes

en vue de les restituer en un seul flux. Cet algorithme utilise la réflexion des signaux sur les murs, le sol, etc.

Alors que ces réflexions pourraient être considérées comme mauvaises, la technologie MIMO profite de ces différents canaux pour améliorer la rapidité de transmission des données. On peut considérer trois catégories de MIMO :

- **La diversité spatiale MIMO** : On transmet simultanément un même message sur différentes antennes à l'émission. Les signaux reçus sur chacune des antennes de réception sont ensuite remis en phase et sommés de façon cohérente. Cela permet d'augmenter le ratio S/B (grâce au gain de diversité) de la transmission. Pour que cette technique soit efficace, il faut que les sous canaux MIMO soient décorrélés les uns des autres.
- **Le multiplexage spatial MIMO** : Chaque message est découpé en sous messages. On transmet simultanément les sous-messages différents sur chacune des antennes d'émission. Les signaux reçus sur les antennes de réception sont réassemblés pour reformer le message entier d'origine. Comme pour la diversité MIMO, les sous-canaux de propagation doivent être décorrélés. Le multiplexage MIMO permet d'augmenter les débits de transmission (grâce au gain de multiplexage). Les techniques de diversité et de multiplexage MIMO peuvent être conjointement appliquées. Par exemple pour un système MIMO 5 x 5 (c'est-à-dire 5 antennes d'émission et 5 antennes de réception), on peut configurer un sous-système MIMO 2 x 3 pour faire du multiplexage et un sous-système MIMO 3 x 3 pour faire de la diversité MIMO.
- **Le MIMO – Beamforming (formation de faisceau)**: Le réseau d'antennes MIMO est utilisé pour orienter et contrôler le faisceau d'onde radio (amplitude et phase du faisceau). On peut ainsi créer des lobes constructifs / destructifs et optimiser une transmission entre l'émetteur et la cible. Les techniques de beamforming permettent à la fois d'étendre une couverture radio (d'une station de base ou d'un point d'accès par exemple) et de limiter les interférences entre utilisateurs et la pollution électromagnétique environnante (en ciblant le récepteur visé).

II.5 Capacité de canal

Nous allons ici comparer les capacités des différents canaux existants (SISO, SIMO, MIMO) sans connaissance préalable de l'état du canal CSI (Channel State Information). De même, nous allons aussi comparer les limites théoriques données par la capacité de Shannon

CHAPITRE II : Accès multiple non orthogonal et ses variantes

[VAU 03] qui est l'espérance de la capacité $E[C]$ et qui ne peut être obtenue que dans un canal idéal, avec un codage idéal.

II.5.1 Capacité d'un système SISO

Soit un système SISO (Figure II.15), avec h le gain du canal, γ le rapport signal sur bruit à l'antenne de réception ; la capacité sans connaître le CSI est :

$$C = \log_2(1 + \gamma|h|^2) \quad \text{bit/s/Hz} \quad (\text{II.1})$$

Ainsi la capacité théorique sera alors :

$$C_t = E(C) = \log_2(1 + \gamma E(|h|^2)) \quad \text{bit/s/Hz} \quad (\text{II.2})$$

or $E(|h_i|^2) = 1$, ainsi:

$$C_t = \log_2(1 + \gamma) \quad \text{bit/s/Hz} \quad (\text{II.3})$$

Elle augmente, en fonction du logarithmique de $1 + \gamma$. Lorsque le SNR est élevé, un gain de 3dB sur le γ ne fournira une augmentation que d'un bit par seconde par hertz (bit/s/Hz).

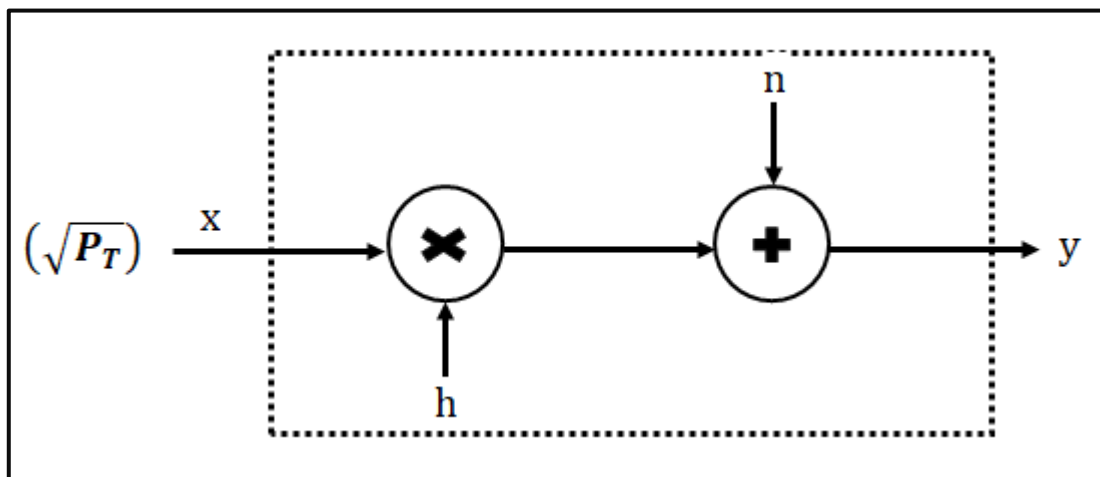


Figure II.16 : Système SISO

II.5.2 Canal SIMO

Un canal SIMO (Single Input, Multiple Output), est un système multi-antennes (Figure II.16) (réalisant par exemple, de la formation de voix en réception) avec une antenne à l'émission et N antennes à la réception. Avec h_i le gain complexe entre l'antenne émettrice et la $i^{\text{ème}}$ antenne réceptrice, sa capacité sera alors :

$$C = \log_2(1 + \gamma \sum_{i=1}^N \gamma |h_i|^2) \quad \text{bit/s/Hz} \quad (\text{II.4})$$

Sa capacité de Shannon est donnée par :

$$C_t = E(C) = \log_2(1 + \gamma N^2) \quad \text{bit/s/Hz} \quad (\text{II.5})$$

Avec, $E(\sum_{i=1}^N \gamma |h_i|^2) = N^2$.

CHAPITRE II : Accès multiple non orthogonal et ses variantes

Nous constatons que sa capacité augmente en fonction du logarithmique de $1 + \rho R N^2$, soit un peu plus vite que dans le cas SISO.

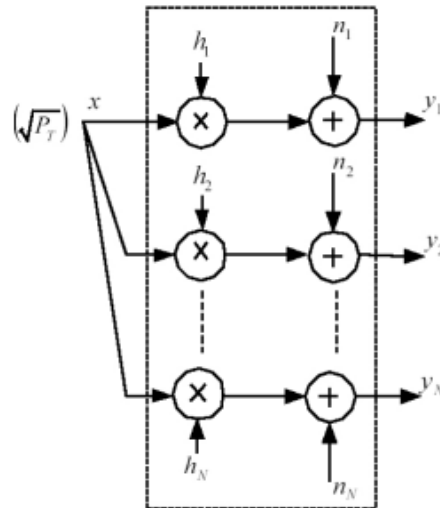


Figure II.17 : Système SIMO

II.5.3 Canal MIMO :

Pour un canal MIMO (Figure II.17), avec M antennes émettrices et N antennes réceptrices,

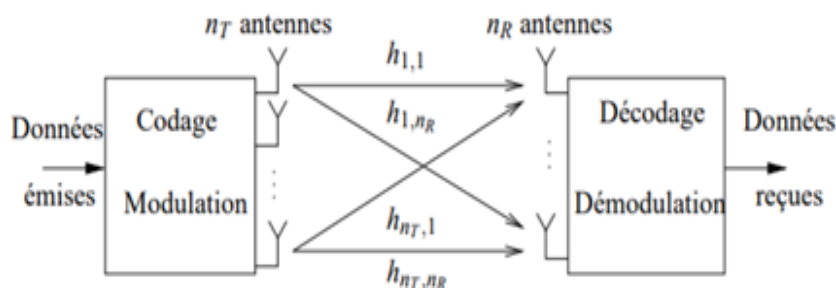


Figure II.18 : Système MIMO.

La matrice complexe H du canal peut alors s'écrire :

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdot & \cdot & h_{1M} \\ \cdot & h_{22} & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ h_{N1} & h_{N2} & \cdot & h_{NM} \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

h_{ij} est le gain complexe du canal entre la $j^{\text{ème}}$ antenne émettrice et la $i^{\text{ème}}$ antenne réceptrice.

$$C = \log_2 \left(\det \left[I_N + \frac{\gamma}{M} H H^H \right] \right) \quad \text{bit/s}/H_z \quad (\text{II.7})$$

Lorsque N et M sont grands, l'espérance de la capacité pour un canal de Rayleigh croît proportionnellement à N : $E[C] \approx N \log_2(1 + \gamma) \quad \text{bit/s}/H_z$.

CHAPITRE II : Accès multiple non orthogonal et ses variantes

La capacité augmente donc beaucoup plus vite que dans les cas SISO et SIMO grâce au grand nombre d'antennes [14].

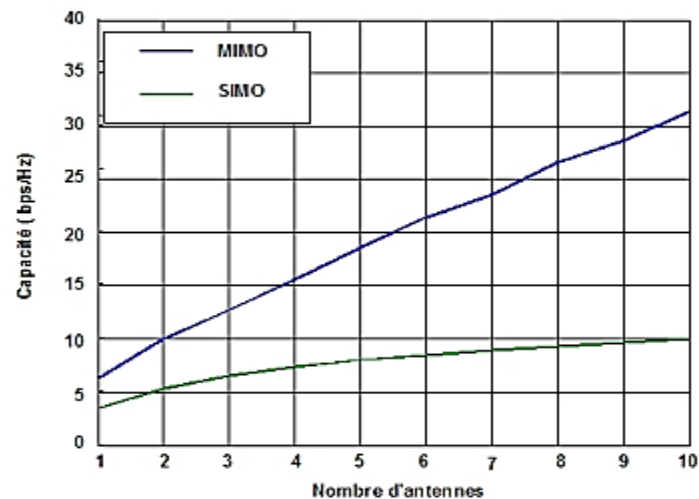


Figure II.19 : Variation de la capacité dans un système SIMO en fonction de N antennes réceptrices et MIMO en fonction de M antennes émettrices et N antennes réceptrices.

II.6 Liaison descendante MIMO

Considérons un système de communication en liaison descendante dans lequel un émetteur unique avec M antennes envoie des données à plusieurs récepteurs (utilisateurs), les utilisateurs sont regroupés de manière aléatoire en M grappes avec deux utilisateurs dans chaque grappe, chaque utilisateur est supposé être équipé de N antennes ($N \geq M$).

Les canaux sont supposés être quasi-statiques, indépendants et identiquement distribués (i.i.d.) et peuvent être soumis à n'importe quelle distribution, par exemple la distribution de Rayleigh [16].

Pour le k-ième utilisateur dans la m-ième grappe c'est-à-dire l'utilisateur (m, k) , $m \in \{1, 2, \dots, M\}$

- $H_{m,k} \in \mathbb{C}^{N \times M}$ Désigne le canal de liaison descendante pour l'utilisateur (m, k)
- $n_{m,k} \in \mathbb{C}^N$ Représente le bruit gaussien additif blanc normalisé au niveau de l'utilisateur (m, k).
- \mathbf{P} représente la matrice de pré-codage $M \times M$ utilisée par la station de base.
- $v_{m,k}$ Représente le vecteur de détection $N \times 1$ pour l'utilisateur (m, k).

Après la conception des matrices de détection et des matrices de pré-codage, nous avons $|v_{m,k}|^2 = 1$ et $P = I_M$ est la matrice d'identité $M \times M$, qui ce qui fait que $v_{m,k} H_{m,k} P_n = 0$ pour tout $m \neq n$.

Les deux techniques de transmission de données à examiner sont les suivants :

- MIMO-OMA
- MIMO-NOMA.

II.6.1 MIMO-OMA

Les systèmes OMA répartissent les degrés de liberté (temps ou fréquence) entre les deux utilisateurs de chaque grappe [15]. Considérons un système MIMO-OMA qui attribue une fraction α ($0 \leq \alpha \leq 1$) des degrés de liberté à l'utilisateur (m, 2) et $1 - \alpha$ à l'utilisateur (m, 1) le 1 restant à l'utilisateur (m, 1).

Soit $\gamma\rho/\alpha$ ($0 \leq \gamma \leq 1$) le SNR d'émission attribué à l'utilisateur (m, 2) et donc le SNR d'émission attribué à l'utilisateur (m, 1) est $(1 - \gamma)\rho/(1 - \alpha)$.

Alors la région de capacité du canal MIMO-OMA à deux utilisateurs est :

$$R_{m,1}^{MIMO-OMA} \leq (1 - \alpha) \log_2 \left(1 + \frac{(1-\gamma)\rho |v_{m,1}^H H_{m,1} p_m|^2}{(1-\alpha)} \right) \quad (\text{II.8})$$

$$R_{m,2}^{MIMO-OMA} \leq \alpha \log_2 \left(1 + \frac{\gamma\rho |v_{m,2}^H H_{m,2} p_m|^2}{\alpha} \right) \quad (\text{II.9})$$

Selon l'inégalité de Jensen et la concavité de $\log(\cdot)$, nous avons :

$$\begin{aligned} & R_{m,1}^{MIMO-OMA} + R_{m,2}^{MIMO-OMA} \\ & \leq \log_2 \left(1 + (1 - \alpha) \frac{(1 - \gamma)\rho |v_{m,1}^H H_{m,1} p_m|^2}{(1 - \alpha)} + \alpha \frac{\gamma\rho |v_{m,2}^H H_{m,2} p_m|^2}{\alpha} \right) \\ & = \log_2 \left(1 + \rho(1 - \gamma) |v_{m,1}^H H_{m,1} p_m|^2 + \gamma\rho |v_{m,2}^H H_{m,2} p_m|^2 \right) \quad (\text{II.10}) \end{aligned}$$

Cette égalité est réalisable si la condition suivante est vraie :

$$\frac{\gamma\rho |v_{m,2}^H H_{m,2} p_m|^2}{\alpha} = \frac{(1-\gamma)\rho |v_{m,1}^H H_{m,1} p_m|^2}{(1-\alpha)}.$$

Alors la fraction optimale des degrés de liberté pour l'utilisateur (m, 2) qui correspond au taux d'addition maximal réalisable taux de somme de $R_{m,1}^{MIMO-OMA}$ et $R_{m,2}^{MIMO-OMA}$ est :

$$\alpha^* = \frac{\gamma |v_{m,2}^H H_{m,2} p_m|^2}{\gamma |v_{m,2}^H H_{m,2} p_m|^2 + (1-\gamma) |v_{m,1}^H H_{m,1} p_m|^2} \quad (\text{II.11})$$

La fraction optimale des degrés de liberté pour l'utilisateur (m, 1) correspond au taux de somme maximal réalisable $R_{m,1}^{MIMO-OMA}$ et $R_{m,2}^{MIMO-OMA}$ est $1 - \alpha^*$.

Avec cette allocation de degrés de liberté, la capacité du canal pour les utilisateurs (m, 1) et (m, 2) obtenue par MIMO-OMA peut être réécrite comme suit :

$$C_{m,1}^{MIMO-OMA^*} = \frac{(1-\gamma)|v_{m,1}^H H_{m,1} p_m|^2}{\gamma|v_{m,2}^H H_{m,2} p_m|^2 + (1-\gamma)|v_{m,1}^H H_{m,1} p_m|^2} \times \log_2 \left(1 + \rho(1-\gamma)|v_{m,1}^H H_{m,1} p_m|^2 + \gamma\rho|v_{m,2}^H H_{m,2} p_m|^2 \right) \quad (III.12)$$

$$C_{m,2}^{MIMO-OMA^*} = \frac{\gamma|v_{m,2}^H H_{m,2} p_m|^2}{\gamma|v_{m,2}^H H_{m,2} p_m|^2 + (1-\gamma)|v_{m,1}^H H_{m,1} p_m|^2} \times \log_2 \left(1 + \rho(1-\gamma)|v_{m,1}^H H_{m,1} p_m|^2 + \gamma\rho|v_{m,2}^H H_{m,2} p_m|^2 \right) \quad (II.13)$$

II.6.2 MIMO-NOMA

Un système MIMO-NOMA utilise le codage par superposition au niveau de l'émetteur et le SIC au niveau du récepteur. Les signaux à envoyer aux différents utilisateurs par la station de base en liaison descendante sont multiplexés au niveau de l'émetteur à l'aide du codage par superposition en attribuant différents niveaux de puissance en fonction du gain du canal. La puissance élevée est attribuée à l'équipement utilisateur (UE) situé loin de la station de base et la puissance la plus faible à l'UE proche de la station de base (BS) [15]. Cette dernière est limitée par la puissance qui peut être fournie par la station de base.

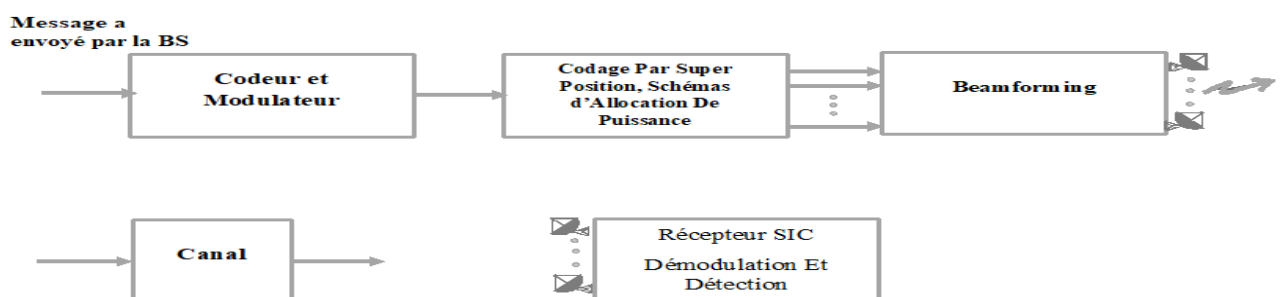


Figure II.20 : Schéma fonctionnel de base de l'émetteur et du récepteur MIMO-NOMA en liaison descendante.

Les blocs terminaux d'émission du système MIMO-NOMA comprennent :

- Le codage du canal,
- La modulation,
- Le codage par superposition
- La formation de faisceau.

CHAPITRE II : Accès multiple non orthogonal et ses variantes

Les schémas de codage de canal utilisés dans la 5G comprennent les codes polaires, turbo, les codes de contrôle de parité à faible densité (LDPC) et les techniques de modulation telles que 16-QAM, 64-QAM et 256-QAM qui permettent d'obtenir un débit plus élevé.

La formation de faisceau est conçue en tenant compte de la puissance et du domaine angulaire. La formation aléatoire de faisceaux est simple et efficace car elle réduit le retour d'information sur l'état du canal (CSI).

Le signal transmis peut être exprimé mathématiquement par l'équation (II.14).

$$x = P \tilde{s} \quad (\text{II.14})$$

$$\tilde{s} = \begin{bmatrix} \alpha_{1,1} s_{1,1} & + \dots + & \alpha_{1,k} s_{1,k} \\ & \dots & \\ \alpha_{M,1} s_{M,1} & + \dots + & \alpha_{M,k} s_{M,k} \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} \tilde{s}_1 \\ \dots \\ \tilde{s}_M \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

Où :

S : est le signal modulé,

P : est la matrice de pré-codage,

M : est le nombre d'antennes d'émission,

K : le nombre d'UE dans une grappe

α : le coefficient d'allocation de puissance.

$$\alpha = \sqrt{\beta P'} \quad (\text{II.16})$$

Dont β est une fraction et P' est la puissance totale qui peut être transmise par l'antenne de la station de base.

Chaque ligne de la matrice fournie dans l'équation (II.15) indique le codage de superposition. β est choisi en fonction de la politique d'attribution de puissance. Le facteur d'allocation de puissance est indiqué dans l'équation (II.16), et la somme de la puissance allouée à tous les utilisateurs est égale à la puissance pouvant être transmise par la station de base.

À l'extrémité du récepteur, l'estimation du canal, la démodulation et la détection à l'aide de SIC sont effectuées. L'évaluation du canal est effectuée sur :

- La base de la matrice de covariance du canal,
- La transformée de Fourier discrète (DFT),
- La détection par compression (CS).

La détection et le décodage du signal sont effectués à l'aide du SIC.

Dans la pratique, le décodage du maximum de vraisemblance est préféré dans les systèmes 5G car il donne le mot de code le plus probable.

Le signal reçu par le $K^{\text{ème}}$ utilisateur peut être exprimé par l'équation (II.17).

CHAPITRE II : Accès multiple non orthogonal et ses variantes

$$y_{1,k} = H_{1,k} P \tilde{s} + n_{1,k} \quad (\text{II.17})$$

Où :

H est une matrice de canal d'évanouissement de Rayleigh $N \times M$

n : est un bruit blanc gaussien additif (AWGN).

Les matrices de pré-codage et de détection satisfont la condition suivante

$$v_{m,k}^H H_{m,k} p_m = 0 \quad (\text{II.18})$$

Où

v : est la matrice de détection.

v est obtenu à partir de l'espace nul de \tilde{H} (canal estimé).

Après avoir appliqué le vecteur de détection, le modèle de signal peut être réécrit comme suit :

$$V_{m,k}^H y_{m,k} = v_{m,k}^H H_{m,k} P \tilde{s} + v_{m,k}^H n_{m,k} \quad (\text{II.19})$$

En désignant la $m^{\text{ième}}$ colonne de P par p_m , le modèle de signal ci-dessus peut être réécrit comme suit :

$$V_{m,k}^H y_{m,k} = v_{m,k}^H H_{m,k} p_m (\lambda_{m,1} s_{m,1} + \lambda_{m,2} s_{m,2}) + \sum_{n=1, n \neq m}^M v_{m,k}^H H_{m,k} P \tilde{s} + v_{m,k}^H n_{m,k} \quad (\text{II.20})$$

Sans perte de généralité, nous supposons que les gains effectifs des canaux sont ordonnés par :

$$|v_{m,1}^H H_{m,1} p_m|^2 \geq |v_{m,2}^H H_{m,2} p_m|^2, \quad m \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (\text{II.21})$$

C'est-à-dire que nous supposons que l'utilisateur de premier ordre dans la $m^{\text{ème}}$ grappe (utilisateur (m, 1)) bénéficie de meilleures conditions de canal et que le deuxième utilisateur ordonné dans la m -ième grappe (utilisateur (m, 2)) a des conditions de canal plus mauvaises, ce qui signifie que l'utilisateur (m, 1) peut être situé près de la station de base et l'utilisateur (m, 2) peut être éloigné de la station de base.

Suivant le principe de NOMA, les coefficients d'allocation de puissance des utilisateurs sont ordonnés comme suit :

$$\lambda_{m,1} \leq \lambda_{m,2} \quad (\lambda_{m,1} + \lambda_{m,2} = 1, \quad m \in \{1, 2, \dots, M\}) \quad (\text{II.22})$$

Dans le décodage SIC, l'utilisateur (m, 2) décodera directement son propre signal $s_{m,2}$ porteur d'informations en traitant le signal $s_{m,1}$ comme un signal de base portant le signal $s_{m,2}$ directement en traitant le signal $s_{m,1}$ comme une interférence. Soit $\lambda = \lambda_{m,2}$ alors le taux réalisable pour l'utilisateur (m, 2) est limité par (II.24), comme indiqué en haut de la page suivante, où désigne le rapport signal/bruit d'émission (SNR).

CHAPITRE II : Accès multiple non orthogonal et ses variantes

Sur la base du principe de décodage SIC, après que l'utilisateur (m, 1) a réussi à décoder le message de l'utilisateur (m, 2), il reconstruit le signal de l'utilisateur (m, 2) et le supprime de l'ensemble des signaux reçus. Ensuite, l'utilisateur (m, 1) décode son propre message.

Le taux réalisable pour l'utilisateur (m, 1) est limité par :

$$R_{m,1}^{MIMO-NOMA} \leq \log_2 \left(1 + \frac{\rho(1-\lambda)|v_{m,1}^H H_{m,1} p_m|^2}{\rho \sum_{n=1, n \neq m}^M v_{m,1}^H H_{m,1} p_m} \right) = \log_2 \left(1 + \rho(1-\lambda)|v_{m,1}^H H_{m,1} p_m|^2 \right) \quad (\text{II.23})$$

$$R_{m,2}^{MIMO-NOMA} \leq \log_2 \left(1 + \frac{\rho\lambda|v_{m,2}^H H_{m,2} p_m|^2}{\rho(1-\lambda)|v_{m,2}^H H_{m,2} p_m|^2 + \rho \sum_{n=1, n \neq m}^M v_{m,2}^H H_{m,2} p_m} \right) = \log_2 \left(1 + \frac{\rho\lambda|v_{m,2}^H H_{m,2} p_m|^2}{\rho(1-\lambda)|v_{m,2}^H H_{m,2} p_m|^2} \right) \quad (\text{II.24})$$

II.7 Avantages de MIMO-NOMA par rapport au MIMO-OMA

D'après ce qu'on a illustré précédemment les deux technique OMA et NOMA on présenter une meilleure performance en fusion avec le système MIMO. Mais la technique MIMO-NOMA a dominé son concurrent MIMO-OMA sous plusieurs aspects, tels que :

- Elle atteint une efficacité spectrale supérieure en desservant plusieurs utilisateurs en même temps et avec la même ressource de fréquence, et en atténuant les interférences via SIC,
- Elle augmente le nombre d'utilisateurs servis simultanément et peut ainsi prendre en charge une connectivité massive,
- L'utilisateur n'a pas besoin de passer par un intervalle de temps programmé pour transmettre ses informations, par conséquent, il subit une latence plus faible,
- NOMA peut maintenir l'équité des utilisateurs et une qualité de service diversifiée par un contrôle flexible de la puissance entre les utilisateurs forts et faibles.

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la technique NOMA et abordé ces deux opérations de base, SC et SIC. Nous avons également vu les différents types d'antennes (SISO, SIMO, MIMO), où nous avons étudié la capacité du canal pour chacun d'eux. MIMO avait l'avantage. C'est ce qui nous a fait penser à le combiner avec la technologie mentionnée précédemment pour obtenir de meilleures performances



Chapitre III
Éfficacité énergétique d'un
systeme NOMA multi-
utilisateurs en présence d'un
dispositif de rétrodiffusion



CHAPITRE III : Efficacité énergétique d'un système NOMA multi-utilisateurs en présence d'un dispositif de rétrodiffusion

III.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous allons étudier l'efficacité énergétique des systèmes à accès multiple non orthogonal (NOMA) multi-utilisateurs en présence d'un dispositif de rétrodiffusion. Tout d'abord, nous allons expliquer le principe général de transfert d'énergie sans fil. Puis, nous allons donner une définition d'un dispositif de rétrodiffusion, son fonctionnement, ces utilisations (Internet des objets par exemple IoT) et ces avantages. Le problème de maximisation de l'efficacité énergétique est formulé comme un compromis entre le débit total et la consommation totale d'énergie non convexe. Le coefficient de réflexion optimale va être dérivé en forme fermée, l'expression obtenue nous permet d'optimiser la politique d'allocation de puissance en un problème d'optimisation convexe, qui est résolu en forme fermée. Visant à maximiser le rapport entre le débit et la puissance totale, la solution précédente est exploitée pour réduire la complexité du calcul d'algorithme de Dinkelbach. Dans le cas de programmation fractionnaire linéaire, la méthode de Dinkelbach réduit la solution d'un problème à la solution d'une séquence de programmes linéaire.

III.2 Architecture classique d'un système de transfert d'énergie sans fil

Dans ce qui suit, nous allons expliquer comment fonctionne une chaîne de puissance d'émission et de réception sans fil. La figure III.1 représente l'architecture typique d'une chaîne d'émission réception de puissance complète.

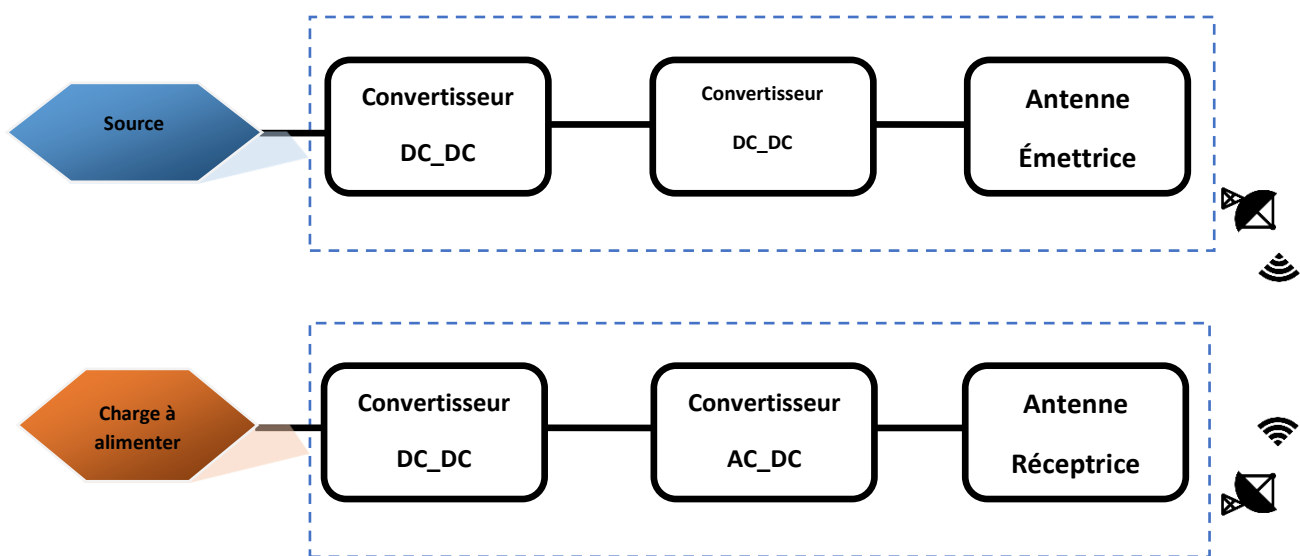


Figure III.1 : Architecture typique d'une chaîne d'émission réception de puissance sans fil

CHAPITRE III : Efficacité énergétique d'un système NOMA multi-utilisateurs en présence d'un dispositif de rétrodiffusion

Les systèmes de transfert d'énergie sans fil se basent sur l'architecture de fonctionnement précédent. On suppose qu'on veut charger une batterie lointaine sans fils.

Pour cela le circuit d'émission est une source d'alimentation (batterie), on ajoute un étage de conversion DC-DC dans le but de pouvoir commander le système d'amplification de puissance qui généralement fonctionne en convertissant une puissance DC a une puissance AC. Le dispositif est relié à une antenne d'émission. Cette dernière rayonne la puissance AC à travers l'espace sous forme d'une onde électromagnétique (OEM). Cette OEM sera dans notre cas de type THF pour un rayonnement RF (Télécommunication). Au récepteur la même procédure est applique de façon inverse. L'OEM est capté par l'antenne réceptrice connecté à un convertisseur AC-DC. L'énergie AC transformé en DC peut être utilisé pour charger la batterie au niveau de la réception

III.3 L'efficacité énergétique c'est quoi ?

L'efficacité énergétique d'un système est le rapport énergétique entre la quantité d'énergie délivrée et la quantité d'énergie absorbée. Moins de perte il y a et meilleure efficacité énergétique, l'efficacité énergétique est ainsi liée à l'optimisation du rendement. L'augmentation de l'efficacité énergétique permet ainsi de réduire les consommations d'énergie, à service rendu égal. En découle la diminution des coûts écologiques, économiques et sociaux liés à la production et à la consommation d'énergie.

III.4 La communication par rétrodiffusion

La rétrodiffusion est une méthode qui utilise un signal radiofréquence (RF) incident pour transmettre des données sans batterie ni source d'alimentation. Il utilise la réflexion passive et la modulation du signal RF entrant et le convertit en dizaines ou centaines de microwatts d'électricité, qui peuvent être codés pour les communications de données. C'est-à-dire qu'elle nécessite peu d'énergie et qu'elle est peu complexe à déployer. La rétrodiffusion présente un nouveau paradigme de communication sans fil la communication est de nature semi-duplex, l'expéditeur et le destinataire ne peuvent pas transmettre simultanément.

III.5 Architecture d'un dispositif de rétrodiffusion

Un dispositif de rétrodiffusion est composé de plusieurs bloc. Un de récupération d'énergie, une batterie, d'un bloc de modulation et d'un décodeur d'information.

CHAPITRE III : Efficacité énergétique d'un système NOMA multi-utilisateurs en présence d'un dispositif de rétrodiffusion

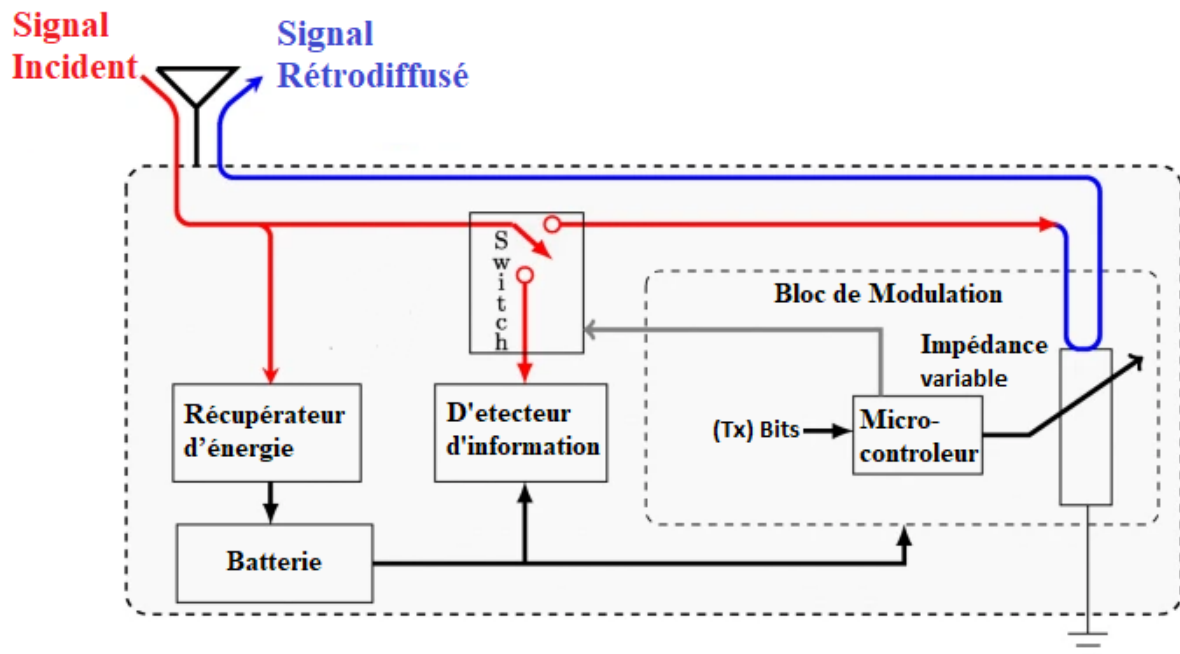


Figure III.2 : L'architecture d'un rétro-diffuseur

Soit un signal envoyé par un émetteur. Un composant passif (récupérateur d'énergie) récupère et stock l'énergie de l'onde sinusoïdale incidente au niveau d'une batterie qui sera utilisée pour alimenter le circuit. Une fraction de l'onde sera modulée et réfléchi vers le récepteur. Cette réflexion est due à une désadaptation intentionnelle entre l'antenne d'émission et l'impédance de charge variable, la variation de cette dernière agit sur le coefficient de réflexion qui varie suivant une séquence aléatoire en modulant l'onde réfléchi avec les bits d'information.

III.6 Utilisation des communications par rétrodiffusion

III.6.1 Communication par rétrodiffusion, MIMO

La rétrodiffusion introduit une structure de canal spéciale pour la transmission d'informations vers l'arrière dans un système de communication par rétrodiffusion à entrées multiples et sorties multiples (MIMO), appelé canal MIMO dynamique, qui capture l'évanouissement composite dans les canaux aller et retour. Pour être précis, les signaux envoyés par les antennes d'émission du lecteur se propagent à travers le canal MIMO aller et sont d'abord combinés à chaque antenne de l'étiquette puis rétrodiffusés, et enfin se propagent à travers le canal MIMO arrière pour arriver aux antennes de réception de lecteur. Le canal

CHAPITRE III : Efficacité énergétique d'un système NOMA multi-utilisateurs en présence d'un dispositif de rétrodiffusion

MIMO dyadique résultant a une structure similaire à celle du canal MIMO en trou de serrure classique. Le codage spatio-temporel est une technique simple mais adaptée pour réaliser le gain en diversité d'un tel canal. En adoptant un codage spatio-temporel, il a été prouvé que l'ordre de diversité maximum réalisable est égal au nombre d'antennes de l'étiquette. En d'autres termes, contrairement au canal MIMO classique, l'augmentation du nombre d'antennes de réception au niveau du lecteur ne peut pas améliorer en permanence la fiabilité de la transmission d'informations vers l'arrière.

III.6.2 Communication par rétrodiffusion et l'Internet des Objets (IoT)

Dans une maison intelligente, un grand nombre de capteurs de rétrodiffusion passifs peuvent être placés à des emplacements flexibles (par exemple, intégrés dans les murs, les plafonds et les meubles). Ils sont libérés des contraintes liées à la recharge ou au remplacement des batteries car un ou plusieurs balises de puissance internes peuvent être déployés pour alimenter simultanément tous les capteurs ou sinon ils peuvent fonctionner sur la récupération d'énergie ambiante. Les tâches effectuées par les capteurs ont un large éventail, telles que la détection de fuite de gaz, de fumée et de CO, la surveillance des mouvements, le positionnement à l'intérieur et la surveillance. Par exemple, les poubelles intelligentes basées sur la rétrodiffusion communication sont capables de surveiller leurs niveaux de déchets et de communiquer les informations aux camions à ordures passant par rétrodiffusion, rationalisant ainsi le processus de collecte des déchets. Un autre exemple est que les robots domestiques sont capables d'utiliser les signaux rétrodiffusés des balises situées sur les portes et les meubles pour la navigation intérieure

III.7 Les avantages de la rétrodiffusion

Essentiellement, la radio rétrodiffusion permet des communications sans fil. Des communications via un processus connu sous le nom de « réflexion » plutôt que par rayonnement. Cette approche permet la transmission de données sans avoir besoin de piles ou de connexions au réseau électrique. Elle utilise ainsi une antenne pour capter les signaux radiofréquence.

Les radios à rétrodiffusion présentent plusieurs avantages. De faibles coûts de fabrication, une complexité minimale et la possibilité de fonctionner sans piles sont parmi les plus importants. Cependant, pour atteindre des débits de données élevés et une faible

CHAPITRE III : Efficacité énergétique d'un système NOMA multi-utilisateurs en présence d'un dispositif de rétrodiffusion

consommation d'énergie, ces outils peuvent avoir besoin d'être intégrés à des techniques de communication sans fil plus avancées.

III.8 Modèle de système de communication étudié et formulation du problème

On considère un système à liaison descendante composé d'une station de base (BS) émettant à $K \geq 2$ récepteurs ou utilisateurs en présence d'un seul dispositif de rétrodiffusion d'aide [27].

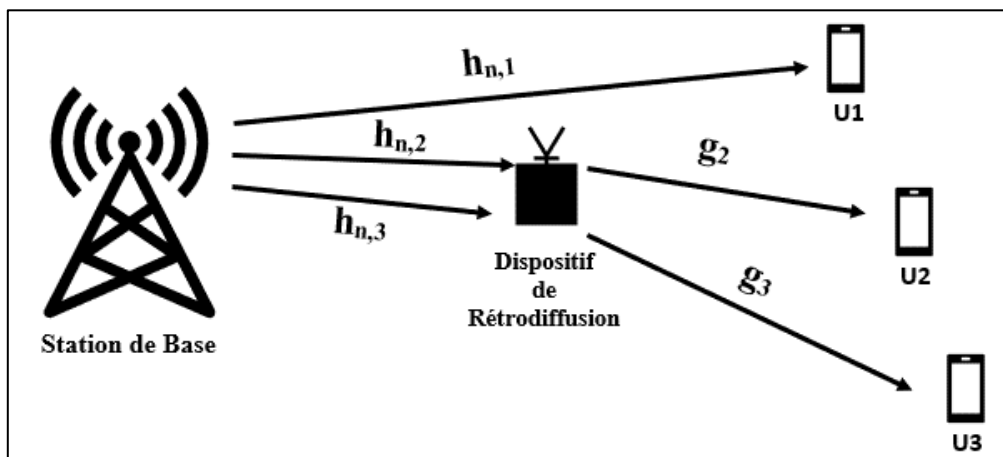


Figure III.3 : Modèle de système d'antennes multiples rétrodiffusées NOMA

Dans chaque intervalle de temps t , la station de base utilise un codage par superposition et diffuse le signal $x(t) = \sum_{i=1}^k \sqrt{p_i} x_i(t)$ où

$x_i(t)$: désigne le message,

p_i : puissance allouée par la station de base à l'utilisateur « i » avec $i \in \{1, \dots, k\}$ respectivement [27].

Au niveau de dispositif d'aide (BD) son signal $b(t)$ est modulé, le signal incident sera rétrodiffusé au k utilisateurs tout en ajustant son coefficient de réflexion ρ ($\rho \in [1,2]$).

Au niveau du dispositif de rétrodiffusion on suppose que les délais de traitement et de propagation et même le bruit sont négligeables. Le signal reçu pour chaque utilisateur k est exprimé par :

$$y_k(t) = h_k x(t) + \sqrt{\rho} g g_k x(t) b(t) + z_k(t) \quad \text{[III.1]}$$

Où

CHAPITRE III : Efficacité énergétique d'un système NOMA multi-utilisateurs en présence d'un dispositif de rétrodiffusion

- h_k : désignent le gain du canal entre la station de base et l'utilisateur k ,
- g : est le gain du canal entre la station de base et le dispositif de rétrodiffusion
- g_k : c'est le gain de canal entre le dispositif de rétrodiffusion et l'utilisateur k .

Les différentes liaisons pour les systèmes de communication par rétrodiffusion sont généralement supposées avoir une forte ligne de visée (line-of-sight LOS).

On considère un modèle de canal avec seulement un affaiblissement de trajet (path loss) du type $d^{-\eta}$

- d : est la distance entre l'émetteur et le récepteur
- η : est l'exposant d'affaiblissement du chemin
- La quantité $z_k(t)$ dépend du variant σ_k^2 est le bruit additif blanc gaussien au niveau du récepteur k et
- $b(t)$: est le message transmis par le dispositif de rétrodiffusion.

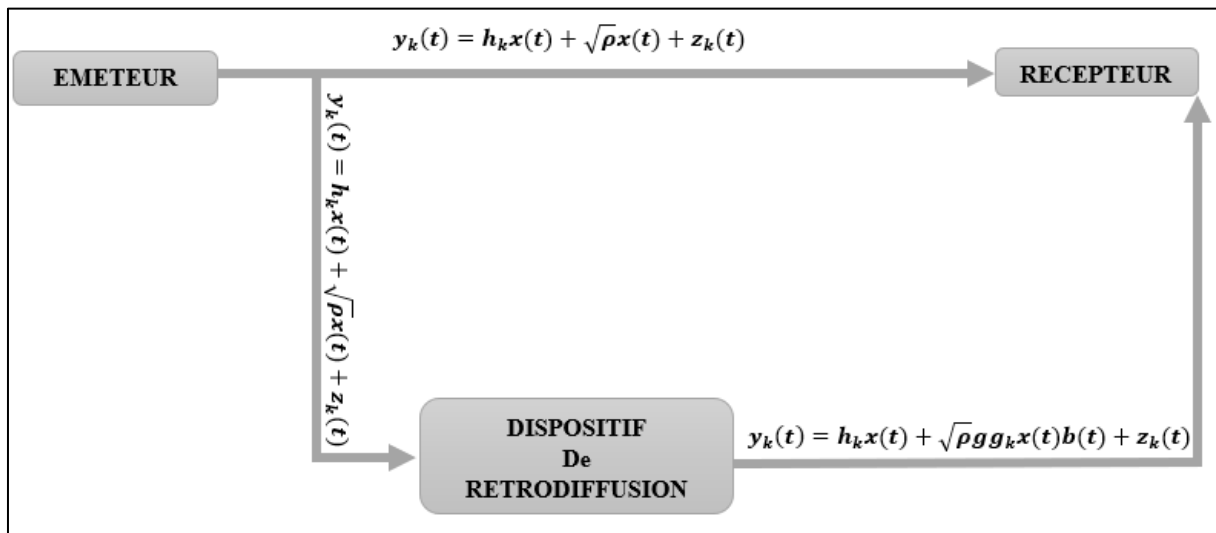


Figure III.4 : Schéma illustrant le signal transmis avec et sans BD

Tant que le dispositif de rétrodiffusion a généralement un débit de données beaucoup plus faible que celui de la station de base, on considère $b(t)$ constant ($b(t) = 1$) pendant une période suffisamment longue au cours de laquelle le message $x(t)$ est transmis.

Le signal reçu s'écrit donc comme suit :

$$y_k(t) = h_k x(t) + \sqrt{\rho} g g_k x(t) + z_k(t) \quad \text{[III.2]}$$

CHAPITRE III : Éfficacité énergétique d'un système NOMA multi-utilisateurs en présence d'un dispositif de rétrodiffusion

Tout au long de ce chapitre, on suppose que l'état d'information du canal au niveau de BS est parfait, sans restreindre la généralité et que les canaux sont ordonnés comme suit :

$$h_1^2/\sigma_1^2 \geq h_2^2/\sigma_2^2 \geq \dots \geq h_K^2/\sigma_K^2.$$

Chaque utilisateur appliquera SIC pour récupérer son message.

Dans ce qui suit, l'ordre de SIC est fixe et dépend uniquement de l'ordre de la station de base relatif aux gains de canal d'utilisateur.

L'utilisateur k commence par décoder les l'interférence de tous les utilisateurs j , de sorte que $k \geq j \geq k + 1$ et subit l'interférence des utilisateurs $1 \leq j \leq k - 1$.

Le débit réalisable de l'utilisateur k est :

$$R_k(\rho, P) = C(\min_i(\gamma_{k \rightarrow i})), \quad \forall i, k \in \{1, \dots, K\} \quad [\text{III.3}]$$

Où

- $P = (p_1, \dots, p_k)$ est le vecteur d'allocation de puissance,
- $C(x) = 1/2 \log_2(1 + x)$ désigne la capacité Shannon,
- $\gamma_{k \rightarrow i}$ est le signal-to-interference-plus-noise ratio (SINR) pour décoder le message destiné à l'utilisateur k au récepteur i , défini comme suit

$$\gamma_{k \rightarrow i} = \frac{(h_i + \sqrt{\rho} g g_i)^2 p_k}{(h_i + \sqrt{\rho} g g_i)^2 (p_1, \dots, p_{k-1}) + \sigma_i^2} \quad [\text{III.4}]$$

La BS est limitée par un plafond de puissance totale disponible tel que $\sum_k p_k \leq P_{max}$ et chaque UE a un débit minimum QoS contrainte exprimée comme suit

$$R_k(\rho, P) \geq R_{min,k}$$

Pour simplifier la présentation, les notations suivantes seront utilisées dans la suite du chapitre :

- $A_k = 2^{2R_{min,k}}$,
- $\theta_k = \sum_i^k p_i$, avec $\theta_0 = 0$,
- $H_k = h_k/\sigma_k$,
- $G_k = g g_k/\sigma_k$,
- $\Gamma_k(\rho) = (H_k + \sqrt{\rho} G_k)^2$.

Avec ces notations l'ordre supposé du canal devient

$$H_1^2 \geq H_2^2 \geq \dots \geq H_K^2.$$

CHAPITRE III : Efficacité énergétique d'un système NOMA multi-utilisateurs en présence d'un dispositif de rétrodiffusion

III.8.1 Compromis entre le débit et la consommation d'énergie

Pour garantir l'ordre de décodage de SIC décrit ci-dessus, le SINR doit respecter les conditions suivantes :

$$\gamma_{k \rightarrow i} \geq \gamma_{k \rightarrow k}, \forall k > 1, \forall i < k.$$

Dans ce cas, le débit réalisable pour l'utilisateur k se simplifie en

$$R_k(\rho, P) = C(\gamma_{k \rightarrow K}) = \frac{1}{2} \log_2 \left(\frac{1 + \Gamma_k(\rho) \theta_k}{1 + \Gamma_k(\rho) \theta_{k-1}} \right) \quad [\text{III.5}]$$

Avec $\Gamma_k(\rho)$ est définis dans les notations ci-dessus.

L'efficacité énergétique est mesurée par le compromis scalarisé entre la somme des débits et la consommation d'énergie :

$$\sum_k R_k(\rho, P) - \alpha(\sum_k p_k + P_c), \text{ où}$$

- $\alpha \geq 0$: est paramètre qui permet de trouver un compromis entre le débit du réseau réalisable et la consommation énergétique du réseau,
- P_c : représente la consommation d'énergie du circuit.

En gros, le problème de maximisation de l'efficacité énergétique (energy efficiency « EE ») à l'étude se présente comme suit :

$$\begin{aligned} \text{(EE1)} \quad & \max_{\rho, P} \sum_{k=1}^K \frac{1}{2} \log_2 \left(\frac{1 + \Gamma_k(\rho) \theta_k}{1 + \Gamma_k(\rho) \theta_{k-1}} \right) - \alpha(\theta_k + P_c) \\ \text{s.t} \quad & \theta_k \leq P_{max}, \end{aligned} \quad (\text{C1})$$

$$\theta_k \geq A_k \theta_{k-1} + \frac{(A_k - 1)}{\Gamma_k(\rho)}, \forall k, \quad (\text{C2})$$

$$\gamma_{k \rightarrow i} \geq \gamma_{k \rightarrow k}, \forall k \geq 2, \forall i \leq k - 1, \quad (\text{C3})$$

$$0 \leq \rho \leq 1, \quad (\text{C4})$$

Où

(C1) la contrainte de puissance totale,

(C2) k individuelles QoS contraintes,

(C3) les contraintes de commande « SIC, SINR »,

(C4) le coefficient de réflexion de rétrodiffusion.

III.9 SOLUTION ÉNERGÉTIQUE EFFICACE À FORME FERMÉE

Le problème d'optimisation résultant (EE1) est non convexe à cause du couplage entre ρ et P un algorithme itératif basé sur la dualité et la descente de sous gradient est proposé. Ici,

CHAPITRE III : Efficacité énergétique d'un système NOMA multi-utilisateurs en présence d'un dispositif de rétrodiffusion

on montre que ce problème peut être résolu en forme fermée et dans le cas général multi-utilisateurs $K \geq 2$, sans nécessité d'une procédure itérative.

III.9.1 Coefficient de réflexion optimale

On commence par optimiser le coefficient de réflexion ρ pour un vecteur d'allocation de puissance qualitatif P dans le cas multi-utilisateur.

Théorème 1 :

Le coefficient de réflexion optimal ρ^* pour un vecteur d'allocation de puissance P fixe est donné par

$$\rho^* = \begin{cases} \min(1, \min \mathcal{R}), & \text{if } \mathcal{R} \neq \emptyset \\ 1, & \text{if } \mathcal{R} = \emptyset \end{cases} \quad \text{[III.6]}$$

D'où $\mathcal{R} \triangleq \left\{ \left(\frac{H_k - H_{k-1}}{G_k - G_{k-1}} \right)^2 \mid k \in \{2, \dots, K\}, G_k \geq G_{k-1} \right\}$.

Remarque : On note que le ρ^* optimal ci-dessus est indépendant de P , ce qui signifie que le découplage du problème d'optimisation de ρ et P n'entraîne aucune perte de d'optimalité.

De plus, sous ρ^* , la contrainte (C3) est satisfaite[27].

Les canaux sont ordonnés comme suit :

$$\Gamma_1(\rho^*) \geq \Gamma_2(\rho^*) \geq \dots \geq \Gamma_K(\rho^*)$$

Ça sera mis à profit pour trouver le vecteur d'allocation de puissance optimal P^* .

III.9.2 Optimisation du vecteur d'allocation de puissance

Étant donné le ρ^* optimal et en exploitant l'ordre du canal résultant ci-dessus

$$\Gamma_1(\rho^*) \geq \Gamma_2(\rho^*) \geq \dots \geq \Gamma_K(\rho^*)$$

On peut prouver que le problème d'optimisation (EE1) est équivalent au problème convexe plus simple ci-dessous

$$\begin{aligned} \text{(EE2)} \quad & \max_P \sum_{k=1}^K \frac{1}{2} \log_2 \left(\frac{1 + \Gamma_k(\rho^*) \theta_k}{1 + \Gamma_k(\rho^*) \theta_{k-1}} \right) - \alpha(\theta_k + P_c) \\ \text{s.t} \quad & \theta_k \leq P_{max}, \end{aligned} \quad \text{(C1')}$$

$$\theta_k \geq A_k \theta_{k-1} + \frac{(A_k - 1)}{\Gamma_k(\rho^*)}, \forall k, \quad \text{(C2')}$$

Le problème convexe résultant peut être résolu en forme fermée.

Pour être complet, on énonce les conditions de faisabilité nécessaires et suffisantes ainsi l'expression en forme fermée de la politique d'allocation optimale de la puissance P^* .

CHAPITRE III : Éfficacité énergétique d'un système NOMA multi-utilisateurs en présence d'un dispositif de rétrodiffusion

Le problème d'optimisation (EE2) est réalisable si et seulement si la condition suivante est vérifiée

$$P_{max} \geq P_{min} \triangleq \sum_{i=0}^K \frac{A_i - 1}{\Gamma_i(\rho^*)} \prod_{j=i+1}^K A_j$$

Théorème 2 :

Lorsque (EE2) est réalisable, la répartition optimale de la puissance est obtenue en forme fermée comme suit :

$$p_k^*(\alpha) = (A_i - 1) \left(\frac{1}{\Gamma_k(\rho^*)} + p_1^*(\alpha) \prod_{j=2}^K A_i + \sum_{i=2}^{K-1} \frac{A_i - 1}{\Gamma_i(\rho^*)} \prod_{j=i+1}^{K-1} A_j \right), \quad \forall k \geq 2, \quad [\text{III.7}]$$

$$p_1^*(\alpha) = \min \left(\max \left(\bar{p}_1(\alpha); \frac{A_1 - 1}{\Gamma_1(\rho^*)} \right); U_1 \right),$$

Avec

$$U_1 = \left(P_{max} - P_{min} + \frac{A_1 - 1}{\Gamma_1(\rho^*)} \prod_{j=2}^{K-1} A_j \right) / \prod_{i=2}^K A_i$$

$$\bar{p}_1(\alpha) = 1 / \left(2 \ln 2 \alpha \prod_{i=2}^K A_i \right) - \frac{1}{\Gamma_1(\rho^*)}$$

III.9.3 Rapport entre le débit d'addition et la consommation d'énergie

La solution optimale a forme fermé obtenue peut finalement être utilisé pour maximiser une mesure très reconnue « l'efficacité énergétique globale » définie par le rapport entre le débit réalisable et la consommation totale de puissance :

$$GEE(\rho, P) = \frac{\sum_{k=1}^K R_k(\rho, P)}{\sum_{k=1}^K p_k + P_c} \quad [\text{III.8}]$$

ρ Intervient que dans le numérateur.

En choisissant $\rho = \rho^*$ sa maximise la fonction objective de (EE2) et également $GEE(\rho, P)$ pour tous les P . Le découplage des variables n'entraîne aucune perte d'optimalité puisque le débit somme $\sum_k R_k(\rho^*, P)$ est une fonction concave par rapport à P

Maximisé $GEE(\rho^*, P)$ par rapport à P est un programme fractionnaire qui se réduit à chercher le point fixe de la fonction

CHAPITRE III : Efficacité énergétique d'un système NOMA multi-utilisateurs en présence d'un dispositif de rétrodiffusion

$$F(\alpha) = \sum_{k=1}^K FR_k(\rho^*, P^*) - \alpha(\sum_{k=1}^K p^* + P_c) \quad [\text{III.9}]$$

p^* est la solution analytique de (EE2) explicitée dans le Théorème 2

Cette recherche est effectuée via une procédure de Dinkelbach, présentée sur l'organigramme de la figure III.5, qui est réduite à une simple recherche linéaire grâce à notre solution analytique de (EE2). L'algorithme itératif de Dinkelbach, développé par Dinkelbach (1967), est une application de la méthode classique de Newton pour résoudre des modèles de programmation fractionnaire non linéaire convexe (NFP) en résolvant successivement une séquence de modèles de programmation non linéaire (PNL) [28].

Cet algorithme permet de traiter des fonctions objectives au numérateur concave et au dénominateur convexe.

Le principe de l'algorithme est de construire une suite de valeurs ($F(\alpha)$) convergente vers l'optimum du rapport $GEE(\rho, \mathbf{p})$. Cet algorithme est convergent vers une solution dont on fixe au préalable le coefficient d'approximation $\epsilon > 0$.

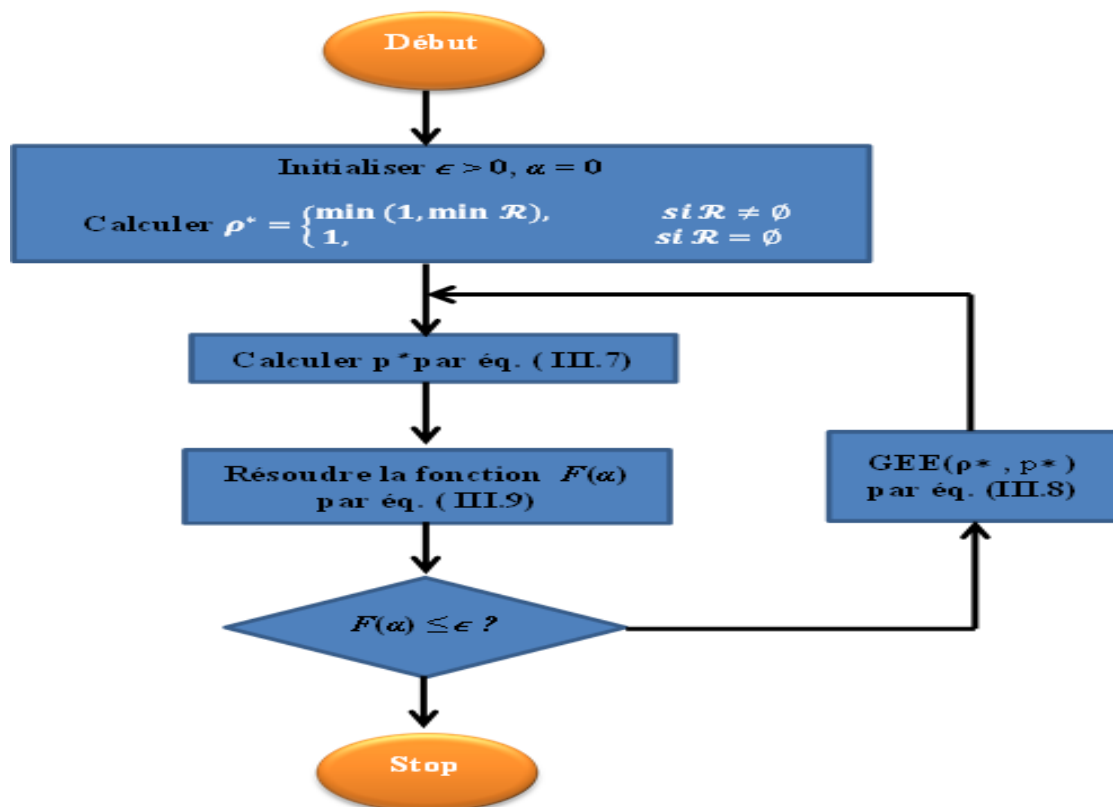


Figure III.5 : Procédure de l'algorithme de Dinkelbach

CHAPITRE III : Efficacité énergétique d'un système NOMA multi-utilisateurs en présence d'un dispositif de rétrodiffusion

Ainsi, comme le montre la figure III.5, la procédure de l'algorithme de Dinkelbach pour le problème discuté dans ce travail peut être implémentée comme suit :

Étape 1: Initialiser $\epsilon > 0$, $\alpha = 0$ et Calculer ρ^*

Étape 2 : Calculer \mathbf{p}^* par éq. (III.7)

Étape 3 : Résoudre le modèle $F(\alpha)$ (éq. III.9), et obtenir les valeurs α

Étape 4 : Si $F(\alpha) \leq \epsilon$, Arrêter, mettre à jour α et la solution optimal $GEE(\rho^*, \mathbf{p}^*)$, sinon aller à l'étape 2.

III.10 RÉSULTATS DE LA SIMULATION ET DISCUSSION

Dans cette partie du chapitre on va évaluer l'efficacité énergétique de la somme des débits au rapport à la conception énergétique GEE avec et sans dispositif de rétrodiffusion dans le cas des deux techniques NOMA et OMA. Avec un affaiblissement de propagation $\eta = 3$, la distance entre la BS et le BD est 10m, et entre le BD et l'utilisateur est 20m.

On mit $P_{max} = 80dBm$, $P_c = 30 dBm$, $\sigma_k^2 = \sigma^2 = -100dBm$ et $R_{min,k} = R_{min}$, $\forall k$

Tous les résultats satisfassent la condition de réalisabilité du problème EE2 et sont calculer en moyennant 10^5 . Pour ne pas opprimé la technique OMA, les k utilisateurs sont présumés être servis un équitable intervalle de temps, et en appliquant les même contrainte QoS.

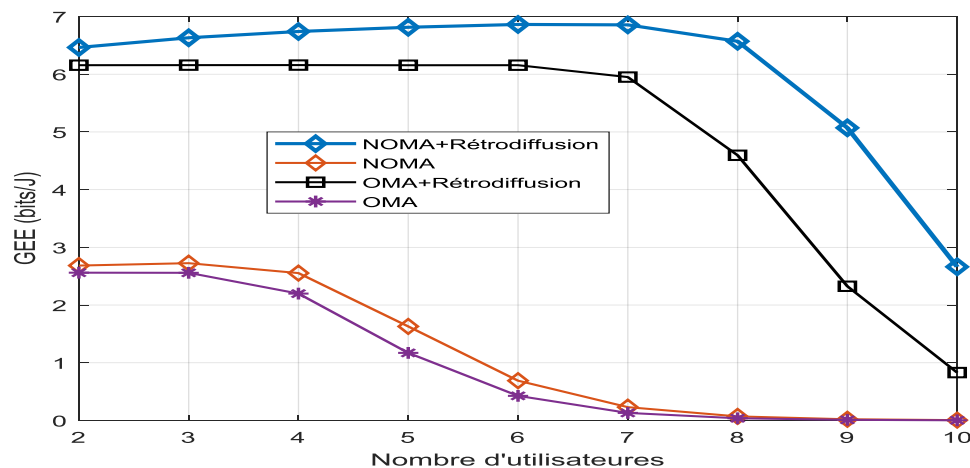


Figure III.6 : Efficacité énergétique (GEE) en fonction du nombre d'utilisateurs K pour $R_{min} = 1 \text{ bit/s}$.

CHAPITRE III : Efficacité énergétique d'un système NOMA multi-utilisateurs en présence d'un dispositif de rétrodiffusion

La figure III.6 représente l'efficacité énergétique avec et sans dispositif de rétrodiffusion dans le cas des deux techniques OMA, NOMA en fonction de nombre d'utilisateurs pour R_{min} égale à 1bit/s.

Quel que soit le nombre d'utilisateurs la NOMA avec rétrodiffusion à la meilleure performance que la NOMA classique et l'OMA avec ou sans rétrodiffusion. Dans le terme de l'efficacité énergétique il est assez clair 'figure 1' le schéma NOMA avec rétrodiffusion surpasse amplement les autres schémas. Dans le cadre de NOMA ou OMA la présence de la rétrodiffusion n'affaibli pas l'efficacité énergétique bien au contraire on a pu atteindre une meilleure efficacité énergétique pour le NOMA, OMA. Par conséquent un plus grand nombre d'utilisateur a bénéficié d'une quintessence efficacité énergétique par rapport au NOMA, OMA classique. De l'autre côté l'efficacité énergétique dans le NOMA avec rétrodiffusion diminue en fonction de nombre d'utilisateurs, plus le nombre d'utilisateurs augmente plus l'efficacité énergétique diminue. Cette dernière est démontrée dans l'équation [IV.6], l'expression de coefficient de réflexion optimal dépend de la différence entre les gains du canal. Ont éclaircie cela : plus le nombre d'utilisateurs augmente plus l'écart du canal est petit et sa finit par atteindre zéro. L'effet de rétrodiffusion dans ce cas s'annule et on se retrouve dans le NOMA classique.

Tout ce qui est dite précédemment peut également être observé à la figure III.7, dans laquelle le coefficient de réflexion optimal ρ^* est représenté en fonction du nombre d'utilisateurs K, pour NOMA et OMA. Dans le cadre de l'OMA le dispositif de rétrodiffusion reflète totalement le signal ambiant incident, les taux des utilisateurs en fonction de ρ croissent. Ce qui implique que la valeur de ρ^* soit constante ($\rho^* = 1$). En NOMA ρ^* diminue avec l'augmentation des nombres d'utilisateurs K, une fraction du signal ambiant incident est réfléchié ($\rho^* < 1$), cela permet de récolter de l'énergie au niveau du dispositif de rétrodiffusion, et ensuite être exploité dans le fonctionnement de ce circuit.

CHAPITRE III : Efficacité énergétique d'un système NOMA multi-utilisateurs en présence d'un dispositif de rétrodiffusion

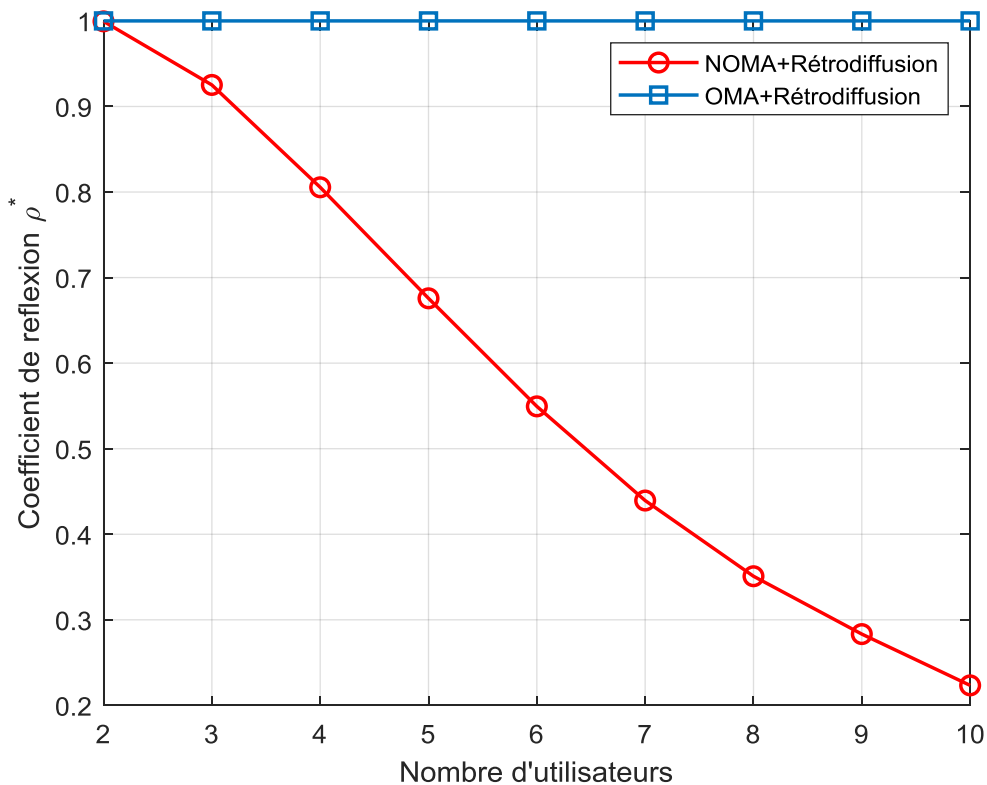


Figure III.7 : Coefficient de réflexion optimal ρ^* en fonction du nombre d'utilisateurs K pour $R_{\min} = 1$ bit/s.

La figure III.8 représente le gain relatif des deux systèmes NOMA et OMA avec rétrodiffusion par rapport à l'OMA classique. Pour $k = 3$ utilisateur et $P_{max} = 50$ dBm, on définit $(GEE^{schém} - GEE^{OMA})/GEE^{OMA}$ en fonction de variant de bruit σ^2 . On note pour des valeurs très petite de σ^2 (-130 dBm) le gain du NOMA avec rétrodiffusion est à 150% meilleur que de OMA classique. Pour $\sigma^2 = -70$ dBm, le gain atteint 450% de celui de OMA classique. Le gain de l'OMA avec rétrodiffusion achève 130% pour les petites valeurs de σ^2 et 350% pour les grande valeurs ($\sigma^2 = -70$ dBm). Dans cette comparaison le gain de NOMA avec rétrodiffusion et à 100% meilleur que celui de OMA avec rétrodiffusion pour les grandes valeurs de σ^2 .

CHAPITRE III : Efficacité énergétique d'un système NOMA multi-utilisateurs en présence d'un dispositif de rétrodiffusion

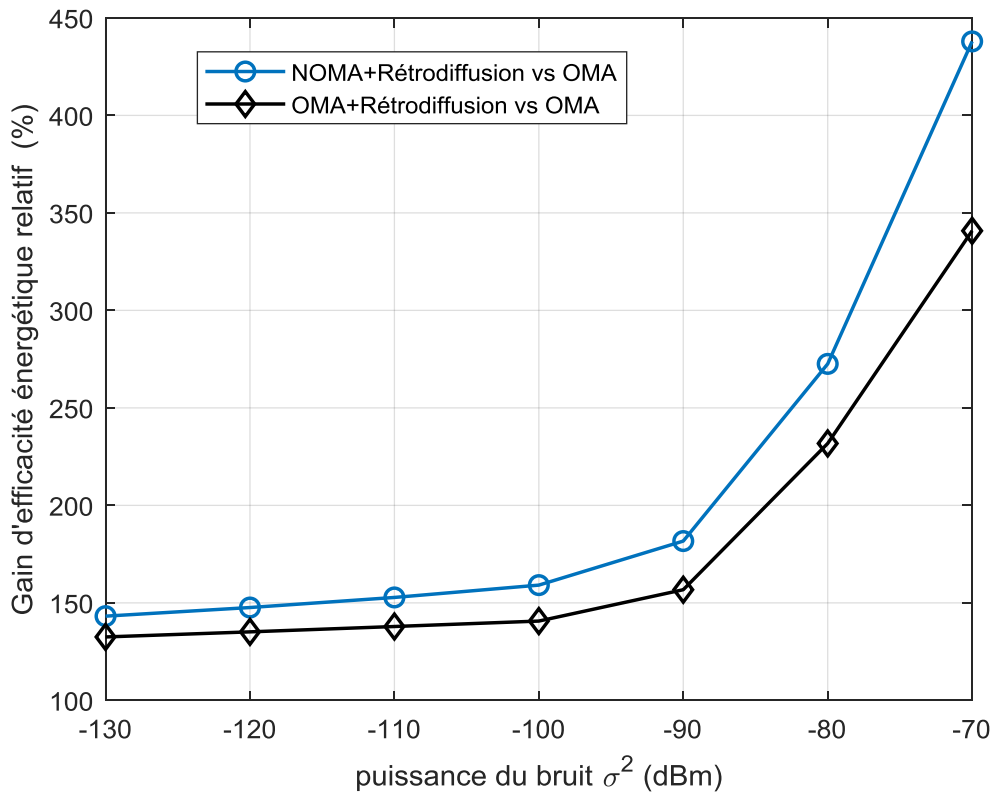


Figure III.8 : Gain relatif d'efficacité énergétique du NOMA et OMA par rapport à l'OMA classique en fonction de la puissance du bruit σ^2 pour $K = 3$ utilisateurs, $R_{min} = 1$ bits/s et $P_{max} = 50$ dBm

Dans la figure III.9 on examine l'impact de la condition minimale de QoS R_{min} pour $k = 3$ utilisateur et $P_{max} = 50$ dBm. Le NOMA par rétrodiffusion est toujours le plus performant des quatre techniques. On note, il y a une relation inverse entre l'efficacité énergétique et le taux d'utilisateurs minimal, plus le taux augmente plus on observe un affaiblissement d'efficacité énergétique. Cet effet peut être justifier par le besoin énergétique de la BS pour atteindre des valeurs plus élevées de R_{min} .

CHAPITRE III : Efficacité énergétique d'un système NOMA multi-utilisateurs en présence d'un dispositif de rétrodiffusion

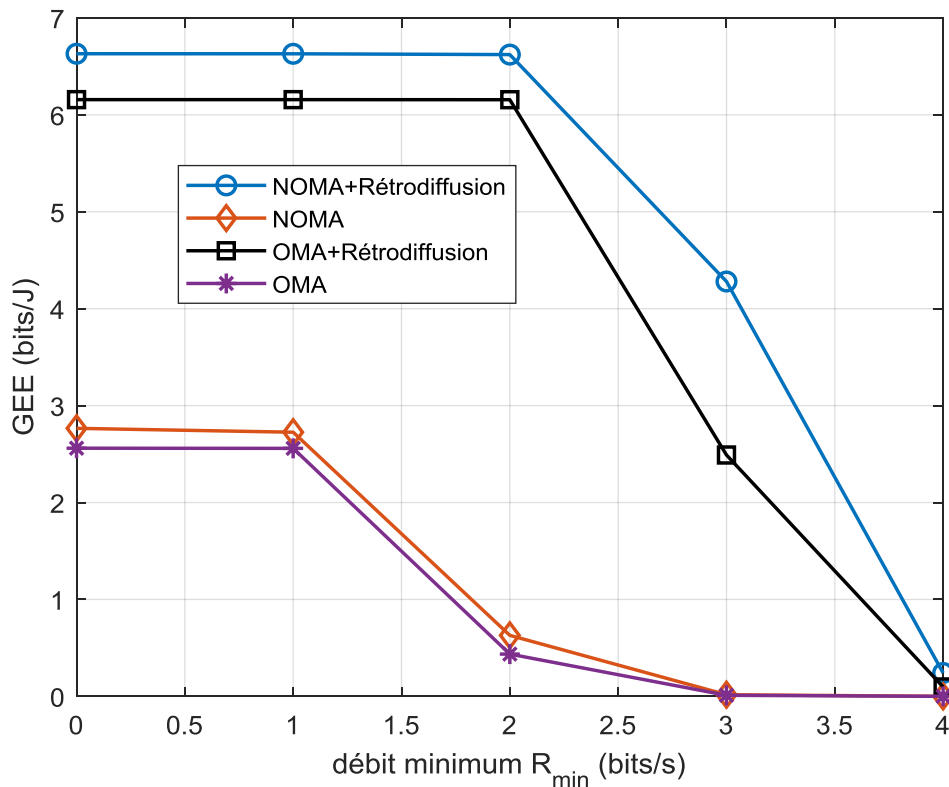


Figure III.9 : Efficacité énergétique

III.11 Conclusion

Nous avons étudié l'efficacité énergétique d'une liaison descendante multi-utilisateurs NOMA assistée d'un dispositif de rétrodiffusion ambiant. En formulant le problème d'optimisation non convexe comme le compromis entre le débit somme et la consommation de puissance totale, nous avons fourni la solution analytique pour le coefficient de réflexion et l'allocation de puissance pour un nombre arbitraire d'utilisateurs. De plus, notre solution analytique conduit à un algorithme de Dinkelbach simplifié et peu complexe afin de maximiser le ratio entre le d'débit somme et la consommation de puissance. Nos simulations montrent que le schéma proposé de NOMA assisté par rétrodiffusion est toujours plus performant qu'OMA avec et sans rétrodiffusion indépendamment du nombre d'utilisateurs.



CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons étudié l'efficacité énergétique des liaisons descendantes multi-utilisateurs NOMA en présence d'un dispositif de rétrodiffusion. En formulant le problème d'optimisation non convexe comme un compromis entre le débit total et la consommation totale d'énergie, nous avons fourni une solution d'analyse pour les coefficients de réflexions et l'allocation de puissance pour un nombre quelconque d'utilisateurs. De plus, des solutions analytiques conduisent à un algorithme de Dinkelbach simplifié et moins complexe pour maximiser le rapport entre le débit total et la consommation d'énergie. Des simulations ont montré que la technique NOMA assisté par un dispositif de rétrodiffusion améliore la consommation d'énergie et dépasse les performances de la technique OMA, avec ou sans rétrodiffusion, quel que soit le nombre d'utilisateurs.

Au départ, nous avons présenté l'architecture du réseau 5G, nous l'avons présenté en détail avec ses fréquences ainsi que certaines de ses technologies, ces exigences, et aussi le réseau GSM. Puis nous nous sommes penchés à définir la technique d'accès non orthogonal NOMA, donner son principe et décrire les deux opérations clés codage par superposition et l'annulation successive des interférences. Quelques variantes sont aussi présentées tout en mettant l'accent le système Multi Input Multi Output (MIMO) qui donne une diversité spatiale au système de communication NOMA. À la suite, des simulations MATLAB pour évaluer l'efficacité énergétique dans un système NOMA et OMA avec et sans dispositif de rétrodiffusion sont présentées. L'approche conduit à la résolution d'un programme fractionnaire non linéaire convexe. L'algorithme de Dinkelbach permet de traiter des fonctions objectives au numérateur concave et au dénominateur convexe. Cet algorithme a mené à une solution optimale, et montre sa performance via les résultats obtenus.

En perspectives, il serait intéressant de considérer un système MIMO-NOMA en présence d'un ou plusieurs dispositifs de rétrodiffusion et étudier ses applications dans la nouvelle technologie internet des objets (IdO ou IoT en anglais), qui utilise ce procédé par principe.

Référence

- [1] C. a. Y. L. a. Z. P. Xu, «Practical backscatter communication systems for battery-free Internet of Things: A tutorial and survey of recent research,» *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 35, n° 15, pp. 16-27, 2018.
- [2] S. a. M. N. a. K. Z. a. o. Dib, «Techniques de positionnement dans le réseau 5G,» Université Abderahmane MIRA de Bejaia, Bejaia, 2020.
- [3] D. a. A. B. MARWA, «Etude et Analyse de Méthodes de Beamforming pour des Systèmes Multi-utilisateurs Pour la 5G,» 2019.
- [4] W. a. M. S. H. a. E.-G. T. E. a. E. J. M. Fadlelmula, «CISCO,» arXiv preprint arXiv:2203.11380, 19 05 2022. [En ligne]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper/index.html>. [Accès le 29 juin 2022].
- [5] I. Alawe, *Architectures evaluation and dynamic scaling for 5G mobile core networks*, Rennes 1, 2018.
- [6] E. Dreina, *Conception, optimisation et intégration RF d'un système d'antennes miniatures multicapteurs utilisant la diversité en vue d'augmenter les performances radio d'un terminal mobile 4G*, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2010.
- [7] h. Remmert, «Digi international,» 19 mars 2021. [En ligne]. Available: <https://fr.digi.com/blog/post/5g-network-architecture..> [Accès le 17 mai 2022].
- [8] M. Blondet, «ariase,» [En ligne]. Available: <https://www.ariase.com/mobile/dossiers/5g>. [Accès le 30 juin 2022].
- [9] «VIAVI,» [En ligne]. Available: <https://www.viavisolutions.com/fr-fr/architecture-5g>. [Accès le 2022].
- [10] «RANDROID,» 30 mars 2022. [En ligne]. Available: https://www.android.com/telecom/488716_reseau-5g-tout-ce-qui-va-changer-quels-usages-et-pourquoi-la-technologie-est-importante. [Accès le 01 juin 2022].
- [11] A. H. Z. J. Baptiste, «TECHNIQUE D'ACCES MULTIPLE POUR LE RESEAU DE TELECOMMUNICATION 5G,» UNIVERSITE D'ANTANANARIVO, 2019.
- [12] D. a. K. A. a. B. S. a. o. Alkama, «Nouvelle approche pour l'optimisation de l'allocation des ressources dans les réseaux cellulaires,» universitébderahmene Mira. Bejaia, Bejaia, 2020.
- [13] B. a. A. D. A. a. Z. M. Z. E. Sadou, «Etude des techniques de modulation pour les réseaux mobiles 5G de nouvelle génération.,» Université de Jijel, Jijel, 2020.
- [14] A. Diallo, «Systèmes multi-antennes pour diversité et MIMO,» Université Nice Sophia Antipolis, 2007.
- [15] Y. a. P. G. a. Z. H. a. S. M. Liu, «On the capacity comparison between MIMO-NOMA and MIMO-

- OMA,» *IEEE Access*, vol. 4, pp. 2123-2129, 2016.
- [16] J.-F. a. C. C.-M. a. C. S.-C. a. K. R. Zhang, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, 2020.
- [17] J. a. L. T. a. L. R. P. a. S. X. a. P. M. a. W. C. a. M. J. Zeng, «Investigation on evolving single-carrier NOMA into multi-carrier NOMA in 5G,» *IEEE Access*, vol. 6, pp. 48268-48288, 2018.
- [18] H. K. Bizaki, *Towards 5G wireless networks: a physical layer perspective*, BoD--Books on Demand, 2016.
- [19] S. a. A. S. H. Ahmadi, «An integrated chance-constrained stochastic model for a mobile phone closed-loop supply chain network with supplier selection,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 226, pp. 988-1003, 2019.
- [20] S. a. M. D. a. B. R. Singh, «Analysis of NOMA for future cellular communication,» pp. 389-395, 2019.
- [21] S. a. H. E. a. K. D. I. Ali, «Non-orthogonal multiple access (NOMA) for downlink multiuser MIMO systems: User clustering, beamforming, and power allocation,» *IEEE access*, vol. 5, pp. 565-577, 2016.
- [22] *NOMA - How successive interference cancellation (SIC) works?*, 2020.
- [23] *User pairing in NOMA*, 2021.
- [24] *What is cooperative non orthogonal multiple access (NOMA)?*, 2020.
- [25] W. a. D. H. a. W. S. a. d. C. D. B. a. G. F. a. N. P. H. J. Chen, *Backscatter-based cooperative NOMA*, IEEE, 2020, pp. 1-7.
- [26] H. a. S. A. a. B. E. V. a. D. L. R. C. El Hassani, *Energy-Efficient Cooperative Backscattering Closed-Form Solution for NOMA*, IEEE, 2021, pp. 1-6.
- [27] S. Schaible, «Fractional programming. II, on Dinkelbach's algorithm,» *Management science*, vol. 22, n° 18, pp. 868-873, 1976.
- [28] I. a. J. S. Mishra, «Soft computing based compressive sensing techniques in signal processing: A comprehensive review,» *Journal of Intelligent Systems*, vol. 30, n° 11, pp. 312-326, 2021.
- [29] D.-T. a. L. A.-T. Do, «Outage probability computation in multi-backscatter systems with multi-modes of operation,» *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 11, n° 11, pp. 239-247, 2022.