

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية
الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaid – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : TELECOMMUNICATIONS

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Par : FERHI Wafaa

Sujet

Réseaux d'accès multiples non orthogonales NOMA pour la 5G

Soutenu publiquement, le 12/ 09 / 2020, devant le jury composé de :

Mr. BENDIMERAD Fethi Tarik	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
Mr. MERIAH Sidi Mohammed	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur
Mr. BOUSAHLA Miloud	MCB	Univ. Tlemcen	Examineur
Mr. DERREZ Fouad	MCB	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
Mr. DAYOUB Iyad	Professeur	Univ. Valenciennes	Co-Directeur de mémoire
Mr Taleb-Ahmed Abdelmalik	Professeur	Univ. Valenciennes	Invité

Année universitaire : 2019/2020

Remerciements

En préambule à ce mémoire je remercie ALLAH qui m'aide et me donne la patience et le courage durant ces longues années d'étude

C'est avec un immense plaisir que je réserve ces lignes en signe de gratitude et de reconnaissance à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Toute ma reconnaissance s'adresse à mon directeur de mémoire Mr. Derraz Fouad. Maitre de conférences de la faculté de technologie à l'université de Tlemcen pour la confiance qu'il m'a accordée ainsi que son soutien moral. Les connaissances qu'il a su me transmettre, sa patience et ses judicieux conseils m'ont énormément aidé et contribué à alimenter ma réflexion.

Toute ma reconnaissance s'adresse aussi à mon co-directeur de mémoire Mr. Dayoub Iyad. Professeur à l'université Polytechniques des Hauts de France Valenciennes pour son aide, ses remarques pertinentes, sa disponibilité malgré la distance, son écoute, ses conseils avisés et ses appréciations qui m'ont guidé dans mon travail et m'ont aidé à trouver des solutions pour mieux avancer

Je tiens à remercier également Mr. Abdelmalik Taleb-Ahmed. Professeur à l'université Polytechniques des Hauts de France Valenciennes, pour sa précieuse collaboration, son aide, son écoute, son soutien moral et ses encouragements.

Mes sincères remerciements vont aux membres du jury, Mr. Bendimrad Professeur à l'université de Tlemcen pour l'honneur qu'il me fait en présidant le jury, ainsi que Mr. Merih Professeur à l'université de Tlemcen et Mr. Bousahla Maitre de conférences à l'université de Tlemcen d'avoir accepté d'examiner ce modeste travail

Je saisis cette même occasion pour exprimer ma profonde reconnaissance à tous mes enseignants du département de Télécommunications pour leur enseignement de qualité et ayant toujours su nourrir mes réflexions

Je remercie en particulier Mademoiselle EL Haci Zineb et Mademoiselle Ferdi Soria pour leurs amitiés, et l'aide précieuse qu'elles m'ont apporté tout au long de ce travail. A vous, auprès de qui j'ai appris le sacrifice, la générosité, qui m'ont aidé et encouragé aux moments opportuns.

Et je ne peux conclure sans remercier chaleureusement mes parents et mes sœurs et mon oncle Ferhi Salah. Leur présence à mes côtés, leur soutien inestimable, leur encouragement ainsi que la confiance qu'ils m'ont accordé m'ont assuré des bases solides et m'ont permis de toujours me surpasser et donner le meilleur de moi-même

Dédicaces

À mes chers parents

À mes grands parents

À mes sœurs Meriem et Sara

À mon oncle FERHI SALAH

À mes proches amis

Résumé :

La 5G représente une véritable révolution technologique des réseaux mobiles et sans fils dans le monde des télécommunications. Elle devient un enjeu majeur dans les réseaux numériques dans divers secteurs (transports, santé, énergie, commerce, etc.). Plusieurs concepts sont en phase d'étude pour l'interface radio des réseaux 5G. L'accès multiple non-orthogonal (NOMA) est une technologie récente permettant de multiplexer plusieurs signaux des différents utilisateurs dans une même sous-porteuse afin de permettre le partage de ressources entre ces derniers, et par conséquent, transmettre ces signaux sur la même bande fréquentielle en même temps avec différents niveaux de puissance, réduisant ainsi le temps de latence et améliorant largement le débit des utilisateurs. Cependant, l'interférence mutuelle due au multiplexage d'utilisateurs pendant la transmission est inévitable. Ce travail de recherche a pour objectif d'étudier les principes fondamentaux de cette nouvelle technologie, à savoir la faisabilité et le développement d'un réseau PD-NOMA ainsi que la manière dont elle peut répondre au mieux aux exigences de la cinquième génération (5G) dans des applications pratiques.

Mots clés : NOMA, SC, SIC, 5G, BER, domaine de puissance, BERTOOL, MATLAB Simulink, chaîne de transmission.

Abstrat :

5G represents a true technological revolution in mobile and wireless networks in the world of telecommunications. It is becoming a major issue in digital networks in various sectors (transport, health, energy, commerce, etc.). Several concepts are in the study phase for the radio interface of 5G networks. Non-orthogonal multiple access (NOMA) is a recent technology that allows multiplexing several signals from different users in the same sub-carrier in order to allow resource sharing between them, and therefore transmit these signals on the same frequency band at the same time with different power levels, thus reducing latency and greatly improving user throughput. However, mutual interference due to multiplexing of users during transmission is unavoidable. The objective of this research work is to study the fundamental principles of this new technology, namely the feasibility and development of a PD-NOMA network and how it can best meet the requirements of fifth generation (5G) in practical applications.

Keyword : NOMA, SC, SIC, 5G, BER, power domain, BERTOOL , MATLAB, Simulink, transmission chain.

ملخص

تشكل شبكة الجيل الخامس ثورة جذرية في عالم تكنولوجيات الإتصالات المحمولة واللاسلكية، إذ يعد هذا الجيل طفرة حقيقية في عالم الإتصالات الرقمية في عدة مجالات منها، الإقتصادية و السياسية وغيرها. ويجري حاليا دراسة عدة مفاهيم للواجهة اللاسلكية لشبكات الجيل الخامس. وتعتبر تقنيات الوصول المتعدد اللامتعامد (NOMA) بمثابة تقنية حديثة تتيح إمكانية دمج عدة إشارات تابعة لعدة مستخدمين في إشارة واحدة وهذا بغرض توزيع نفس الموارد بين المستخدمين، وبالتالي إمكانية النقل في نفس الوقت وهذا باستعمال نسب مختلفة من طاقة الإرسال، هذا ما يخفض من زمن الإرسال ويحسن من معدل النقل بشكل كبير. الهدف من هذا المشروع هو دراسة المبادئ الاساسية لهذه التكنولوجيا الجديدة وجودتها في تطوير شبكة 5G.

الكلمات المفتاحية:

NOMA, SIC, SC, 5G, BER, BRTOOLI, MATLAB SIMULINK

مجال القوة، قناة النقل.

TABLES DES

MATIÈRES

Tables des matieres

<i>Acronymes</i>	<i>i</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>iv</i>
<i>Liste de figures</i>	<i>v</i>

Introduction générale 1

Chapitre I : Généralités sur la 5G..... 4

<i>1. Introduction</i>	<i>5</i>
<i>2. Un aperçu sur la technologie 5G :</i>	<i>5</i>
<i>3. Les standards de la 5G :</i>	<i>5</i>
3.1. 3GPP :.....	6
3.2. IETF :.....	6
3.3. UIT :.....	6
<i>4. Les technologies de la 5G</i>	<i>7</i>
4.1. Principe	7
4.1.1. <i>Les ondes millimétriques</i>	8
4.1.2. <i>Full-Duplex</i>	8
4.1.3. <i>Beamforming</i>	9
4.1.4. <i>Small-cell</i>	10
4.1.5. <i>MIMO Massive</i>	11
<i>5. Les familles d’usage 5G</i>	<i>12</i>
5.1. Massive Machine Type Communications (mMTC)	12
5.2. Enhanced Mobile Broadband (eMBB)	13
5.3. Ultra-reliable and Low Latency Communications (URLLC) :	13
<i>6. Exigences et défis de la 5G</i>	<i>14</i>
6.1. Une plus grande capacité	14
6.2. Un débit plus élevé	14
6.3. Disponibilité, connectivité et fiabilité massives	14
6.4. Une latence très faible.....	15
6.5. Coût réduit et une efficacité énergétique plus élevée	15
<i>7. Application de la 5G pour e-santé</i>	<i>16</i>
<i>8. Modulation M-aire</i>	<i>18</i>
8.1. La modulation par déplacement de phase M-PSK	18
8.2. La modulation d’amplitude en quadrature M-QAM.....	19
<i>9. Modèles des canaux de communication sans fils</i>	<i>20</i>
9.1. Canal de propagation par multi-trajets.....	20
9.1.1. <i>Principales dégradations de la propagation</i>	21
9.1.2. <i>Distribution de canal de Rayleigh</i>	22

9.1.3.	<i>Distribution de Rice (RICIAN)</i>	22
9.2.	Canal à bruit blanc additif gaussien.....	23
10.	<i>Conclusion</i>	24
Chapitre II: Techniques d'accès multiples non orthogonales		25
1.	<i>Introduction</i>	26
2.	<i>L'accès multiples</i>	26
3.	<i>Techniques d'accès multiples orthogonales (OMA)</i>	26
3.1.	La modulation multi-porteuses	27
3.2.	L'OFDM	27
3.2.1.	<i>Le Principe de la modulation l'OFDM</i>	28
3.2.2.	<i>Rappel de la notion d'orthogonalité</i>	29
3.2.3.	<i>La Chaîne de transmission OFDM</i>	30
3.2.4.	<i>La technique d'accès multiple OFDMA</i>	33
3.2.5.	<i>Les avantages de l'OFDM</i>	33
3.2.6.	<i>Les inconvénients de l'OFDM</i>	34
4.	<i>Techniques d'accès multiples non-orthogonales</i>	34
4.1.	Techniques d'accès multiples non-orthogonales dans le domaine de puissance (PD-NOMA).....	36
4.1.1.	<i>L'allocation de puissance et la superposition de code (SC)</i>	37
4.1.2.	<i>Le détecteur SIC (Successive Interference Cancellation)</i>	39
4.1.3.	<i>Comparaison entre OMA et NOMA</i>	43
4.1.4.	<i>Les avantages de PD-NOMA</i>	45
5.	<i>Conclusion</i>	46
Chapitre III : Modèles et exemples de PD-NOMA sous MATLAB Simulink		47
1.	<i>Introduction</i>	48
2.	<i>Un aperçu sur l'environnement de simulation MATLAB Simulink :</i>	48
3.	<i>Présentation du Simulink</i>	49
4.	<i>Simulation d'une chaîne de transmission d'un système NOMA-AWGN</i>	52
4.1.	Description des blocs du modèle :	53
4.1.1.	<i>Le bloc générateur des nombres entiers aléatoires (Random Integer Generator) :</i>	53
4.1.2.	<i>Le bloc de mémoire Goto :</i>	54
4.1.3.	<i>Le bloc de la modulation BPSK (BPSK modulator) :</i>	55
4.1.4.	<i>Le bloc du gain</i>	56
4.1.5.	<i>Le bloc d'addition (add (++))</i>	57
4.1.6.	<i>Le bloc du canal AWGN</i>	58
4.1.7.	<i>Le bloc de mémoire From</i>	59
4.1.8.	<i>Le bloc d'addition (add (+-))</i>	60

4.1.9.	<i>Le bloc de démodulation BPSK (BPSK demodulator)</i>	60
4.1.10.	<i>Le bloc de calcul de taux d'erreur (Error rate calculation)</i>	61
4.2.	<i>Le système PD-NOMA avec les modulations M-PSK et M-QAM</i>	61
5.	<i>Simulation d'une chaîne de transmission d'un système NOMA-RAYLEIGH</i>	66
6.	<i>Simulation d'une chaîne de transmission d'un système NOMA-RICIAN</i> ...	68
7.	<i>Conclusion</i>	70
Chapitre IV : Analyse des performances du système PD-NOMA		72
1.	<i>Introduction</i>	73
2.	<i>Les critères de performance pour un système de communication</i>	73
2.1.	<i>Le rapport signal sur bruit</i>	73
2.2.	<i>La probabilité d'erreur binaire</i>	74
2.3.	<i>Le taux d'erreur binaire (TEB ou BER)</i>	74
3.	<i>Application de la méthode BERTOOL pour l'évaluation de taux d'erreur binaire</i>	76
3.1.	<i>La procédure du calcul du BER avec l'application BERTOOL</i>	76
4.	<i>Comparaison entre le BER de deux utilisateurs dans un système PD-NOMA</i>	81
5.	<i>BER pour une modulation M-aire</i>	82
5.1.	<i>BER pour une modulation M-PSK</i>	82
5.2.	<i>BER pour une modulation M-QAM</i>	83
6.	<i>Comparaison entre le BER d'un système PD-NOMA avec un canal AWGN et un canal Rayleigh</i>	84
7.	<i>Le BER du système PD-NOMA pour un canal RICIAN</i>	86
8.	<i>Comparaison entre les performances du BER pour trois types de canaux (AWGN, RAYLEIGH, RICIAN)</i>	88
9.	<i>Conclusion</i>	91
Conclusion général		92
Bibliographie		95

Acronymes

1G	Première génération de réseaux mobiles
2G	Deuxième génération de réseaux mobiles
3G	Troisième génération de réseaux mobiles
3GPP	The 3rd Generation Partnership Project
4G	Quatrième génération de réseaux mobiles
5G	Cinquième génération de réseaux mobiles
AWGN	Additive white Gaussian noise
BBAG	Bruit blanc additif gaussien
BER	Bit error rate
CDMA	Code division multiple access
CP	Cyclic prefix
DAB	Digital Audio Broadcasting
DFT	Discrete Fourier transform
DRM	Digital <i>Radio</i> Mondiale
DVB-H	Digital Video Broadcasting - Handheld
DVB-T	Digital Video Broadcasting – Terrestrial
EE	Efficacité énergétique
EmBB	Enhanced Mobile Broadband
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FFT	Fast Fourier transform
IAB	Internet Architecture Board
IETF	Internet Engineering Task Force

IFFT	Inverse fast <i>Fourier</i> transform
IIS	Interférence <i>inter-symbole</i>
IoT	Internet of Things
IRTF	Internet Research Task Force
LOS	Line-of-sight
LTE	Long Term Evolution
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MIoT	Massive Internet of Things
MMTC	Massive Machine Type Communications
MUSA	Multi User Shared Access
NLOS	Non-line-of-sight
NOMA	Non-orthogonal multiple access
OFDM	Orthogonal frequency-division multiplexing
OFDMA	Orthogonal frequency-division multiple access
OMA	<i>Orthogonal multiple access</i>
PAPR	Peak to average power ratio
PDMA	Pattern Division Multiple Access
PD-NOMA	Non-orthogonal multiple access power domain
PSK	Phase shift keying
QAM	Quadrature amplitude modulation
SC	Superposition coding
SCMA	Sparse code multiple access
SE	Efficacité spectrale
SIC	Successive-interference cancelation

SNR	Signal-to-noise
TDMA	Time division multiple access
TEB	Taux d'Erreur de Bit
TIC	Technologie de l'information et de la communication
UIT	Union internationale des <i>télécommunications</i>
URLC	Ultra-reliable and Low Latency Communications
V2X	Vehicle-to-everything
WIMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access

Liste des tableaux

<i>Table III.1</i>	<i>Les relations du BER en fonction du rapport SNR pour différents types de modulation.....</i>	<i>75</i>
<i>Table IV.1</i>	<i>Les valeurs du BER dans un canal AWGN, RAYLEIGH et Rician pour une modulation M-PSK.....</i>	<i>89</i>
<i>Table IV.2</i>	<i>Les valeurs du BER dans un canal AWGN, RAYLEIGH et Rician pour une modulation M-QAM</i>	<i>90</i>

Liste de figures

<i>Figure I.1</i>	<i>Les principales technologies mises en œuvre pour la 5G.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure I.2</i>	<i>Répartition de fréquence sur le spectre électromagnétique</i>	<i>8</i>
<i>Figure I.3</i>	<i>Répartitions temps et fréquence dans le Half duplex et le Full- duplex</i>	<i>9</i>
<i>Figure I.4</i>	<i>La technologie Beamforming.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure I.5</i>	<i>Réseau mobile sans fils illustrant la technologie des Small-cell... </i>	<i>11</i>
<i>Figure I.6</i>	<i>La technologie MIMO</i>	<i>12</i>
<i>Figure I.7</i>	<i>Les trois familles d’usage de la 5G</i>	<i>13</i>
<i>Figure I.8</i>	<i>Exemple de la modulation M-PSK (M=4).....</i>	<i>19</i>
<i>Figure I.9</i>	<i>Propagation par multi-trajet.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure I.10</i>	<i>Principales dégradations de la propagation</i>	<i>21</i>
<i>Figure I.11</i>	<i>Exemple de propagation multi-trajets NLOS.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure I.12</i>	<i>Exemple de propagation multi-trajets LOS</i>	<i>23</i>
<i>Figure II.1 :</i>	<i>Dualité temps-fréquence des modulations.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure II.2</i>	<i>Schéma-bloc d’un modulateur OFDM</i>	<i>29</i>
<i>Figure II.3 :</i>	<i>Exemple de porteuses orthogonales dans le domaine fréquentiel.</i>	<i>30</i>
<i>Figure II.4</i>	<i>Diagramme en bloc de la chaîne de transmission OFDM.....</i>	<i>31</i>
<i>Figure II.5</i>	<i>Insertion du préfixe cyclique</i>	<i>32</i>
<i>Figure II.6</i>	<i>Allocation de ressources OFDM/OFDMA</i>	<i>33</i>
<i>Figure II.7</i>	<i>Les mécanismes de la PD-NOMA</i>	<i>37</i>
<i>Figure II.8</i>	<i>Allocation de puissance pour la liaison descendante.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure II.9</i>	<i>Principe de fonctionnement du détecteur SIC</i>	<i>39</i>
<i>Figure II.10</i>	<i>Un réseau PD-NOMA pour trois utilisateurs</i>	<i>42</i>
<i>Figure II.11</i>	<i>Comparaison entre PD-NOMA/OMA en terme de débit.....</i>	<i>44</i>
<i>Figure II.12</i>	<i>Le tracé du EE/SE pour les deux systèmes NOMA et OMA</i>	<i>45</i>
<i>Figure III.1</i>	<i>Ce que l’on peut modéliser mathématiquement avec MATLAB Simulink</i>	<i>49</i>
<i>Figure III.2</i>	<i>La fenêtre de commande de MATLAB</i>	<i>50</i>

<i>Figure III.3</i>	<i>accès à la bibliothèque Simulink</i>	<i>50</i>
<i>Figure III.4</i>	<i>Les différentes collections de bloc</i>	<i>51</i>
<i>Figure III.5</i>	<i>La bibliothèque Simulink</i>	<i>51</i>
<i>Figure III.6</i>	<i>Exemple d'un nouveau modèle</i>	<i>52</i>
<i>Figure III.7</i>	<i>Modèle de simulation de la technique PD-NOMA pour un canal AWGN</i>	<i>53</i>
<i>Figure III.8</i>	<i>bloc générateur des nombres entiers aléatoires</i>	<i>54</i>
<i>Figure III.9</i>	<i>Le bloc de mémoire Goto</i>	<i>55</i>
<i>Figure III.10</i>	<i>Le bloc BPSK modulateur</i>	<i>56</i>
<i>Figure III.11</i>	<i>Le bloc Gain</i>	<i>56</i>
<i>Figure III.12</i>	<i>Le bloc Add</i>	<i>57</i>
<i>Figure III.13</i>	<i>Le bloc AWGN Channel</i>	<i>58</i>
<i>Figure III.14</i>	<i>Le bloc From</i>	<i>59</i>
<i>Figure III.15</i>	<i>Le bloc d'addition Add</i>	<i>60</i>
<i>Figure III.16</i>	<i>Le bloc BPSK démodulateur</i>	<i>60</i>
<i>Figure III.17</i>	<i>Le bloc de calcul de taux d'erreur</i>	<i>61</i>
<i>Figure III.18</i>	<i>Modèle de simulation de la technique PD-NOMA avec la modulation M-PSK</i>	<i>62</i>
<i>Figure III.19</i>	<i>Modèle de simulation de la technique PD-NOMA avec la modulation M-QAM</i>	<i>62</i>
<i>Figure III.20</i>	<i>Le bloc M-PSK modulateur</i>	<i>63</i>
<i>Figure III.21</i>	<i>La fenêtre des paramètres pour le bloc M-PSK</i>	<i>64</i>
<i>Figure III.22</i>	<i>La fenêtre des paramètres pour le bloc M-QAM</i>	<i>65</i>
<i>Figure III.23</i>	<i>Modèle de simulation de la technique PD-NOMA pour un canal Rayleigh</i>	<i>67</i>
<i>Figure III.24</i>	<i>Le bloc Mutipath Rayleigh Fading Channel</i>	<i>68</i>
<i>Figure III.25</i>	<i>Modèle de simulation de la technique PD-NOMA pour un canal Rician</i>	<i>69</i>
<i>Figure III.26</i>	<i>Le bloc Mutipath Rician Fading Channel</i>	<i>70</i>
<i>Figure IV.1</i>	<i>Fenêtre de l'application BERTOOL</i>	<i>77</i>
<i>Figure IV.2</i>	<i>Champ de données l'application BERTOOL</i>	<i>77</i>
<i>Figure IV.3</i>	<i>Les méthodes de calcul du BER avec l'application BERTOOL</i>	<i>78</i>

<i>Figure IV.4 L'onglet de la méthode Monte Carlo</i>	<i>79</i>
<i>Figure IV.5 Les valeurs du BER en fonction du rapport Eb/No</i>	<i>80</i>
<i>Figure IV.6 Exemple d'un tracé du BER en fonction du rapport Eb/No résultant de l'application BERTOOL.....</i>	<i>80</i>
<i>Figure IV.7 Le BER de la chaine de transmission PD-NOMA pour deux utilisateurs.....</i>	<i>81</i>
<i>Figure IV.8 Le BER de chaine de transmission PD-NOMA avec le canal AWGN et la modulation M-PSK</i>	<i>83</i>
<i>IV.9 Le BER de chaine de transmission PD-NOMA avec le canal AWGN et la modulation M-QAM.....</i>	<i>84</i>
<i>Figure IV.10 Le BER de la chaine de transmission PD-NOMA pour un canal AWGN et un canal RAYLEIGH</i>	<i>85</i>
<i>Figure IV.11 Le BER de la chaine de transmission PD-NOMA pour un canal RICIAN</i>	<i>87</i>
<i>Figure IV.12 Le BER de la chaine de transmission PD-NOMA pour un canal AWGN, RAYLEIGH et RICIAN</i>	<i>88</i>

INTRODUCCION GENERAL

Le secteur des télécommunications ne cesse d'évoluer vers la conception et l'installation des systèmes toujours plus rapides et plus performants. Cela rend l'ingénieur de télécommunication souvent passionné par les nouvelles technologies et doté d'un esprit d'innovation et de la création. De ce fait, l'ingénieur met en point un ensemble d'objectives, nous citons : la mise en forme, le développement et l'installation des réseaux et des systèmes de télécommunication performants, ainsi que la maîtrise des technologies de la pointe (informatique, logiciels de conception,...) et se tenir informer des innovations permanentes dans ce domaine. Ces ambitions forment une excellente stratégie de la révolution des réseaux mobiles sans fils.

À l'échelle mondiale, les réseaux mobiles sans fils deviennent un élément indispensable dans notre vie quotidienne. À cet égard, ces réseaux s'efforcent à satisfaire au mieux les besoins et les intérêts des utilisateurs qui accèdent au réseau. Pour cela nous observons une grande évolution dans les générations des réseaux mobiles allant de la 1G jusqu'à la 5G. Cependant chacune des générations introduit des nouvelles exigences en termes de débit, efficacité spectrale, latence, coût, fiabilité, Afin de pouvoir assurer ces contraintes chaque génération repose sur des techniques spécifiques, par exemple la technique FDMA pour la 1G, la technique TDMA pour la 2G, la technique CDMA pour la 3G et la technique OFDMA pour la 4G. Et en ce qui concerne les techniques utilisées pour la 5G sont en cours de recherche telles que : la technique FBMC, MIMO massive, NOMA.

Ce mémoire s'intéresse spécialement à l'étude et le développement des techniques d'accès multiples non-orthogonales pour la 5G. La NOMA est une technique récente qui permet de multiplexer plusieurs utilisateurs dans une sous-porteuse avec l'utilisation d'un nouveau mécanisme qui est l'allocation de puissance.

Pour ce faire, nous allons organiser notre travail en 4 chapitres :

- Tout d'abord, le premier chapitre introduit des généralités sur la cinquième génération, nous définissons ses techniques prometteuses (les ondes millimétriques, Full-Duplex, Beamforming, Small-cell, MIMO Massive), et à la fin de ce chapitre nous abordons un ensemble de modèles de canaux sans fil.
- Le deuxième chapitre se divise en deux parties, la première concerne les techniques d'accès multiples orthogonales notamment la technique OFDM, nous allons exposer cette technique avec ses avantages et ses inconvénients. La deuxième partie du chapitre deux portes sur la technique NOMA, nous allons définir cette nouvelle approche ainsi que ses différents mécanismes.
- Dans le troisième chapitre, nous allons implémenter les mécanismes de NOMA étudiés dans le deuxième chapitre, dans cette implémentation, nous introduisons différentes conditions. Ce travail est réalisé sous le logiciel MATLAB-Simulink. Cet environnement est une extension graphique du logiciel MATLAB, permet la modélisation des différents réseaux et systèmes de communication.
- Pour le dernier chapitre, nous allons traiter et exposer les résultats obtenus lors de l'utilisation de l'application BERTOOL sous le logiciel MATLAB.

À la fin de ce mémoire, nous donnons une conclusion générale du projet qui comprend les performances de NOMA et les éventuelles perspectives de l'étude présentée.

CHAPITRE I

Généralités sur la 5G

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons essentiellement à la cinquième génération des communications sans fil (5G). Il s'agit là; de la dernière version de la technologie cellulaire, conçue pour augmenter la vitesse et la réactivité des réseaux sans fil. Elle nous offre des grands débits binaires massifs allant jusqu'à 20 Gbps (supérieures à celles du réseau filaire), ainsi qu'une latence de 1 ms ou moins pour les utilisations nécessitant un retour d'information en temps réel. La 5G permettra également une forte augmentation de la quantité de données transmises sur les systèmes sans fil grâce à une plus grande largeur de bande disponible et à une technologie d'antenne avancée [1].

2. Un aperçu sur la technologie 5G :

La 5G reprend les technologies déjà utilisées avec la 4G LTE. Elle se distingue toutefois de cette dernière, par plusieurs points importants : La 5G est d'abord une mise à jour technologique de la 4G LTE et peut réutiliser les mêmes bandes de fréquences que cette dernière. Grâce à cette mise à jour, un téléphone portable 5G bénéficie d'un meilleur débit qu'un téléphone portable 4G pourtant connecté à la même antenne et en utilisant la même fréquence [2].

La 5G fait également appel à de nouvelles bandes de fréquences qui se divisent en deux groupes : Celui des bandes de fréquences 5G Sub-6 et celui des ondes millimétriques. Ce qui permet d'augmenter sensiblement le débit au détriment de la portée [2].

3. Les standards de la 5G :

En absence d'une véritable norme de la technologie 5G, le marché est encore en train de déterminer les caractéristiques et les fonctionnalités essentielles de cette nouvelle génération. Dans le but de trouver des normes standardisées de la 5G, nous citons les principales organismes de normalisation 5G qui participent à ces processus : la 3ème Génération de Partenariat du Projet (3GPP), le Groupe de

Travail sur l'Ingénierie de l'Internet (IETF : Internet Engineering Task Force) et l'Union Internationale des Télécommunications (UIT).

3.1. 3GPP :

Le projet de partenariat de troisième génération (3GPP) est un projet de collaboration entre des associations de télécommunications dont l'objectif initial est de développer des spécifications applicables au niveau mondial pour les systèmes mobiles de troisième génération (3G). Notamment les systèmes mobiles basés sur les réseaux GSM évolués ainsi que sur les technologies d'accès radio qu'ils prennent en charge, sans oublier les capacités de service et la sécurité. Cela comprend aussi la maintenance et le développement des technologies suivantes : les normes 2G/2.5G, les normes 3G, les normes LTE (4G) et aussi la nouvelle génération 5G. En fin 2017, le 3GPP a commencé à définir les spécifications détaillées nécessaires à la conception et à la construction d'un réseau 5G [3].

3.2. IETF :

L'IETF est le premier organisme de normalisation d'internet, développant des standards via des processus ouverts pour améliorer le fonctionnement d'internet. L'IETF est une grande communauté internationale ouverte pour les concepteurs de réseaux, d'opérateurs, de fournisseurs et de chercheurs qui se préoccupent de l'évolution de l'architecture et du bon fonctionnement d'internet. L'IAB (Internet Architecture Board) et l'IRTF(Internet Research Task Force) enrichissent le travail de l'IETF en fournissant, respectivement, une direction technique à long terme pour le développement d'internet et la promotion de la recherche qui est importante pour son évolution [4].

3.3. UIT :

L'UIT est l'institution spécialisée des Nations Unies pour les technologies de l'information et de la communication (TIC). Construite en 1865, son objectif est de faciliter la connectivité internationale des réseaux de communications. L'UIT attribue dans le monde entier des fréquences radioélectriques et des orbites de satellite. Cet organisme international a aussi, la charge d'élaborer les normes techniques qui assurent l'interconnexion harmonieuse des réseaux et de différentes

technologies. Elle s'efforce également d'améliorer l'accès aux TIC pour les communautés mal desservies partout dans le monde. Les travaux de l'UIT sont bénéficiés quotidiennement; par exemple lors d'un appel avec téléphone portable, accès à Internet ou l'envoi d'un courrier électronique. La mission principale de cette institution est d'assurer une connexion à tous les habitants de la planète, quel que soit l'endroit où ils vivent et leurs moyens [5].

4. Les technologies de la 5G

4.1. Principe

Pour atteindre de nouveaux niveaux de performance et d'efficacité, la 5G utilise de nombreuses technologies clés telles que les ondes millimétriques, la NOMA, le Full-Duplex, le Beamforming, le Small-cell, Mimo-massive, etc. Les combinaisons de ces dernières vont étendre l'importance des communications mobiles. Elles vont leur permettre également de jouer un rôle capital dans les systèmes d'accès multiples.

La 5G utilise les ondes millimétriques pour transférer rapidement d'énormes quantités de données, tout en sachant que la plage de diffusion est limitée. Pour pallier à ce problème, elle fait appel à la technologie de Beamforming à travers MIMO-massive qui permet la diffusion continue des données sur plusieurs appareils. Elle utilise aussi le processus des Small-cells pour assurer des connexions de l'ordre de gigabit même en état de marche.

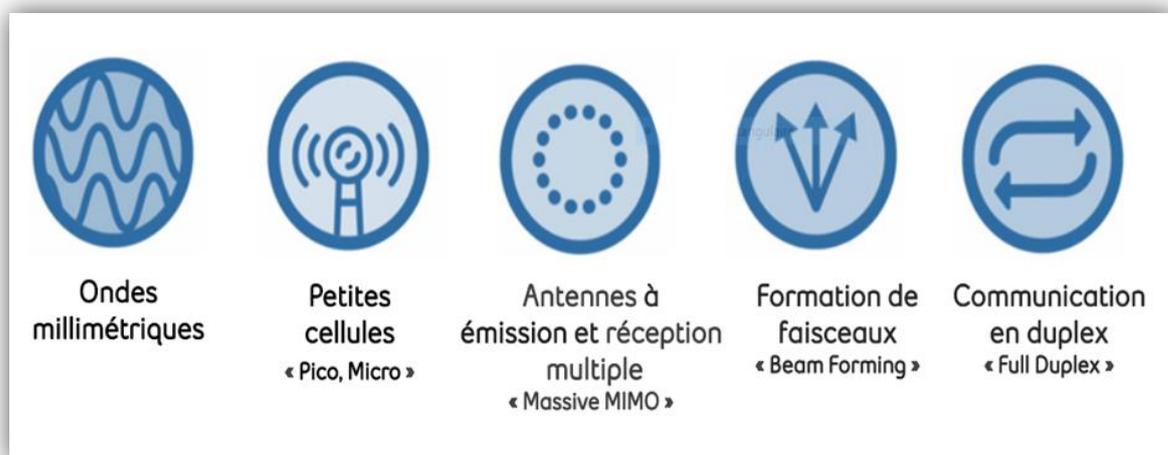


Figure I .1 Les principales technologies mises en œuvre pour la 5G [36]

4.1.1. Les ondes millimétriques

Les ondes millimétriques sont des ondes radioélectriques couvrant les fréquences de 30 à 300 GHz comme illustre la figure I.2. Quant à la notion de «millimétrique», son usage ici, est simplement, en rapport avec leur longueur d'onde, qui s'étale entre 1 et 10 mm. Ces ondes doivent réduire la latence entre les appareils et leur donner accès à une plus grande capacité de transfert.

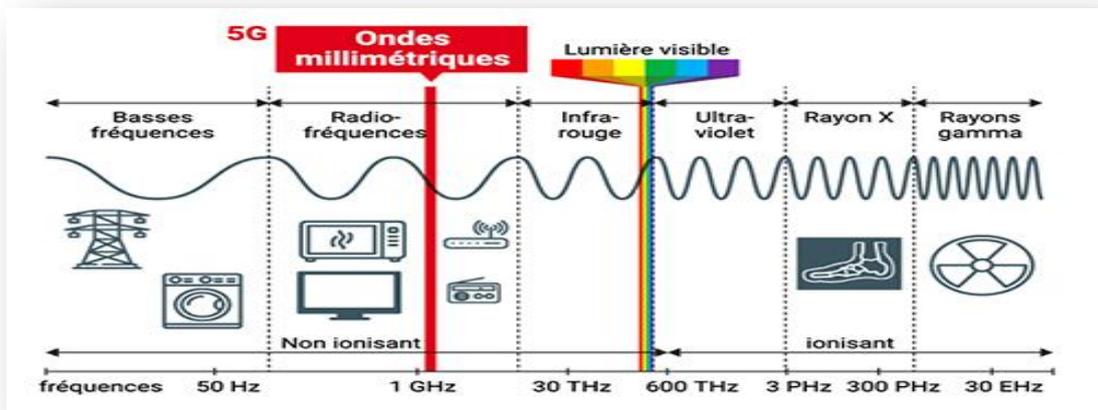


Figure I .2 Répartition de fréquence sur le spectre électromagnétique [37]

4.1.2. Full-Duplex

Dans les réseaux mobiles sans fil actuellement déployés, le support sans fil est une ressource partagée dans le temps ou par répartition de fréquence en Half-Duplex. Cela nécessite une transmission et une réception des signaux qui se font dans deux intervalles de temps séparés ou dans deux bandes de fréquences différentes. Sans oublier que l'émetteur-récepteur ne peut pas transmettre et recevoir un signal en même temps à la même fréquence. L'ensemble de ces éléments limite considérablement, la capacité des réseaux cellulaires. Par contre la technologie Full-duplex quant à elle, assure une transmission et une réception simultanée dans le temps et sur la même bande de fréquence. Cela est censé théoriquement, être capable de doubler le débit du réseau par rapport aux réseaux Half-duplex conventionnels [6][7].

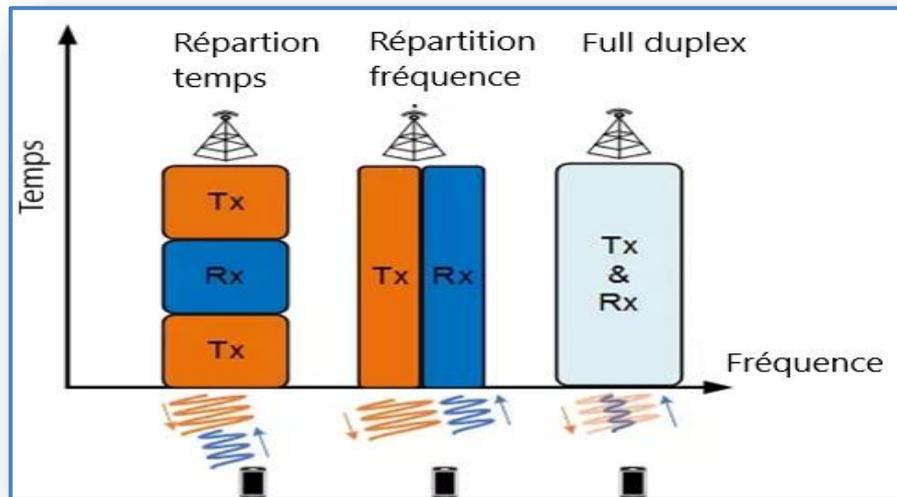


Figure I .3 Répartitions temps et fréquence dans le Half duplex et le Full-duplex

4.1.3. Beamforming

Le Beamforming permet de constituer des faisceaux très directifs vers les terminaux. Ceci assure une utilisation plus efficace de l'énergie. Lors de la transmission, la focalisation du faisceau offre la capacité de concentrer l'énergie émise par le canal radio vers un récepteur spécifique. En ajustant la phase et l'amplitude des signaux transmis, il est possible d'obtenir une addition constructive des signaux correspondants au niveau du récepteur du terminal. Cela va augmenter à la fois la puissance du signal reçu et le débit de l'utilisateur final [8].

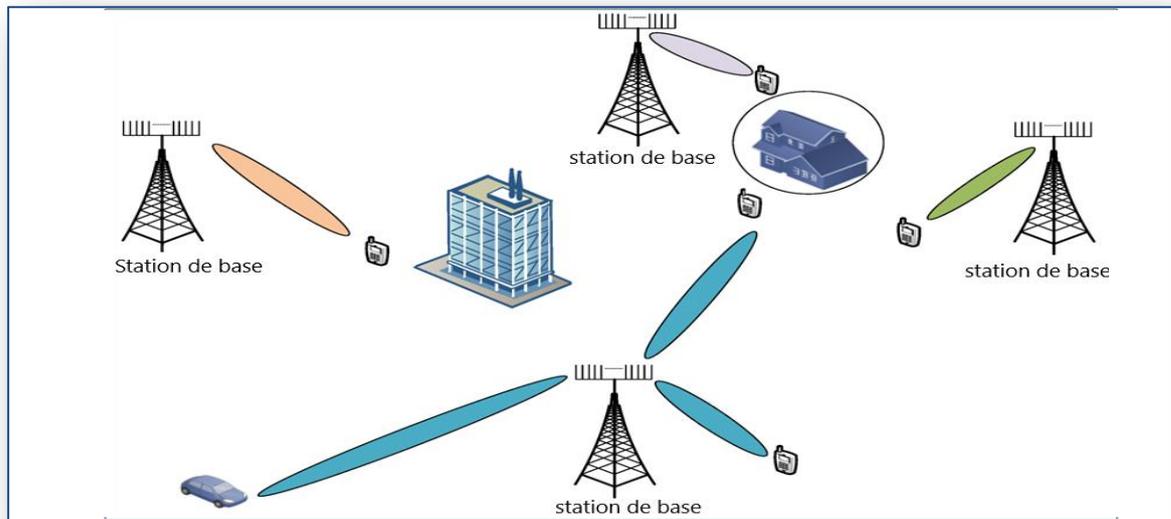


Figure I .4 La technologie Beamforming

4.1.4. Small-cell

Actuellement, le déploiement des réseaux mobiles est basé sur l'utilisation des stations de base dites «macro». Elles sont installées dans des sites dotés d'antennes de forte puissance afin de garantir la couverture d'une zone et d'offrir une qualité de service meilleure.

Néanmoins, l'augmentation du trafic exige aux opérateurs de densifier leurs réseaux avec des cellules plus petites «Small-cell». Cette technologie n'est pas nouvelle. Elle existe déjà mais elle est déployée à une échelle locale. Elle consiste à implémenter dans les moindres espaces des zones urbaines (stations de bus, panneaux publicitaires) des antennes pouvant émettre des données à très haut débit et à courte portée (en émettant principalement dans les bandes millimétriques). Cette technologie sera un complément pour améliorer l'efficacité des communications dans les zones urbaines. De ce fait, les Small-cells vont permettre d'augmenter la capacité du réseau, en terme de trafic [9].

Ainsi donc, la 5G va connaître une forte augmentation des volumes de données échangées et cela nécessitera, probablement, le déploiement des Small-cell deviendra alors indispensable.

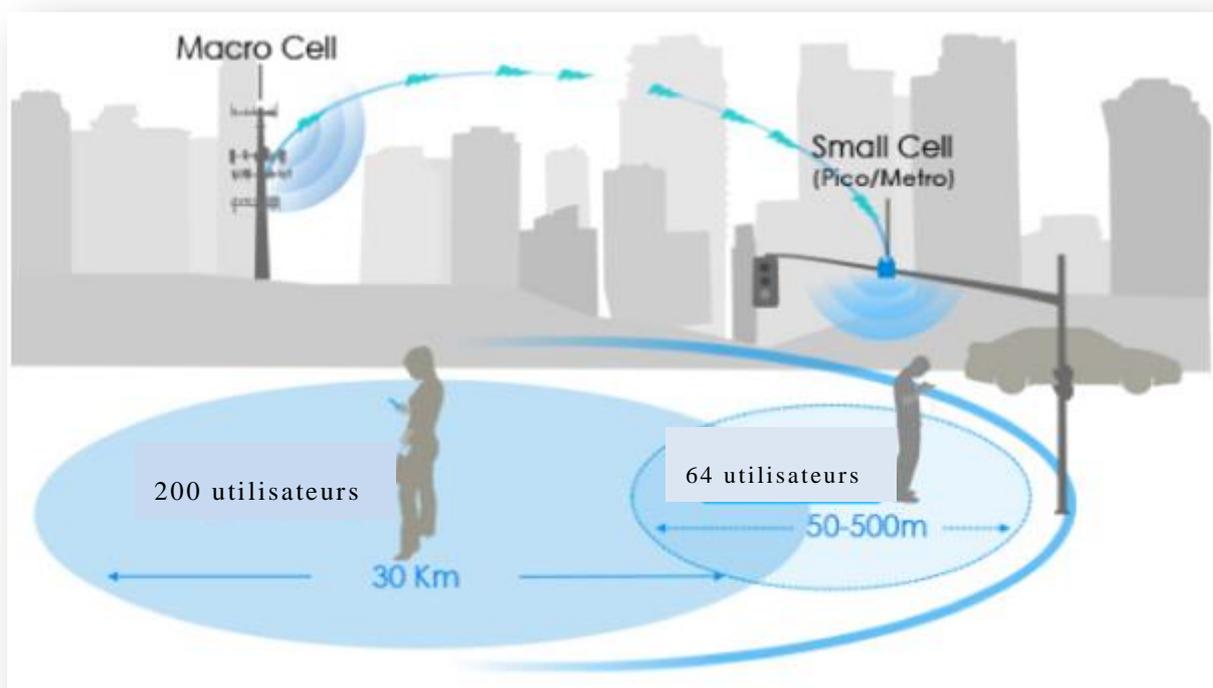


Figure I .5 Réseau mobile sans fils illustrant la technologie des Small-cell

4.1.5. MIMO Massive

La technologie MIMO n'est pas nouvelle. Elle est déjà présente dans la 3G et 4G. Dans le cas de la 5G, cette technologie a beaucoup évolué. Elle déploie de nouveaux types d'antennes constitués de centaines d'émetteurs-récepteurs de tailles plus petites. Ces derniers permettent à la 5G d'atteindre de hauts débits et une grande capacité de transmission en créant des faisceaux directs d'onde radio (Beamforming) et en les orientant vers une seule direction précise au lieu d'être émis dans toutes les directions.

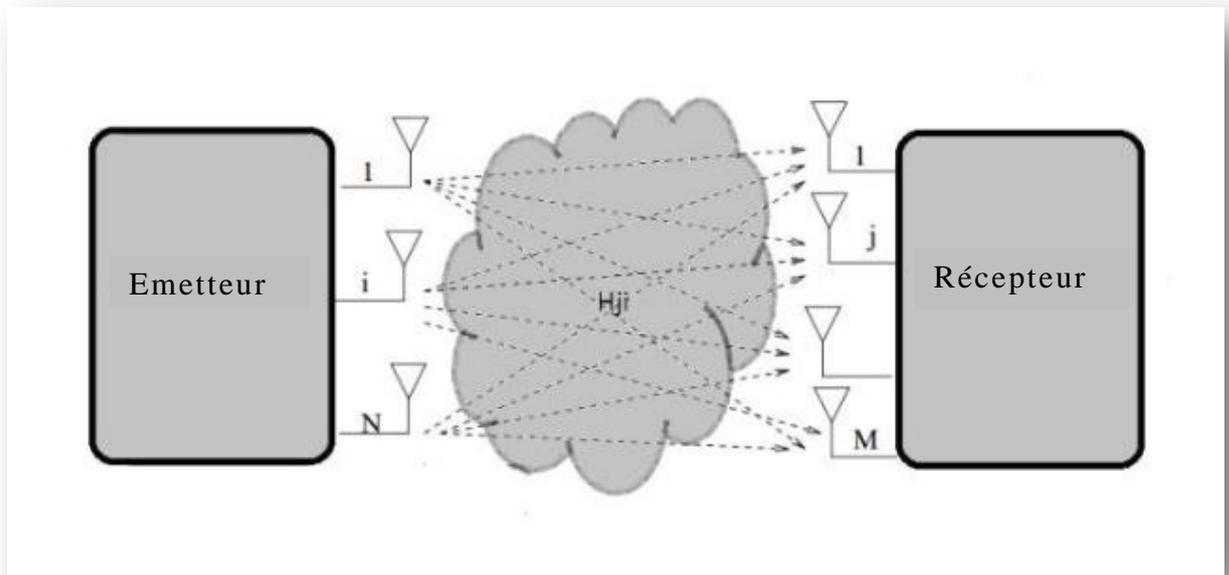


Figure I.6 La technologie MIMO

5. Les familles d'usage 5G

La 5G est plus un voyage qu'une destination. Son objectif consiste à faire évoluer les réseaux de la 4G pour répondre aux différents besoins complémentaires : augmenter les débits, supporter les communications denses de longues portées et assurer des communications quasi-temps réel. Spécialement dans des applications critiques telles que la télémédecine [10].

Trois familles d'usage caractériseront la 5G : Massive Machine Type Communications (MMTC), Enhanced Mobile Broadband (EMBB) et Ultra-reliable and Low Latency Communications (URLLC). Ces ensembles sont analysés de la manière suivante :

5.1. Massive Machine Type Communications (mMTC)

La MTC (Machine Type communication) est un paradigme de communication dans lequel un certain nombre de dispositifs ou d'objets sont connectés à l'internet ou directement connectés et communiquent entre eux avec peu ou pas d'intervention humaine. À l'arrivée des technologies 5G, de nouvelles applications des MTC sont développées pour servir un grand nombre d'objets,

introduisant ce qu'on appelle le MTC massif (mMTC), ou l'Internet massif des objets (mIoT)[11].

5.2. Enhanced Mobile Broadband (eMBB)

Une extension de services et d'applications et qui nécessitent une connexion toujours plus rapide avec des débits plus élevés [12]. Parmi les principales caractéristiques de l'eMBB, l'augmentation de la capacité d'accueillir beaucoup plus de trafic et assurer une couverture complète pour les zones urbaines.

5.3. Ultra-reliable and Low Latency Communications (URLLC)

Cela concerne des applications nécessitant des exigences strictes : la latence, la fiabilité pour des applications critiques comme les véhicules autonomes (V2X), la chirurgie/les soins de santé à distance (e-santé) ou l'automatisation industrielle à temps critique (par exemple la fabrication des semi-conducteurs) [16] [17].

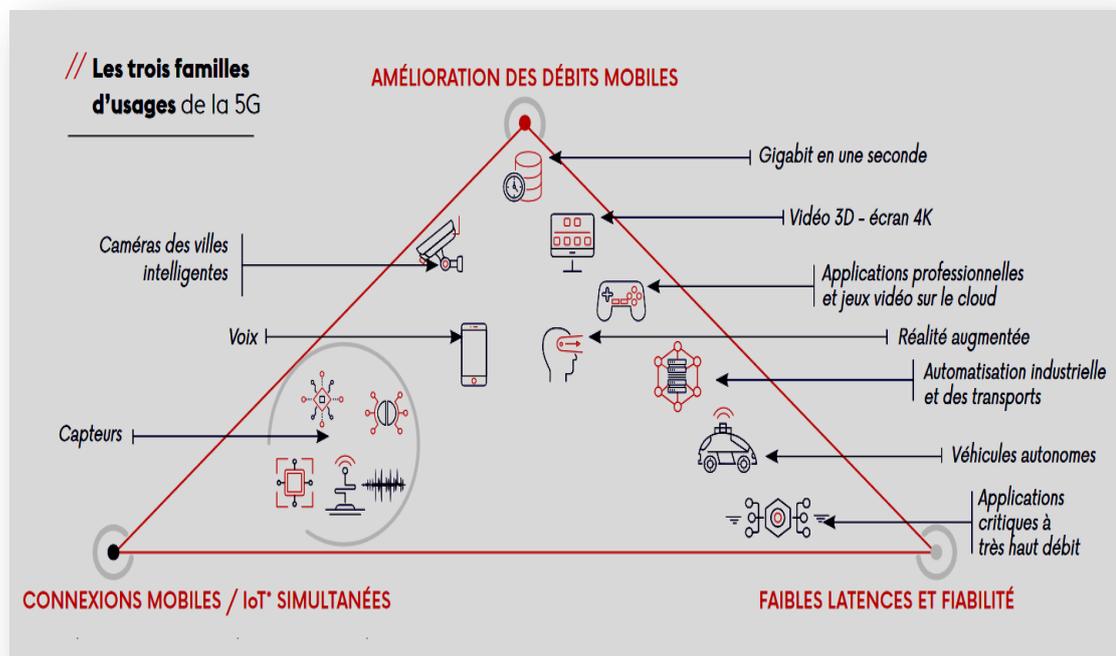


Figure I.7 Les trois familles d'usage de la 5G [38]

6. Exigences et défis de la 5G

Pour être un succès, la 5G doit aujourd'hui relever plusieurs défis afin de répondre aux attentes des différents utilisateurs.

6.1. Une plus grande capacité

Le nombre d'appareils mobiles qui devraient être connectés au réseau 5G sera de l'ordre de milliards. Avec une telle progression, nous nous attendons à ce que le volume de trafic soit encore plus important par rapport à ce qu'il est de nos jours. L'augmentation en capacité du réseau pourrait même attendre plus de 1 000 fois la demande actuelle. Or pour gérer un si grand nombre de connexions, y compris la signalisation et le volume de trafic de données, des moyens techniques et matériels doivent accompagner cette évolution. Il s'agit-là d'un défi technique très important pour la 5G. Cette exigence est considérée comme la plus difficile pour les réseaux 5G [13].

6.2. Un débit plus élevé

Etant donné que la 5G est la prochaine évolution des réseaux cellulaires, elle devrait au moins être en mesure d'offrir un débit plus élevé par rapport aux générations précédentes où l'accent a été mis sur le pic du taux de transmission de données au lieu du débit individuel. Avec l'augmentation des services et des applications qui peuvent être lancées par les utilisateurs mobiles n'importe quand et n'importe où, les pics de débit seront moins significatifs. L'accent devrait maintenant être accordé aux scénarios de la vie réelle. Différents scénarios avec différents débits cibles devraient être étudiés [18].

Le débit théorique validé des réseaux 5G est de 1 Tbit/s au km² et 100 Mbit/s de débit assuré pour l'utilisateur. Qui sera plus élevé que le débit offert avec la 4G : 1 Gbit/s par cellule, un débit qui est donc partagé entre les habitants couverts par cette cellule, soit en pratique aux alentours de 30Mb/s [15].

6.3. Disponibilité, connectivité et fiabilité massives

Le réseau 5G doit être capable de supporter tous les cas d'utilisation qui seront intégrées au réseau cellulaire. Tous les composants doivent toujours trouver

le moyen de se connecter au réseau. Le réseau 5G devrait avoir une connectivité massive permettant de prendre en charge simultanément le nombre croissant de périphériques connectés. Il devrait également assurer une grande fiabilité et disponibilité, en particulier dans les cas de situations critiques ou de gestion des crises. Dans d'autres cas tels que celui des services Cloud, le réseau devrait être disponible lorsque des ressources à la demande sont requises du côté des utilisateurs. A cela, s'ajoute une autre exigence clé pour les réseaux 5G. Il s'agit de la robustesse. Un réseau robuste et fiable est nécessaire pour garantir la sécurité des données des utilisateurs et de l'infrastructure. Enfin, le réseau 5G deviendra la plate-forme de base des applications de gestion et de surveillance de la vie courante, telles que la surveillance et le contrôle médicale, la sécurité publique, la distribution de l'eau et du gaz et la sécurité des maisons. Ceci confirme la nécessité d'un réseau avec une grande disponibilité et une grande fiabilité [18].

6.4. Une latence très faible

La latence est le temps de réponse d'un réseau mobile dont il est important de le réduire. C'est l'une des missions de la 5G qui rassemblera des cas d'utilisations hétérogènes avec des exigences très différentes en termes de latence. Certaines applications à implémenter sur les réseaux 5G nécessitent un délai très faible et estimé en millisecondes [18]. Pour les applications e-santé, par exemple, on peut citer, le cas dans un bloc opératoire, où le débit et la latence de la 5G apportent une participation considérable au développement de la télé-chirurgie.

L'objectif de la 5G est fixé à une latence globale de l'ordre de 1ms. C'est-à-dire une réduction en latence de 5 à 10 fois par rapport aux générations précédentes de réseaux cellulaires.

6.5. Coût réduit et une efficacité énergétique plus élevée

La consommation d'énergie des réseaux mobiles peut être vue sous deux angles différents :

- Une première perspective est liée à la consommation d'énergie du côté du réseau. C'est une façon de réduire la consommation globale d'énergie du réseau est d'accroître l'efficacité du spectre. Toutefois, et en raison de l'explosion du volume

de trafic, il convient également d'accorder une attention particulière à la consommation d'énergie par bit (Joules/bit) qui a un effet direct sur l'efficacité énergétique du réseau. En outre, la performance énergétique des réseaux est un élément très important pour réduire les coûts opérationnels [14].

- Dans une autre perspective, la consommation d'énergie du côté des dispositifs sans fil devrait également être considérée. Une faible consommation d'énergie pour les appareils sans fil a toujours été recherchée. Avec l'intégration de l'IoT qui pourrait inclure différents types de capteurs, la durée de vie de la batterie est très importante pour cela les dispositifs 5G devraient être en mesure de fonctionner sur une très faible consommation d'énergie, menée à la fois par une conception matérielle adéquate, des protocoles et des techniques de communication à haut rendement énergétique [14].

7. Application de la 5G pour e-santé

Un autre impact de la 5G sera l'application de ce nouveau standard dans le domaine d'e-santé.

Avec la 5G, le monde professionnel va subir une révolution technologique sans précédent. C'est le cas par exemple de la santé. Ce milieu professionnel connaît des inégalités spatiales dans le domaine des prestations médicales. Les zones rurales, certaines banlieues des grandes villes manquent de médecins y compris les généralistes, d'équipements médicaux. À la campagne comme dans les villes, des hôpitaux ont fermé ou ont réduit le nombre de lits. Pendant ce temps-là, la population est de plus en plus vieillissante et les maladies chroniques sont de plus en plus nombreuses sont les disparités sociales. Dans certaines régions, le citoyen doit faire des dizaines voire des centaines de kilomètres pour voir un médecin ou trouver une pharmacie. On parle alors de désert médical, car l'accès aux soins les plus élémentaires ne sont pas assurés. L'accès à Internet et au téléphone mobile sont dans la même situation que le monde médical. C'est pourquoi on parle aussi de fracture numérique.

Telles est la situation des pays développés comme la France. Dans les pays en développement comme en Algérie, la situation est toute autre. En effet, chez

nous en Algérie, le territoire est très vaste. Les disparités sont présentes entre le nord très peuplé, urbanisé et bien doté en équipements médicaux et un grand sud éloignés des grandes villes du nord, très peu habités et qui reste sous équipées.

Face à cette situation, la connectivité et la 5G peuvent être d'une grande utilité dans le cadre la télémédecine. Cette dernière rendra service à des milliers d'habitants. Elle peut même enrayer ou du moins réduire les disparités entre les différentes régions d'un pays. En effet, la télémédecine est régulièrement évoquée comme solution pour faciliter le suivi à distance des malades de certaines régions.

C'est ainsi que la chirurgie entre autres, veut tirer profit de la puissance de la 5G. En effet, pour évoluer, la télémédecine suit de près les progrès de la science et des outils technologiques nouveaux. En France, par exemple, dans le cadre d'une opération chirurgicale baptisée, «Lindbergh» a été réalisée avec succès à plus de 7.000 km de distance. L'intervention a été rendue possible grâce à la télé-chirurgie. En effet, une patiente du Centre hospitalier Universitaire de Strasbourg, a subi une ablation de la vésicule biliaire, alors que le chirurgien se trouvait à New York. Il s'agit d'une première mondiale dans l'histoire de la chirurgie associant la télécommunication à haut débit et la robotique de pointe [19].

Afin de réaliser cette performance qui n'a pas duré plus de 45 minutes, le professeur Jacques Marescaux de l'Institut de Recherche contre les Cancers de l'Appareil Digestif (IRCAD) a manipulé depuis New York les bras du système robotisé Zeus, conçu par la société américaine Computer Motion. La liaison entre le chirurgien et son avatar technologique situé à 7.000 km de là a été assurée par France Télécom grâce à une connexion transatlantique à haut débit par fibre optique permettant un délai constant et inférieur à 200 millisecondes entre le geste du chirurgien et le retour de l'image. Ainsi donc on peut dire que le succès est dû en partie à la 5G qui a amélioré considérablement les images de diffusion et contribuer à réduction du temps de latence [19].

L'utilisation des objets connectés est également envisagée pour accélérer le retour au domicile après une hospitalisation. Grâce à ces dispositifs, les patients sont capables de suivre leurs constantes et leurs données de santé. Ces objets

peuvent intéresser aussi les personnes âgées ou personnes à mobilité réduite ayant d'énormes difficultés de déplacement dans le cadre d'un suivi médical à distance.

Nous assistons à une révolution extraordinaire du secteur de la santé. La 5G est en train de bouleverser les pratiques de la médecine (rapports médecin /patients, réduction de distance et de temps). La médecine a devant elle, un nouvel horizon prometteur avec des meilleures qualités dans les prestations de services de la santé.

8. Modulation M-aire

Dans l'ensemble des réseaux et des systèmes télécommunications, la bande de fréquence allouée est faible par rapport au débit que nous souhaitons désirer. Afin d'augmenter le débit sans pour autant augmenter la bande passante, des modulations à plusieurs états ou modulations M-Aire ont été développées. Le principe de cette modulation consiste à associer à chaque groupe de M symboles binaires de durée T_b un symbole complexe de durée T_s [39] :

$$T_s = T_b * \log_2(M) \quad (I.1)$$

Plus la valeur de M est grande, plus l'efficacité spectrale sera grande. Ainsi, si nous choisissons une grande valeur de M, pour un débit de source donné, nous diminuerons le nombre de symboles à envoyer et donc la bande passante nécessaire [39].

8.1. La modulation par déplacement de phase M-PSK

La modulation par déplacement de phase désigne une famille de formes de modulations numériques qui ont toutes pour principe de véhiculer l'information binaire via la phase d'une porteuse. Dans une modulation PSK, à chaque symbole S_i est associée une phase φ_i . L'expression du signal modulé s'écrit :

$$u(t) = \sum_k \cos(2\pi f_c + \varphi_k) r(t - kT) \quad (I.2)$$

Où φ_k représente la phase émise dans l'intervalle k. Cette expression peut se réécrire sous la forme :

$$u(t) = z_i(t)\cos(2\pi f_c t) - z_q(t)\sin(2\pi f_c t) \quad (\text{I.3})$$

Avec :

$$z_i(t) = \sum_k \cos(\varphi_k)r(t - kT)$$

$$z_q(t) = \sum_k \sin(\varphi_k)r(t - kT)$$

Le signal $u(t)$ modulé par la modulation PSK est obtenu en combinant linéairement deux modulations d'amplitude en quadrature : le signal $Z_i(t)$, modulant la porteuse $\cos(2\pi f_c t)$, et le signal $Z_q(t)$, modulant la porteuse en quadrature (déphasée de $\pi/2$) ; $\sin(2\pi f_c t)$.

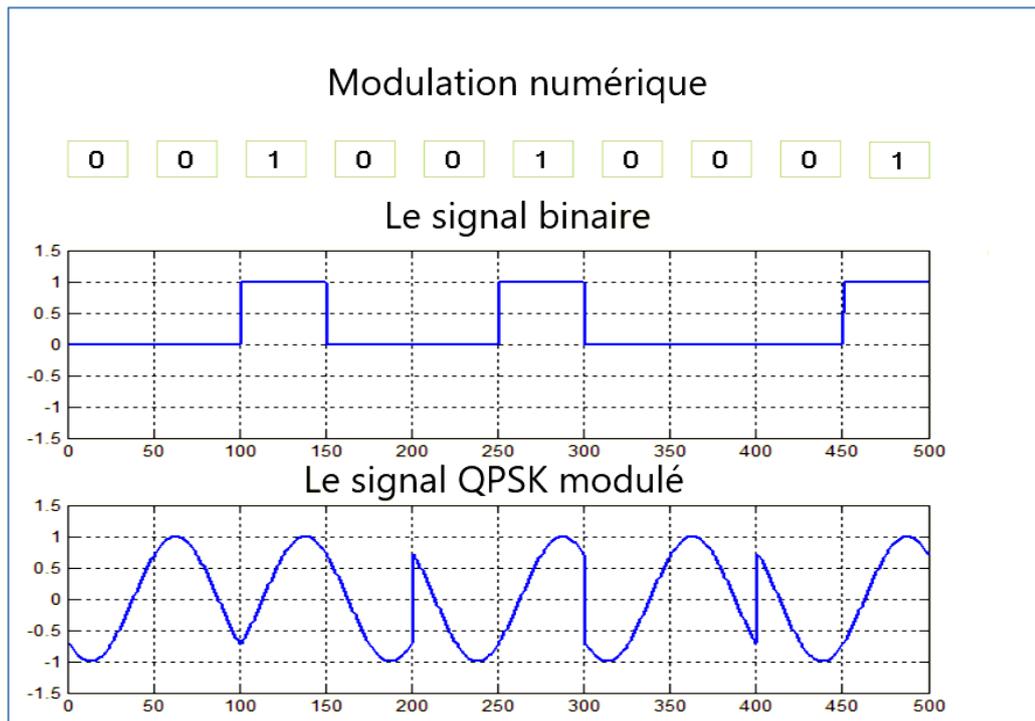


Figure I.8 Exemple de la modulation M-PSK (M=4)

8.2. La modulation d'amplitude en quadrature M-QAM

M-QAM est une forme de modulation d'une porteuse obtenue par modification d'amplitude de la porteuse elle-même et d'une onde en quadrature,

selon l'information transportée par deux signaux d'entrée. Dans une modulation M-QAM, à chaque symbole S_i est associée une amplitude a_i une phase φ_i . L'expression du signal modulé s'écrit :

$$u(t) = \sum_k a_k \cos(2\pi f_c + \varphi_k) r(t - kT) \quad (\text{I.4})$$

9. Modèles des canaux de communication sans fils

Pour la conception d'un système de communications, il est nécessaire de construire des modèles mathématiques qui caractérisent le milieu de propagation. Les modèles les plus utilisés dans les communications sans fil sont analysés et présentés de la manière suivante :

9.1. Canal de propagation par multi-trajets

Dans le cas d'un canal de propagation par multi-trajets le récepteur peut recevoir le même signal de plusieurs trajets différents c'est à dire plusieurs répliques du même signal émis arrivent au récepteur. Pour cela plusieurs phénomènes s'appliquent simultanément au trajet d'un signal. Les cinq principaux phénomènes sont : la réflexion, la réfraction, la diffraction, la diffusion et le guidage d'onde (Voir figure I.9).

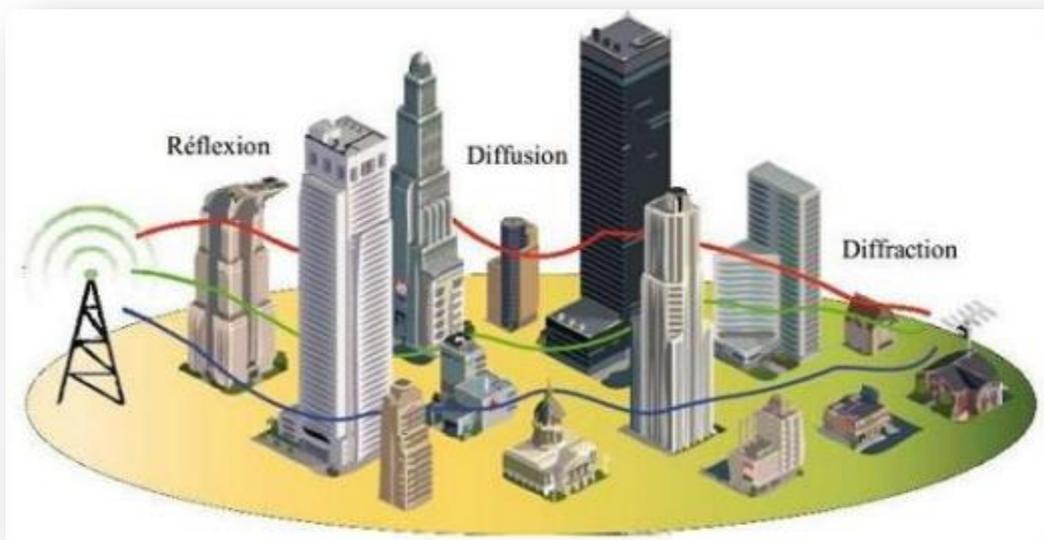


Figure I.9 Propagation par multi-trajet

9.1.1. Principales dégradations de la propagation

La dégradation de la propagation dépend de deux paramètres : la puissance du signal reçu et la distance entre l'émetteur et le récepteur. A partir de là on peut distinguer trois formes de la puissance reçue (Voir figure I.10) [28] :

- **Affaiblissement de parcours (path loss) :** Il est dû à l'augmentation de la distance entre l'antenne d'émission et l'antenne de réception.
- **L'ombrage ou évanouissement lent (shadowing ou slow fading) :** Il s'agit des variations lentes dues aux atténuations successives produites par des obstacles localisés entre l'émetteur et le récepteur.
- **Évanouissement rapide ou multi-trajets (fast fading ou multipath fading) :** Cela concerne les variations rapides causés par les trajets due à l'addition constructive ou destructive des signaux qui ne peut être déterministes.

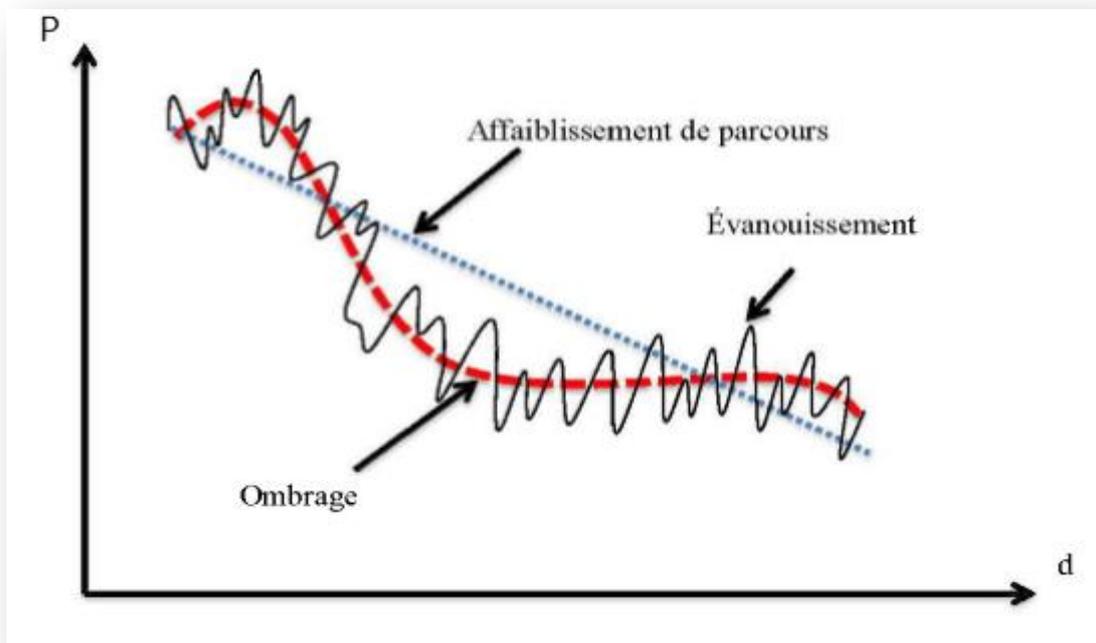


Figure I.10 Principales dégradations de la propagation

9.1.2. Distribution de canal de Rayleigh

La distribution de Rayleigh est utilisée dans un environnement de propagation multi-trajets avec la non visibilité d'une ligne directe entre émetteur et récepteur comme illustre la figure I.11. Dans cette répartition, le signal reçu est constitué d'un grand nombre de trajets indirects (appelés aussi Non Line of Sight NLOS) ayant des amplitudes et phases aléatoires, indépendants et uniformément distribués. L'enveloppe de ce signal suit une loi de Rayleigh définie par l'équation suivante [28] :

$$P(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (\text{I.5})$$

Avec :

x : est l'enveloppe du signal complexe reçu, $x = y + iz$.

σ : est l'écart type de la partie réelle (y) ou la partie imaginaire (iz).

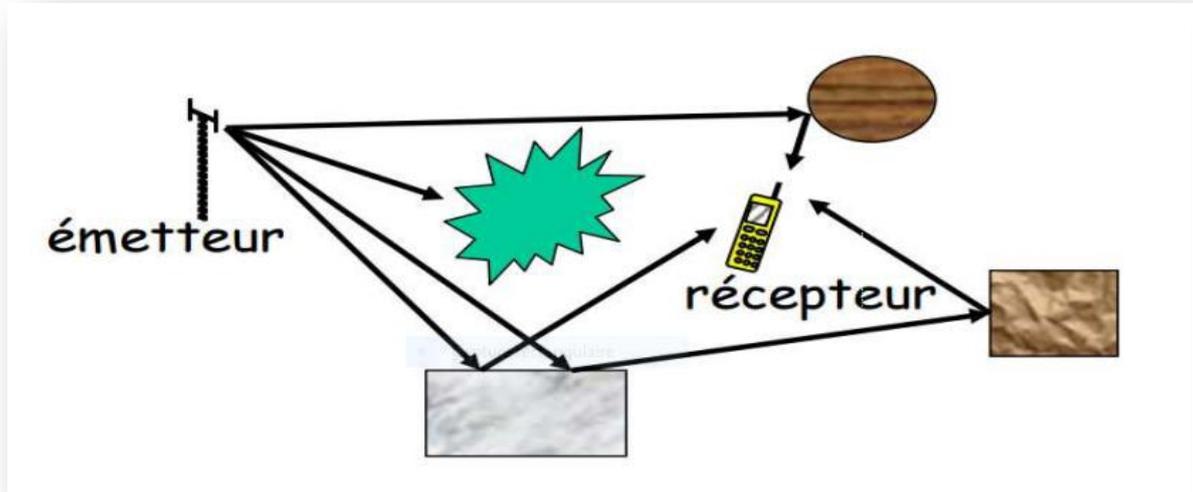


Figure I.11 Exemple de propagation multi-trajets NLOS

9.1.3. Distribution de Rice (RICIAN)

Dans d'autres situations, l'environnement de propagation est caractérisé par plusieurs trajets indirects et un trajet direct entre émetteur et récepteur comme

illustre la figure I.12 (appelé aussi *Line Of Sight* LOS). De ce fait, la densité de probabilité de l'enveloppe du signal complexe reçu suit la distribution de Rice définie par l'équation suivante [28] :

$$P(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{(x^2+s^2)}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{sx}{\sigma^2}\right) \quad (\text{I.6})$$

Avec :

I_0 : représente la fonction de Bessel modifiée de première espèce d'ordre 0.

s : représente l'amplitude du trajet direct.

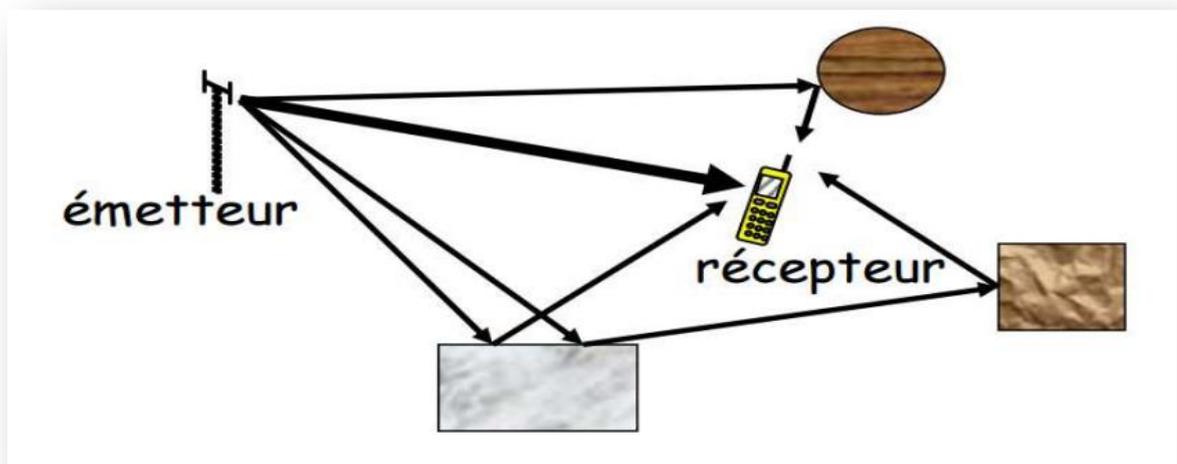


Figure I.12 Exemple de propagation multi-trajets LOS

9.2. Canal à bruit blanc additif gaussien

Le canal à bruit blanc additif gaussien (BBAG, AWGN en anglais ‘ Additive White Gaussian Noise) est le plus simple et le plus fréquent des modèles utilisés .Il modélise à la fois les bruits d’origine interne (bruit thermique dû aux imperfections des équipements...) et le bruit d’origine externe (bruit d’antenne).

Le signal reçu $r(t)$ est le résultat du signal émis $s(t)$ avec l’ajout du bruit $n(t)$ modélisé par une fonction de densité de probabilité gaussienne définie par l’équation suivante :

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (\text{I.7})$$

Avec :

x : variable aléatoire.

μ : la moyenne.

σ : variance.

10. Conclusion

Ce chapitre nous a montré que la technologie est en progrès continu. Notre mode de vie évolue lui aussi en fonction de l'évolution de ce progrès. La 5G devient une grande ambition et promet une révolution capable de répondre à nos besoins quotidiens et de plus en plus nombreux et variés. La mise en place d'une plus grande bande passante et l'obtention des temps des latences extrêmement faibles vont non seulement, contribuer à l'amélioration des réseaux existants, mais aussi, à développer de nouveaux services.

Le chapitre suivant sera consacré pour l'étude théorique de la technique d'accès multiples non-orthogonal, l'une des techniques proposées pour le déploiement des réseaux mobiles sans fil de la 5G.

CHAPITRE II

Techniques d'accès multiples non orthogonales

1. Introduction

Durant la dernière décennie, la demande et les besoins des services de communications sans-fil à haut débit ont explosé, ce qui engendre de nombreuses contraintes énergétiques sur l'implémentation des réseaux et des terminaux. Ce chapitre a pour but d'introduire une nouvelle stratégie d'allocation de ressources basées sur les techniques d'accès multiples non orthogonales (NOMA : Non Orthogonal Multiple Access).

2. L'accès multiples

L'accès multiples est une technique permettant à un certain nombre de terminaux ou de stations d'utiliser simultanément les ressources allouées d'une façon prédéterminée. Afin d'augmenter la capacité d'un réseau de communication en nombre des utilisateurs et d'optimiser l'utilisation des ressources, les réseaux mobiles sans fil ont connu une "révolution" en termes de techniques d'accès multiples. Cela concerne, notamment, les technologies de communication sans fil 1G, 2G, 3G et 4G qui utilisent respectivement l'accès multiples par répartition en fréquence (FDMA), l'accès multiples par répartition dans le temps (TDMA), l'accès multiples par répartition en code (CDMA) et l'accès multiples par répartition en fréquence orthogonale (OFDMA) [20]. Selon leurs principes de conception, les techniques d'accès multiples appartiennent à deux catégories. La première consiste en accès multiples orthogonal (OMA) dans laquelle, les ressources sans fil sont allouées orthogonalement à plusieurs utilisateurs dans le domaine temps, fréquences et codes. La deuxième catégorie concerne l'accès multiple non orthogonal (NOMA) où ce travail se concentre le plus.

3. Techniques d'accès multiples orthogonales (OMA)

Dans ces techniques, plusieurs utilisateurs transmettent sur des ressources orthogonales, de telle sorte, qu'il n'y aura pas d'interférence entre les signaux de ces mêmes utilisateurs. Parmi les techniques d'OMA, nous citons la technique

d'accès multiples par répartition de fréquences orthogonales (OFDMA) qui est basée sur la technique de modulation OFDM. Dans la section suivante, nous rappelons son principe de fonctionnement et son utilité.

3.1. La modulation multi-porteuses

Contrairement aux techniques mono-porteuses qui modulent sur une porteuse unique à un débit de R , la modulation numérique multi-porteuse consiste à subdiviser le flux de données en N sous flux de débit inférieur $\frac{R}{N}$, et de les transmettre sur des sous porteuses adjacentes. Ceci peut être considéré comme une transmission parallèle dans le domaine fréquentiel. La figure II.1, illustre la dualité temps-fréquence entre les modulations mono et multi-porteuses. La modulation mono-porteuse réalise un multiplexage temporel alors que la modulation multi-porteuses réalise un multiplexage fréquentiel [23].

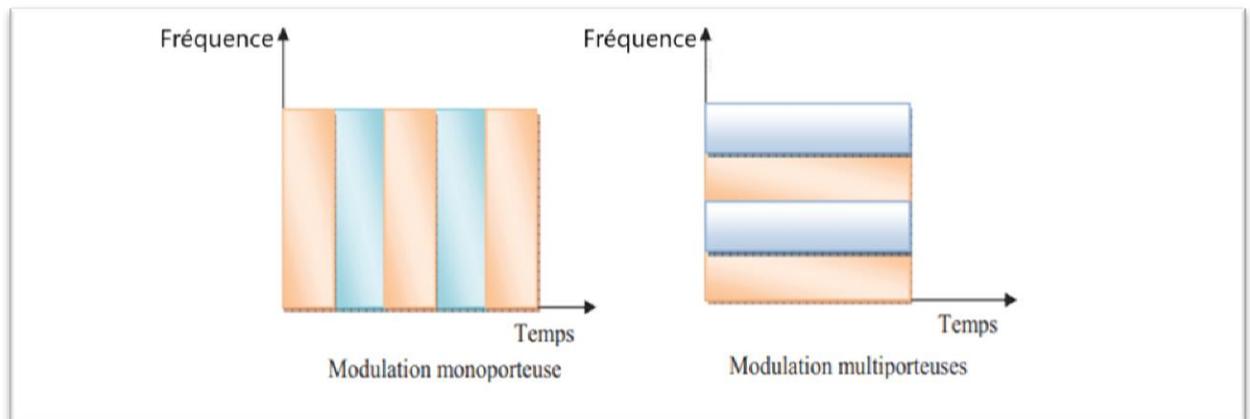


Figure II.1 : Dualité temps-fréquence des modulations

Parmi les modulations multi-porteuses les plus célèbres est la modulation OFDM, utilisée largement dans les systèmes de transmission actuels (Wifi, LTE,...)

3.2. L'OFDM

Les techniques de modulation sur les canaux à trajets multiples sont devenues un outil nécessaire pour concevoir et construire les futurs réseaux universels de communications mobiles [21]. Pour cela, la technique OFDM est utilisée dans les communications sans fil 4G en raison, de sa grande résistance aux

interférences ainsi que l'exploitation des propriétés de la transformée de Fourier discret (DFT)[21].

L'OFDM a trouvé beaucoup d'application notamment pour la télévision numérique terrestre (DVB-T) ou pour la télévision mobile personnelle portable (DVB-H), pour la radio numérique (DAB et DRM) et aussi pour les réseaux sans fil qui s'appuient spécialement sur les normes 802.11a, 802.11g/n (WiFi) et 802.16 (WiMax) [20].

3.2.1. Le Principe de la modulation l'OFDM

Le principe de fonctionnement du système OFDM, consiste à diviser la bande passante disponible B en un certain nombre N_{sub} de sous-bandes (sous-porteuses ou sous canaux). Chaque sous porteuse occupe une largeur de bande $\Delta f = B/N_{sub}$ (B : la bande passante disponible) ; de ce fait l'OFDM lutte contre la sélectivité en fréquence du canal multi-trajets (le signal possède une bande de largeur de fréquence plus grande que la bande de cohérence du canal de propagation), c'est pourquoi la durée du symbole devient importante devant l'étalement des retards, où elle est augmentée par un facteur de N_{sub} . Les données sont transmises avec un débit R (en bauds), et chaque symbole à une période de $T_s = \frac{N}{R}$. Le signal OFDM dans un intervalle de temps s'exprime comme suit :

$$\mathbf{S}(t) = \frac{1}{\sqrt{N_{sub}}} \sum_{k=0}^{N_{sub}-1} \mathbf{C}_k e^{j2\pi\Delta f t}, \quad 0 \leq t \leq T_s \quad (\text{II.1})$$

\mathbf{C}_k sont les vecteurs complexes de données définis à partir d'éléments binaires par une constellation de modulation d'amplitude en quadrature QAM à plusieurs états (4, 16, 64, de façon générale à 2^m états). Ces données sont des symboles M -aires. On peut représenter un modulateur OFDM par le schéma-bloc suivant :

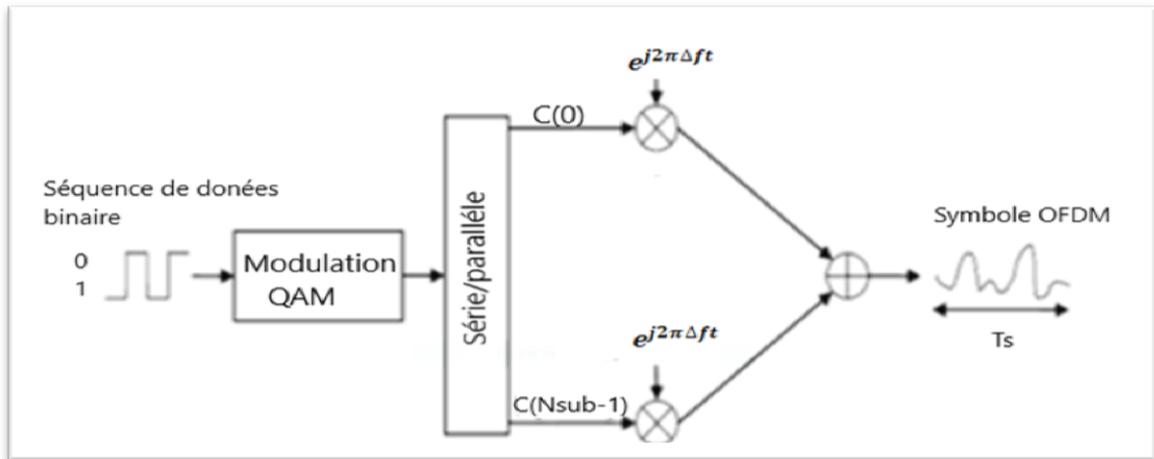


Figure II.2 Schéma-bloc d'un modulateur OFDM

Pour les communications sans fil, l'OFDM intervient dans l'efficacité et la rentabilité de transmission dans le canal radio mobile pour un environnement multi-trajets [25]. Elle envoie les données en utilisant un grand nombre de porteuses pour une bande très étroite. L'espace de fréquence et de synchronisation de la porteuse est choisi de telle sorte que les porteuses sont orthogonales pour éviter les interférences. Ce concept de modulation consiste à répartir les données binaires à haut débit sur N_{sub} sous-canaux orthogonaux à faible débit, comme si on combinait le signal à transmettre sur un grand nombre de systèmes de transmission indépendants et de fréquences porteuses différentes [25].

3.2.2. Rappel de la notion d'orthogonalité

L'orthogonalité de deux fonctions notées respectivement : $a(t)$ et $b(t)$ dans l'intervalle $[T_n, \dots, T_k]$ par la relation suivante :

$$\int_{T_n}^{T_k} a(t) * b(t) dt = 0 \quad (\text{II.2})$$

Cette notion est la propriété principale sur laquelle s'appuie l'OFDM pour transmettre les différents signaux d'informations dans un même canal et de les détecter sans interférence [24].

On peut percevoir la notion d'orthogonalité du signal OFDM dans le domaine fréquentiel où chaque sous porteuse OFDM a une réponse en fréquence sinus

cardinal: $\text{sinc}(x)$. Cette forme a un lobe principal étroit avec de nombreux lobes latéraux. L'orthogonalité dans le domaine fréquentiel est réalisée lorsque le maximum de chaque sous porteuse correspond au minimum des autres sous porteuses. En d'autres termes, le maximum du lobe principal correspond à un "zéro" des autres (Voir figure.II.3). Cette condition permet, ainsi, d'avoir une occupation spectrale idéale et d'éviter les interférences entre sous porteuses. Le spectre total du signal OFDM est la somme des spectres individuels des différentes porteuses.

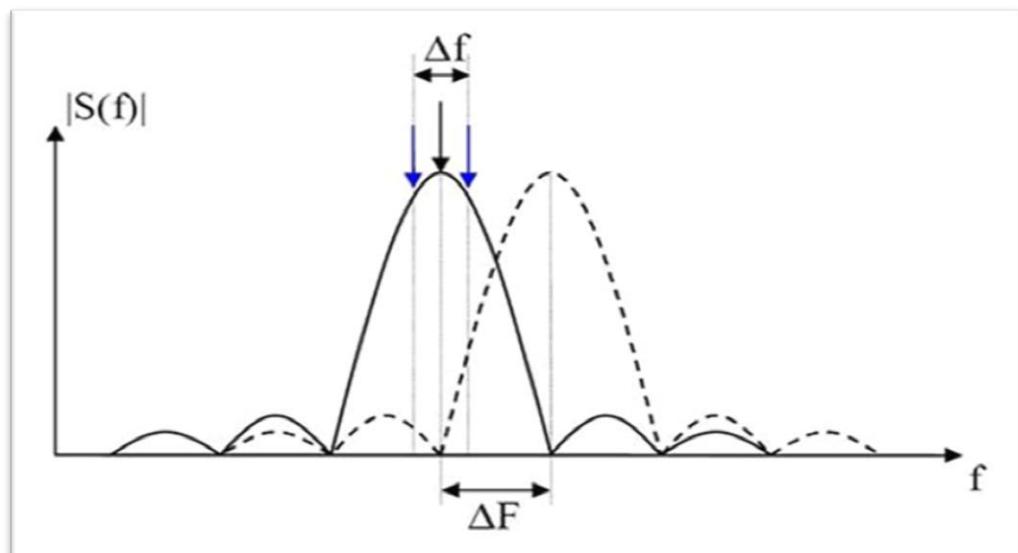


Figure II.3 : Exemple de porteuses orthogonales dans le domaine fréquentiel.

3.2.3. La Chaîne de transmission OFDM

La chaîne de transmission OFDM, comme illustrée sur la figure II.4 se compose de trois parties : la partie émission, le canal de transmission et enfin la partie réception.

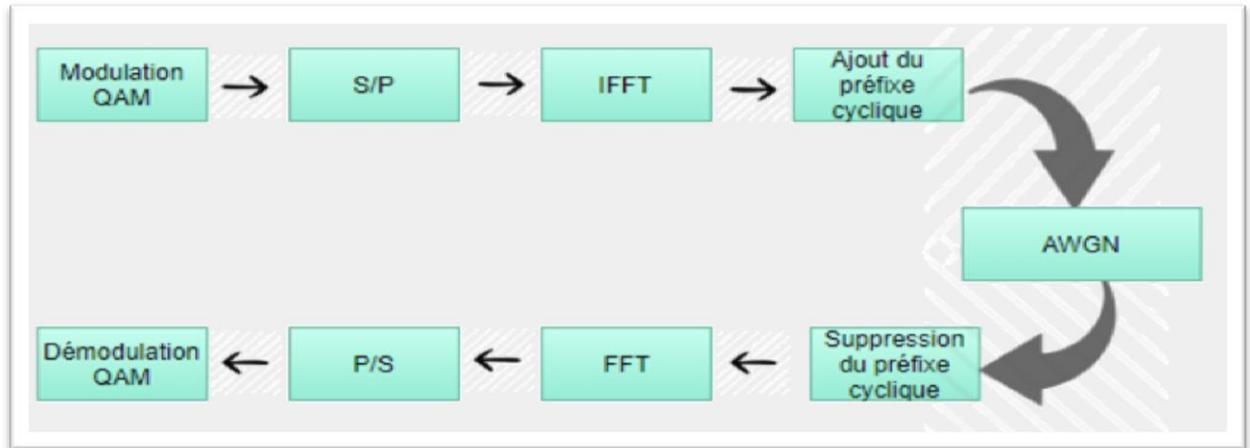


Figure II.4 Diagramme en bloc de la chaîne de transmission OFDM

Dans un émetteur OFDM, une séquence de bits de données binaires, qu'on désire transmettre est d'abord générée et mappée en symboles de données complexes, à l'aide de la technique de modulation d'amplitude en quadrature QAM. Par la suite, les symboles séries C_k sont convertis en symboles parallèles. Ces derniers sont utilisés comme entrée du bloc IFFT qui amène le signal dans le domaine temporel. Le bloc IFFT a pour rôle de moduler les symboles sur N_{sub} sous porteuses orthogonales. Pour avoir à la fin, la somme des N_{sub} symboles modulés qui va aussi former le symbole OFDM [26]. Qui s'écrit sous forme complexe :

$$S_n = \sum_{k=0}^{N_{sub}-1} C_k e^{j\frac{2\pi nk}{N_{sub}}} \quad (II.3)$$

Avec :

S_n : représente un vecteur complexe d'un symbole OFDM.

C_k : représente les symboles de données complexes.

N_{sub} : représente le nombre de sous porteuse

k : représente un indice de sous porteuses égal à $k = 0, \dots, N_{sub}-1$

Pour mieux lutter contre les interférences entre porteuses, un préfixe cyclique CP est ajouté à chaque symbole OFDM. Il s'agit, tout simplement, d'insérer une copie de la dernière partie du symbole OFDM avant le symbole

considéré. La période du symbole est plus longue grâce à cette extension. Par ailleurs, il faut préciser, que malgré le fait que la période soit plus longue, cela n'a aucun incident sur le spectre fréquentiel du signal. De ce fait l'orthogonalité est maintenue et des interférences éliminées.

$$T_s = T_u + T_{cp} \quad (\text{II.4})$$

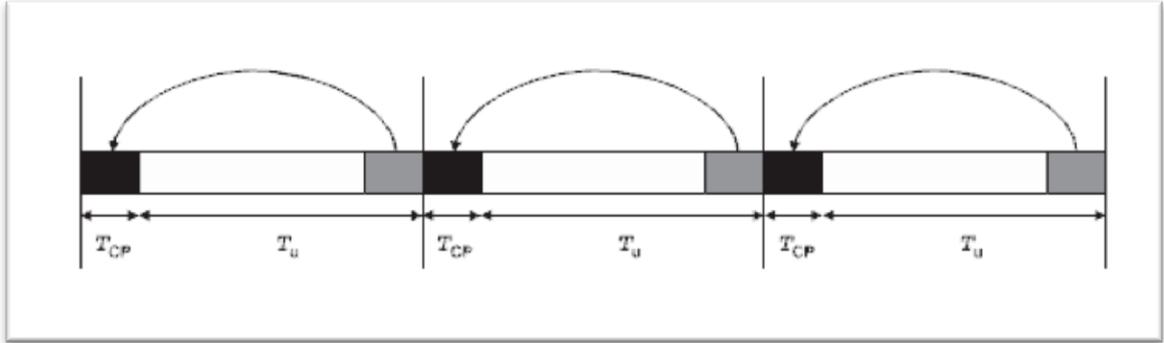


Figure II.5 Insertion du préfixe cyclique

Le signal à l'entrée du récepteur s'écrit de la façon suivante :

$$Y_n = \sum_{k=0}^{N_{sub}-1} C_k H_k e^{j \frac{2\pi n k}{N_{sub}}} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

H_k : représente la fonction de transfert du canal.

Dans un récepteur OFDM, l'inverse du processus émetteur est appliqué. Après avoir retiré le CP de chaque symbole OFDM, on constate que chaque symbole reçu $R_k = C_k H_k$, est converti en symbole du domaine fréquentiel par application de la FFT à N_{sub} point qui peut être représenté par :

$$C_k = \sum_{n=1}^{N_{sub}} R_k e^{-j \frac{2\pi n k}{N_{sub}}} \quad (\text{II.6})$$

Par la suite, une estimation et une égalisation de canal dans le domaine fréquentiel sont effectuées et les symboles résultants sont démodulés pour récupérer les données.

3.2.4. La technique d'accès multiple OFDMA

L'OFDMA est une technique d'accès dans la liaison descendante (Downlink). Elle combine deux techniques : TDMA et FDMA. Elle est dérivée de la modulation OFDM. Elle permet, par contre, un accès multiple en partageant les ressources radio entre plusieurs utilisateurs.

Son principe consiste à diviser la bande totale en plusieurs sous bandes orthogonales de tailles étroites. Ce processus permet de lutter contre le problème des canaux sélectifs en fréquences et aussi, contre les interférences inter symboles. Elle autorise également, un débit binaire plus élevé, pour une même largeur spectrale et cela grâce à sa grande efficacité spectrale (nombre de bits transmis par Hertz). Tout cela s'ajoute à sa capacité de conserver un débit élevé même dans des environnements défavorables avec des échos et des trajets multiples des ondes radio [27].

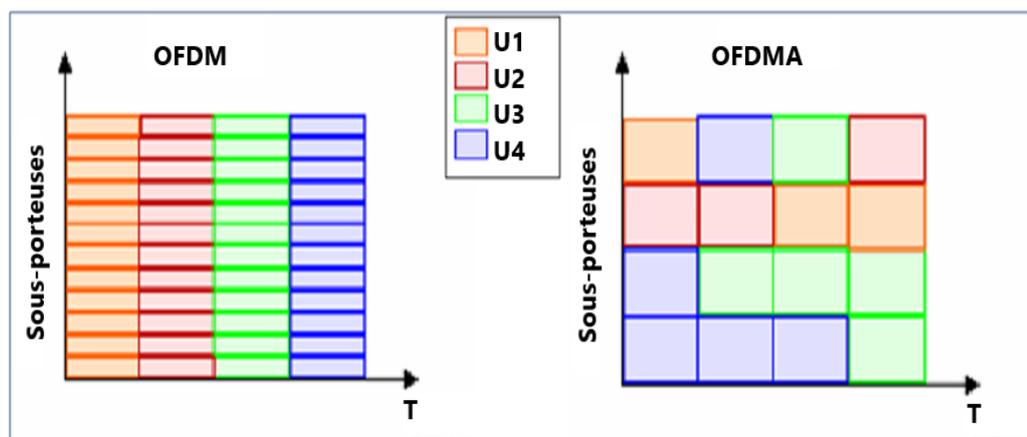


Figure II.6 Allocation de ressources OFDM/OFDMA

3.2.5. Les avantages de l'OFDM

Après avoir décrit et analysé la technique d'accès multiple OFDMA, nous énumérons ses avantages qui sont :

- La robustesse des signaux OFDM contre les canaux sélectifs : En divisant un canal sélectif, d'une large bande en fréquence, en multiples sous-

canaux à bande étroite non sélectifs avec une notion d'orthogonalité entre les canaux très simples à égaliser.

- La simplicité d'utilisation : l'OFDM exploite les transformées et transformées inverses de Fourier rapide (IFFT et FFT) pour répartir l'information entre un grand nombre de sous porteuses orthogonales qui soient aussi proche que possible les uns des autres.
- Une exploitation optimale de la bande passante disponible et une haute efficacité spectrale.

3.2.6. Les inconvénients de l'OFDM

La modulation OFDM n'a pas que des avantages. Elle a aussi un certain nombre d'inconvénients qui limitent le développement d'un réseau 5G, dont voici quelques-uns :

- Le rapport de la puissance maximale et la puissance moyenne du signal OFDM provoque un problème pour l'évaluation du PAPR. Le rapport en question conduit à une saturation de l'amplificateur à l'émission.
- Sensibilité aux erreurs de synchronisation qui conduit à un taux d'erreurs élevé, et engendre ainsi de l'interférence entre sous porteuses qui peut détruire l'orthogonalité.
- L'intervalle de garde provoque une perte d'efficacité spectrale.

4. Techniques d'accès multiples non-orthogonales

Les réseaux de communications mobiles sans fils sont devenus un élément indispensable dans la vie quotidienne. "N'importe quelle personne qui se trouve n'importe où peut communiquer avec n'importe qui à tout moment par n'importe quel moyen de communication"[29]. Ainsi le développement rapide des services mobiles ; Internet des objets (IoT) et la croissance explosive de la demande de trafic entraîne des exigences élevées peuvent se résumer comme suit [31] :

- L'efficacité spectrale devrait augmenter avec un facteur de 5 à 15 fois par rapport à la technologie actuelle.
- Une connectivité massive 10 fois plus élevée que celle de la 4G.

- Une faible latence avec un faible coût.
- Un débit très élevé.
- Une très grande fiabilité.
- Une excellente équité pour les différents utilisateurs avec la prise en charge des divers services innovants.

Il sera difficile de répondre aux futures demandes avec les taux de transmission actuels, qui sont basés sur l'OFDM, étant donné qu'elles présentent des limites strictes; limitant toute modification et amélioration des systèmes. Du point de vue de son principe de conception où les ressources (fréquences) sont allouées orthogonalement à plusieurs utilisateurs, le nombre d'utilisateurs pris en charge est limité par le nombre de ressources orthogonales disponibles. Un autre problème, l'OFDM exige l'inclusion du préfixe cyclique pour lutter contre les interférences inter-symbole (IIS) qui engendre une perte d'efficacité spectrale. Dans ce cas-là, la 5G est appelée à adopter une nouvelle technologie d'accès multiples [32].

C'est dans cette optique, que des chercheurs des réseaux et systèmes de communication numérique ont récemment proposé plusieurs techniques d'accès multiples pouvant être intégrées pour les réseaux de communication sans fils de la 5G et afin de répondre aux nouvelles exigences. Parmi ces techniques présentées, il y a par exemple, l'utilisation d'une transmission de signaux non orthogonaux. En effet, ce concept innovant d'accès multiples non orthogonaux a été proposé. Il consiste à prendre en charge un nombre des utilisateurs supérieur au nombre de ressources disponibles (temps/fréquence/code).

Les techniques d'accès multiples non orthogonales travaillent dans une autre idée que les techniques OMA, elles allouent les mêmes ressources aux différents utilisateurs et donc le nombre d'utilisateurs servit augmente.

Les techniques d'accès non orthogonales peuvent être divisées en deux catégories : NOMA dans le domaine de puissance et NOMA dans le domaine de code.

La première catégorie de PD-NOMA introduit le non orthogonalité à travers la superposition des signaux des différents utilisateurs dans le domaine de puissance. Il s'agit d'une nouvelle technique, qui jusque-là, n'est pas suffisamment prise en compte [31]. Pour assurer la détection des signaux, les techniques de PD-NOMA utilisent l'annulation des interférences successives en appliquant le détecteur SIC qui effectue la séparation des signaux au niveau de récepteur.

La deuxième catégorie, quant à elle, s'appuie sur un ensemble de techniques comme celles de la SCMA, de la PDMA et la MUSA. D'autres schémas pourront être proposés pour faire évoluer l'avenir de la 5G et se défaire ainsi des limites des plus anciennes générations.

4.1. Techniques d'accès multiples non-orthogonales dans le domaine de puissance (PD-NOMA)

Les techniques de PD-NOMA permettent à de nombreux utilisateurs d'avoir accès à toutes les ressources de fréquence et de temps. Ceci va améliorer l'efficacité spectrale selon le mécanisme Superposition du Code (SC). Ce dernier repose principalement sur le multiplexage de différents signaux des utilisateurs, en attribuant un niveau de puissance différent à chacun d'entre eux, cela est selon l'état du canal de chaque utilisateur ; afin d'assurer un gain maximal dans les performances du système (Voir Figure II.7).

À la réception, la détection des différents signaux des utilisateurs est réalisée par le détecteur SIC, où les signaux sont décodés successivement. Sur ce point lorsqu'un signal est décodé, il sera soustrait du message reçu avant le décodage du signal de l'utilisateur suivant.

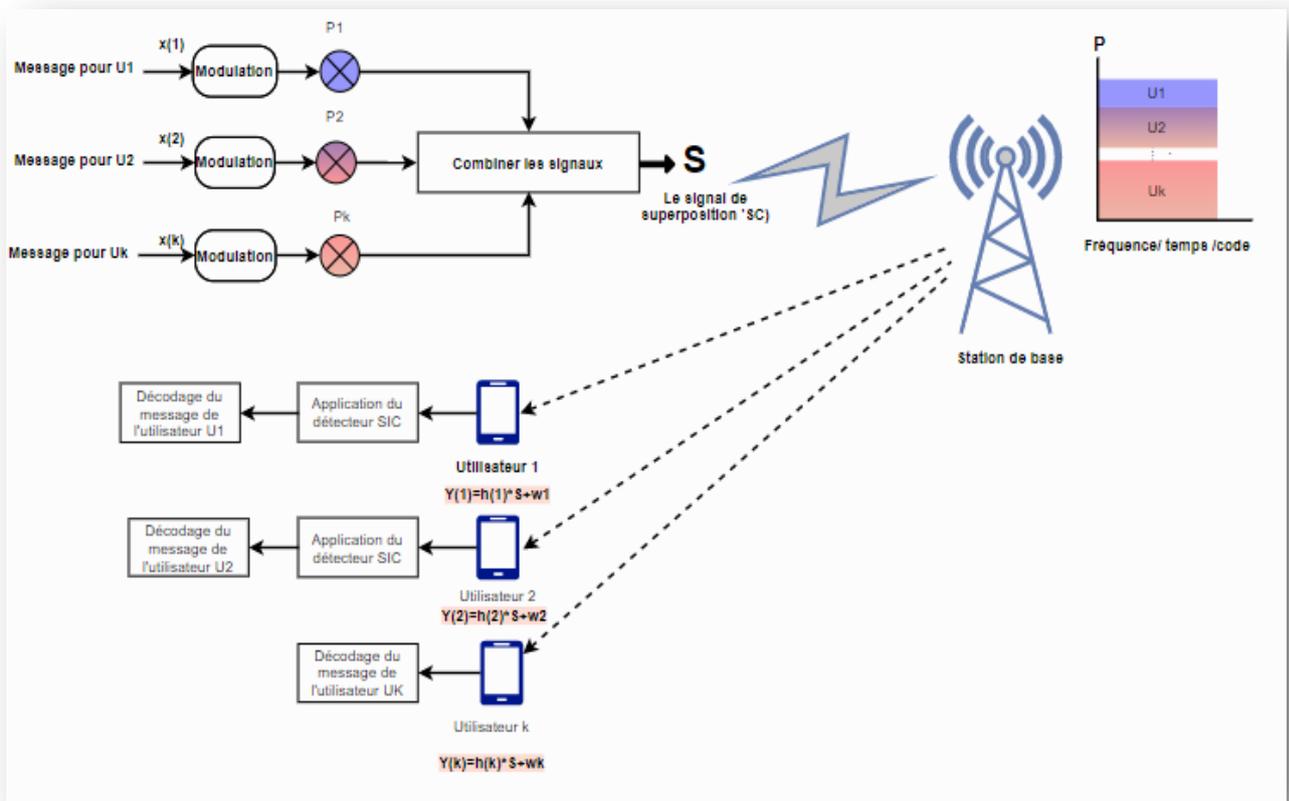


Figure II.7 Les mécanismes de la PD-NOMA

4.1.1. L'allocation de puissance et la superposition de code (SC)

La SC permet à l'émetteur (Base Station : BS) de transmettre simultanément les signaux de plusieurs utilisateurs. Les signaux de chaque utilisateur sont codés et modulés de façon indépendante. La BS attribue, ensuite à chaque utilisateur un niveau de puissance selon l'état de son canal. Les utilisateurs proches de la station de base se voient attribuer de faibles niveaux de puissance, car les états de leurs canaux sont meilleurs que celle des utilisateurs éloignés. Ces derniers subissent, en plus de l'éloignement, des évanouissements et des affaiblissements importants [33]. Cependant, l'ensemble des signaux des différents utilisateurs sont superposés et forment un seul signal représenté sous la formule suivante :

$$S = \sum_{i=1}^k \sqrt{P(i)} X(i) \quad (\text{II.7})$$

La figure II.8 présente un système simple de PD-NOMA composé d'une BS et de deux utilisateurs. Supposons que x_1 et x_2 sont les signaux à transmettre, respectivement, de la BS à l'utilisateur numéros 1 et numéros 2.

La station de base transmet le signal suivant :

$$S = \sqrt{P_1}X_1 + \sqrt{P_2}X_2 \quad (\text{II.8})$$

Avec :

P_1, P_2 : La fraction de la puissance allouée aux utilisateurs 1 et 2

$P_1 + P_2 = P$: La puissance d'émission totale.

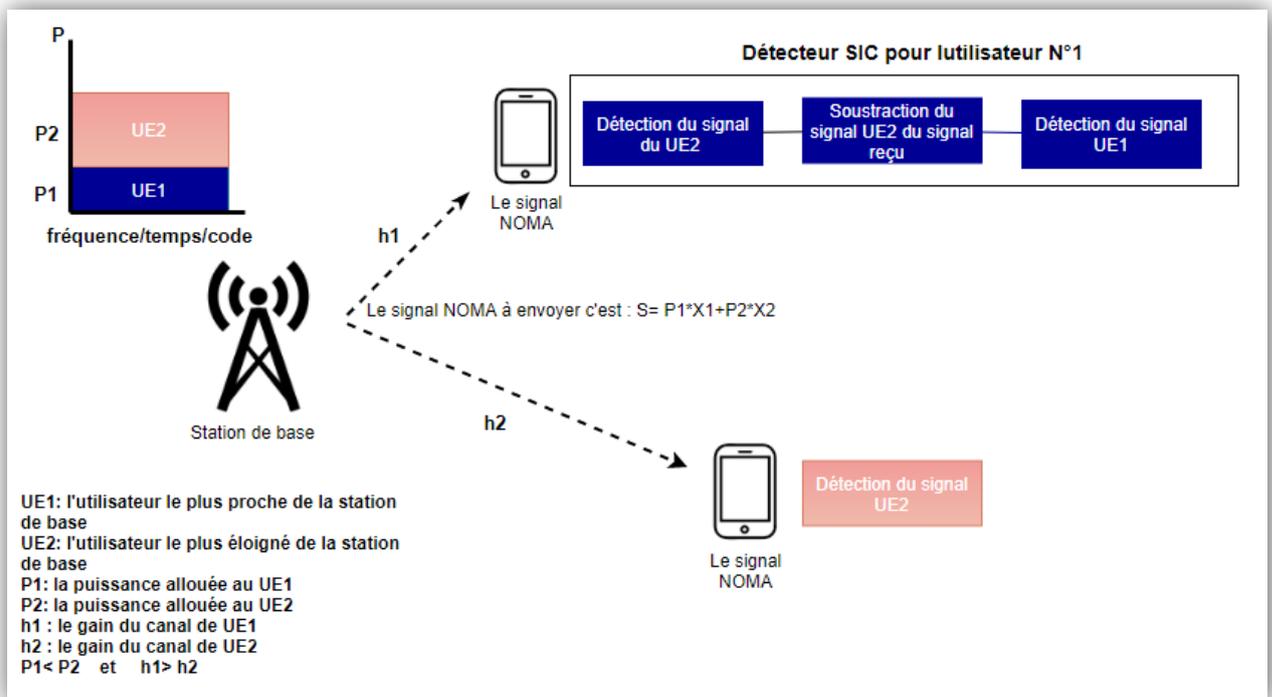


Figure II.8 Allocation de puissance pour la liaison descendante

Dans un réseau à k utilisateurs, le signal reçu par le k -ième utilisateur est représenté par :

$$Y_k = \sum_{i=1}^k h_k S + w_k \quad (\text{II.9})$$

$$Y_k = h_k \sum_{i=1}^k \sqrt{P(i)} X(i) + w_k \quad (\text{II.10})$$

Avec :

h_k : représente le gain du canal du k-ième utilisateur.

w_k : représente le bruit blanc additif gaussien.

Chaque utilisateur reçoit un signal qui contient ses données et celles des autres utilisateurs.

4.1.2. Le détecteur SIC (Successive Interference Cancellation)

Le signal reçu au niveau de chaque récepteur est la combinaison linéaire de tous les signaux des différents utilisateurs. Pour séparer les différents signaux, on fait appel au détecteur SIC. Son principe consiste à éliminer les interférences des utilisateurs déjà détectés, en les soustrayant du signal reçu. Ainsi donc, lorsque le signal d'un utilisateur est décodé, les messages des autres utilisateurs seront considérés comme des interférences. De sorte que les signaux des autres utilisateurs seront décodés avec l'avantage de ne pas avoir des interférences de la part du premier comme il l'aurait déjà été détecté [33].

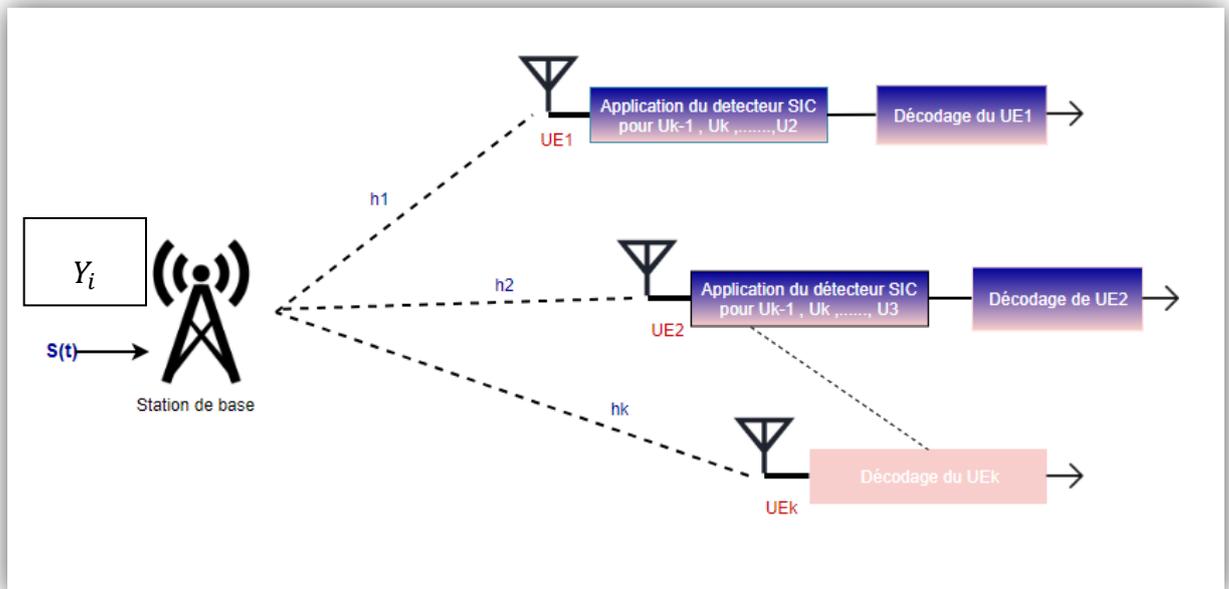


Figure II.9 Principe de fonctionnement du détecteur SIC

Pour mettre en œuvre le détecteur SIC, il faut d'abord que les signaux soient analysés en premiers, selon un ordre **décroissant** de leur puissance. D'une part, le signal de données de l'utilisateur avec la puissance la plus élevée est retranché du signal reçu et traite le signal de l'utilisateur dont la puissance est faible comme du bruit.

D'autre part, l'utilisateur ayant la puissance faible effectue le détecteur SIC, où il décode les données de l'utilisateur avec la puissance la plus élevée et procède ensuite à les soustraire du signal reçu. De ce fait, il reste seulement ses propres données pour les décoder.

A partir de ce principe, son rapport signal/bruit (SNR) se représente de la manière suivante [33] :

$$SNR_k = \frac{P_k h_k^2}{N_0 W + \sum_{i=1}^k P(i) h_k^2} \quad (\text{II.11})$$

Avec :

W : représente la largeur de la bande de transmission.

N_0 : représente la densité spectrale de la puissance du bruit blanc additif gaussien.

P_k : représente la puissance allouée au k-ième utilisateur.

Quant au SNR de l'utilisateur le plus proche, il se présente de la façon suivante [33] :

$$SNR_1 = \frac{P_1 \cdot h_1^2}{N_0 \cdot W} \quad (\text{II.12})$$

Avec :

P_1 : représente la puissance allouée à l'utilisateur le plus proche.

Partant de ce fait, le débit de chaque utilisateur dans un système PD-NOMA s'exprime par :

$$R_k = W \log_2 \left(1 + \frac{P_k h_k^2}{N_0 W + \sum_{i=1}^k P(i) h_k^2} \right) \text{ [bps]} \quad (\text{II.13})$$

En résumé, la figure II.10, montre un scénario de trois utilisateurs :

Le signal PD-NOMA composite construit pour le réseau est donné par :

$$\mathbf{S} = \sqrt{P_1} \mathbf{X}_1 + \sqrt{P_2} \mathbf{X}_2 + \sqrt{P_3} \mathbf{X}_3 \quad (\text{II.14})$$

Le signal reçu par chaque utilisateur peut être décrit comme suit :

$$\mathbf{Y}_k = \mathbf{h}_k \mathbf{S} + \mathbf{w}_k \quad (\text{II.15})$$

Les utilisateurs avec des gains du canal h_1 , h_2 et h_3 , où h_1 est le plus élevé et h_3 le plus faible. La station de base va attribuer la puissance la plus élevée à l'utilisateur U3, le plus éloigné. La plus faible puissance reviendra à l'utilisateur U1, car il est le plus proche de la station. Cela garantit que les utilisateurs éloignés ayant un faible gain de canal recevront des niveaux d'interférence plus faibles de la part des utilisateurs aux gains élevés du canal.

L'utilisateur U3 considère les signaux des utilisateurs U1 et U2 comme du bruit et décode facilement son propre signal.

L'utilisateur U1 utilise le détecteur SIC pour, d'abord décoder le signal de l'utilisateur U3, puis il va le soustraire du signal reçu. Il va faire, ensuite la même opération avec le signal de l'utilisateur U2 pour enfin décoder son propre signal.

L'utilisateur U2 considère que, le signal de l'utilisateur U1 comme du bruit. Il s'occupe du signal de l'utilisateur U3 qu'il va soustraire du signal reçu pour enfin décoder son propre signal.

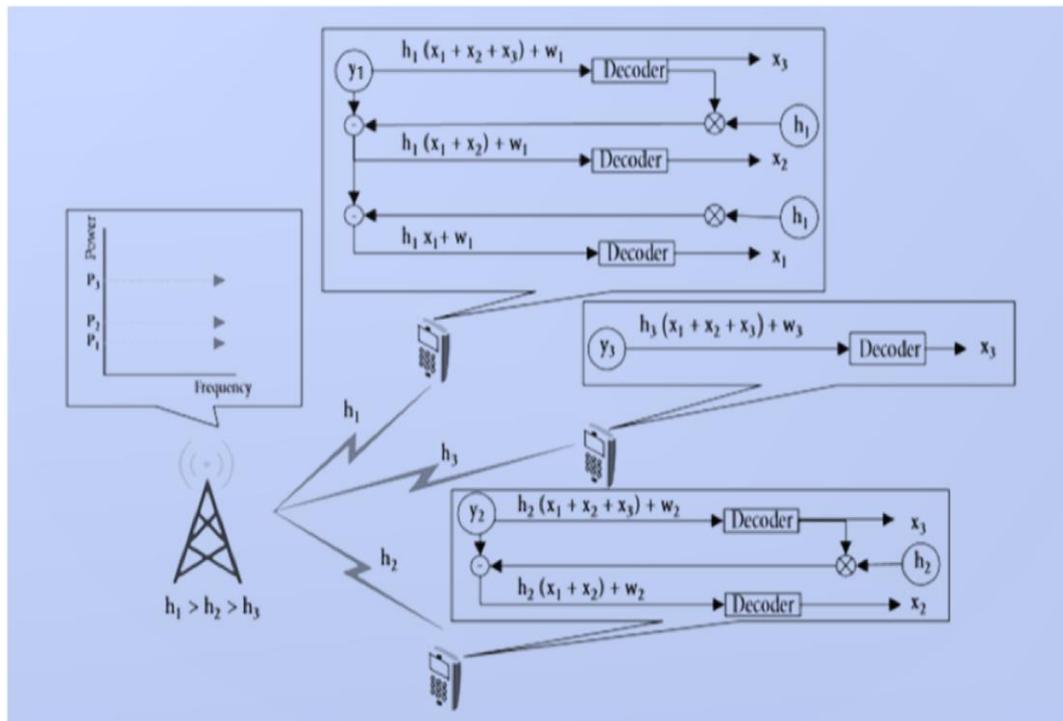


Figure II.10 Un réseau PD-NOMA pour trois utilisateurs

- **L'efficacité spectrale et l'efficacité énergétique**

La consommation totale de la puissance de l'émetteur peut être représentée comme la somme de la puissance allouée au signal d'information et de la puissance consommée par les circuits du réseau (principalement par les amplificateurs de puissance). En ce qui concerne la liaison descendante, la puissance totale consommée par la BS est représenté comme suit :

$$P_{\text{total}} = P_t + P_{\text{stat}} \quad (\text{II.16})$$

Avec :

P_{total} : représente la puissance totale du signal.

P_{stat} : représente la puissance consommée par le circuit.

L'efficacité énergétique (EE) est définie comme le rapport de la somme des débits des utilisateurs sur la puissance totale consommée de la station de base :

$$\mathbf{EE} = \frac{\sum_{i=1}^k \mathbf{R}_k}{\mathbf{P}_{\text{total}}} \quad (\text{II.17})$$

$$\mathbf{EE} = \mathbf{SE} \frac{W}{\mathbf{P}_{\text{total}}} \quad [\text{bits/joule}] \quad (\text{II.18})$$

Avec :

SE : représente l'efficacité spectrale :

$$\mathbf{SE} = \frac{\sum_{i=1}^k \mathbf{R}_k}{W} \quad [\text{bps/Hz}] \quad (\text{II.19})$$

4.1.3. Comparaison entre OMA et NOMA

Après avoir expliqué la technique d'accès multiple PD-NOMA, voici une comparaison entre les deux catégories des techniques d'accès multiples PD-NOMA et OMA.

- **Le débit**

Dans les techniques d'accès multiple orthogonales (OMA), les utilisateurs transmettent leurs informations sur des ressources orthogonales. Lorsque la largeur de la bande passante et la puissance totale sont partagées de manière semblable entre les utilisateurs, le débit de chaque utilisateur est représenté par :

$$\mathbf{R}_k = W_k \log_2 \left(1 + \frac{P_k h_k^2}{N_k} \right) \quad [\text{bps}] \quad (\text{II.20})$$

Avec :

$$W_k = \frac{W}{K} \quad (\text{II.21})$$

$$N_k = N_o * W_k \quad (\text{II.22})$$

A partir de là, on admet qu'il y a deux utilisateurs de sorte que le premier utilise la technique PD-NOMA et le deuxième applique la technique OMA, nous considérons un canal de liaison descendante de sorte que les utilisateurs ont les mêmes caractéristiques du canal. Nous prenons $h_1=h_2=10\text{dB}$.

La figure II.11 montre les limites des débits réalisables pour PD-NOMA et OMA. Il est clair que PD-NOMA atteint des débits plus élevés que l'OMA.

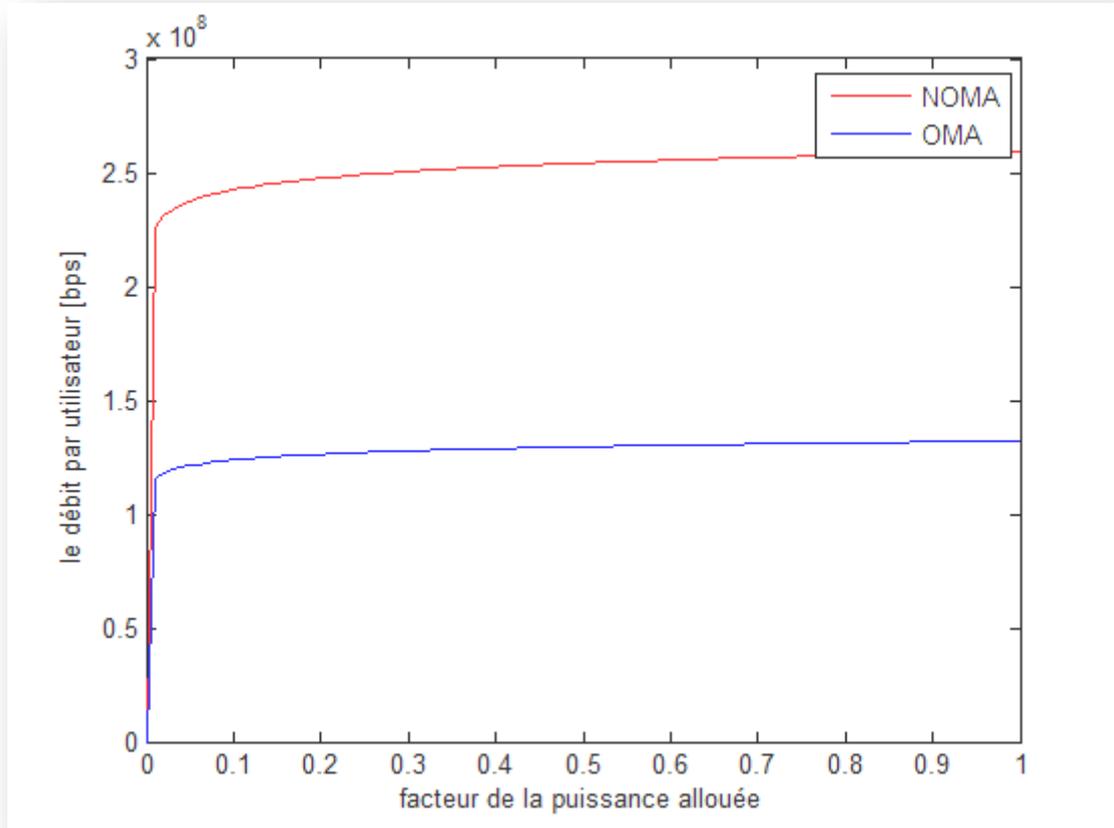


Figure II.11 Comparaison entre PD-NOMA/OMA en terme de débit

- **L'efficacité énergétique et spectrale SE-EE**

On reprend le même scénario précédent mais avec deux utilisateurs pour chacune des deux techniques, avec une largeur de bande passante du système $W = 5$ MHz. Les gains du canal pour le premier utilisateur et le 2ème utilisateur seront respectivement $h_1 = -120$ dB et $h_2 = -140$ dB. La densité spectrale du bruit avec $N_0 = -150$ dBW/Hz et la consommation d'énergie statique à la BS $P_{\text{static}} = 100$ W.

La figure II.12 montre les courbes EE-SE obtenues par cette configuration. On voit ainsi, qu'avec le système PD-NOMA, les valeurs d'EE et SE sont plus élevées qu'avec le système NOMA.

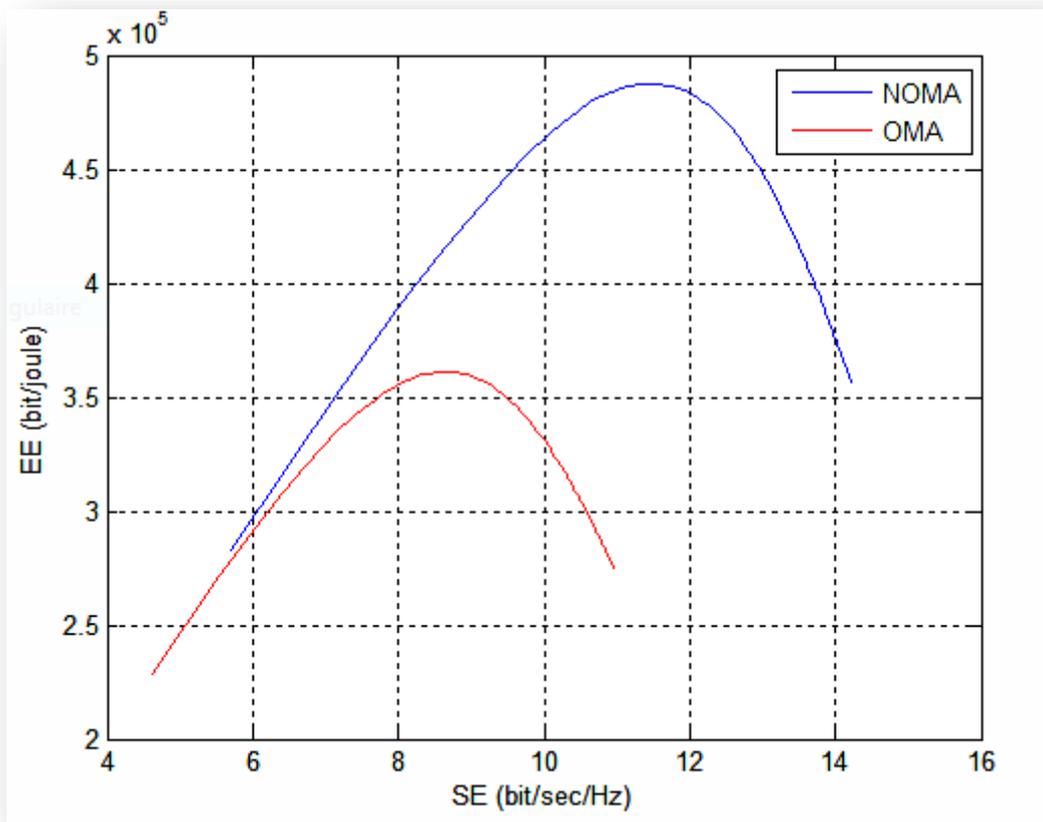


Figure II.12 Le tracé du EE/SE pour les deux systèmes NOMA et OMA

4.1.4. Les avantages de PD-NOMA

Par rapport à l'OMA, la PD-NOMA offre un certain nombre d'avantages qu'on peut résumer de la manière suivante :

-Une haute efficacité spectrale : En OMA, un seul utilisateur est attribué exclusivement à des sous porteuses orthogonales alors qu'ils sont plusieurs utilisateurs dans la PD-NOMA. Cela va permettre à l'utilisateur d'utiliser efficacement, le spectre fréquentiel en exploitant le domaine de puissance pour le multiplexage et en atténuant les interférences grâce au détecteur SIC.

-Une connectivité massive : Dans la PD-NOMA le nombre d'utilisateurs/dispositifs pouvant être pris en charge n'est pas forcément, limité par le nombre de ressources disponibles. Cette technique est donc capable de les servir en utilisant moins de ressources. Ceci va contribuer à la hausse du nombre

d'utilisateurs. C'est pourquoi la 5G devrait soutenir cette technique qui répond à ses demandes à une certaine échelle.

-Amélioration de l'équité entre les utilisateurs : La puissance la plus élevée est allouée à l'utilisateur le plus éloigné de la station de base. PD-NOMA offre un débit plus élevé à la limite de la cellule pour que la qualité de service de l'utilisateur en question soit garantie.

-Une faible latence : En raison de la nature de la transmission simultanée due à la superposition de codes, un utilisateur n'a pas besoin de passer par un créneau horaire programmé pour transmettre ses informations.

5. Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons présenté au départ une description de la technique OFDMA avec la modulation OFDM. Ensuite, nous avons développé théoriquement la technique PD-NOMA dans le domaine de puissance ainsi que ces différents processus ; l'allocation de puissance, la superposition des signaux et le détecteur SIC. En plus d'une comparaison entre les deux catégories des techniques d'accès multiples OMA et PD-NOMA. À la fin du chapitre, nous avons exposé les avantages de la PD-NOMA.

Afin que l'étude faite dans ce chapitre soit concrète et précise nous allons consacrer le troisième chapitre pour l'implémentation de la technique PD-NOMA. Nous allons introduire et utiliser un environnement qui va nous aider à mieux apprécier cette technique

CHAPITRE III

**Modèles et exemples de PD-NOMA sous
MATLAB Simulink**

1. Introduction

Après avoir étudié les aspects de l'accès multiple non orthogonal dans le domaine de puissance, ce chapitre s'intéressera à l'implémentation d'une chaîne de transmission du système PD-NOMA. Ce travail se fera à l'aide d'un simulateur « SIMULINK » du logiciel Matlab, c'est un outil pratique et efficace qui nous offre une très grande possibilité de simulation et facilite l'interprétation des résultats obtenus.

Nous allons, dans un premier temps, présenter l'environnement de notre travail, c'est une extension graphique du logiciel MATLAB appelée Simulink. Ce dernier est parmi les logiciels les plus utilisés pour la simulation des réseaux et des systèmes de communications modernes. La partie suivante sera une illustration des différents modèles de simulation de la technique PD-NOMA, en changeant à chaque fois le type de modulation (M-PSK, M-QAM), et le type du canal (AWGN, RAYLEIGH, RICIEN) afin de pouvoir étudier et évaluer les performances de la technique PD-NOMA.

2. Un aperçu sur l'environnement de simulation MATLAB Simulink :

MATLAB (MATrix LABoratory) est un logiciel de calcul matriciel à syntaxe simple développé par la société MathWork. Avec ses fonctions spécialisées, il est considéré comme un langage de programmation adapté pour les problèmes scientifiques et techniques.

Simulink est l'extension graphique de MATLAB qui permet de représenter les fonctions mathématiques des réseaux et systèmes représentés dans la figure III.1, sous forme de diagramme en blocs de la même manière qu'un système de communication fonctionne. Le principe de cette procédure consiste à définir les paramètres d'initialisation et les données d'entrée et de fournir, également, les résultats de sortie. Au début de chaque simulation, le nombre de symboles, le type de la modulation, la plage des valeurs du SNR et le modèle du canal doivent être

implémentés. Pour avoir à la fin des résultats permettant de mesurer les performances des différents réseaux et systèmes implémentés.

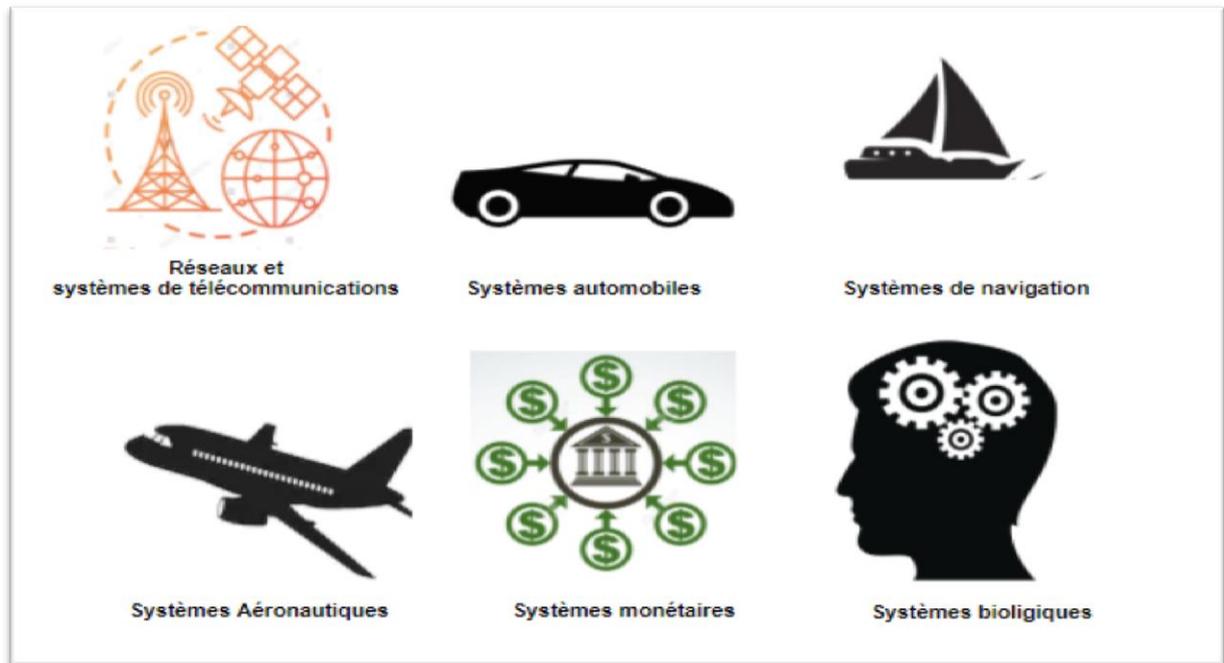


Figure III.1 Ce que l'on peut modéliser mathématiquement avec MATLAB Simulink

3. Présentation du Simulink

- Afin de pouvoir démarrer le Simulink, nous tapons la commande « SIMULINK » dans la fenêtre de commande de MATLAB, ou nous cliquons directement sur l'icône « SIMULINK LIBRARY » de la barre des outils.

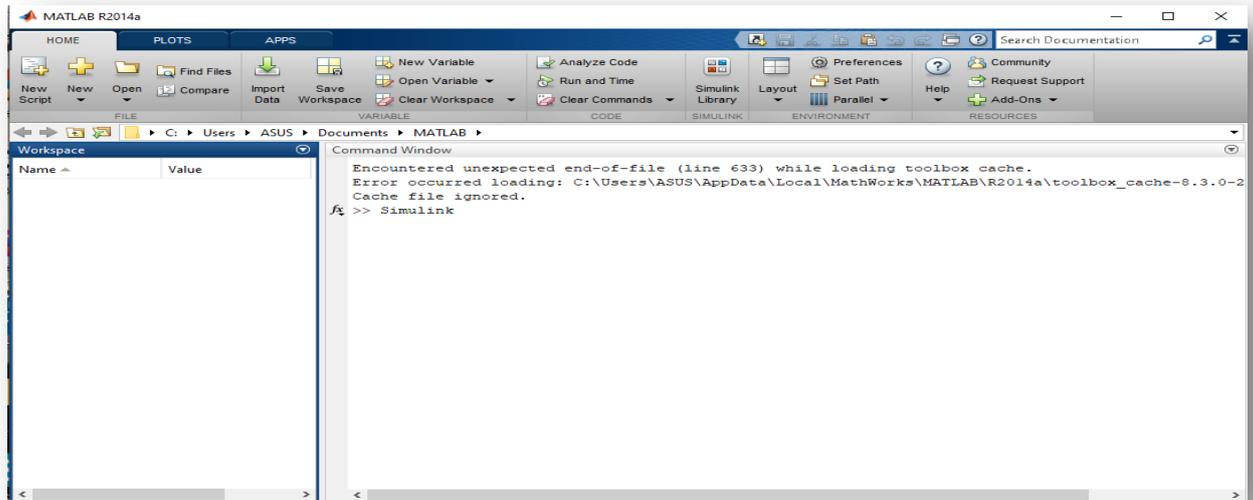


Figure III.2 La fenêtre de commande de MATLAB

- L'accès à la bibliothèque Simulink est présenté dans la figure suivante :

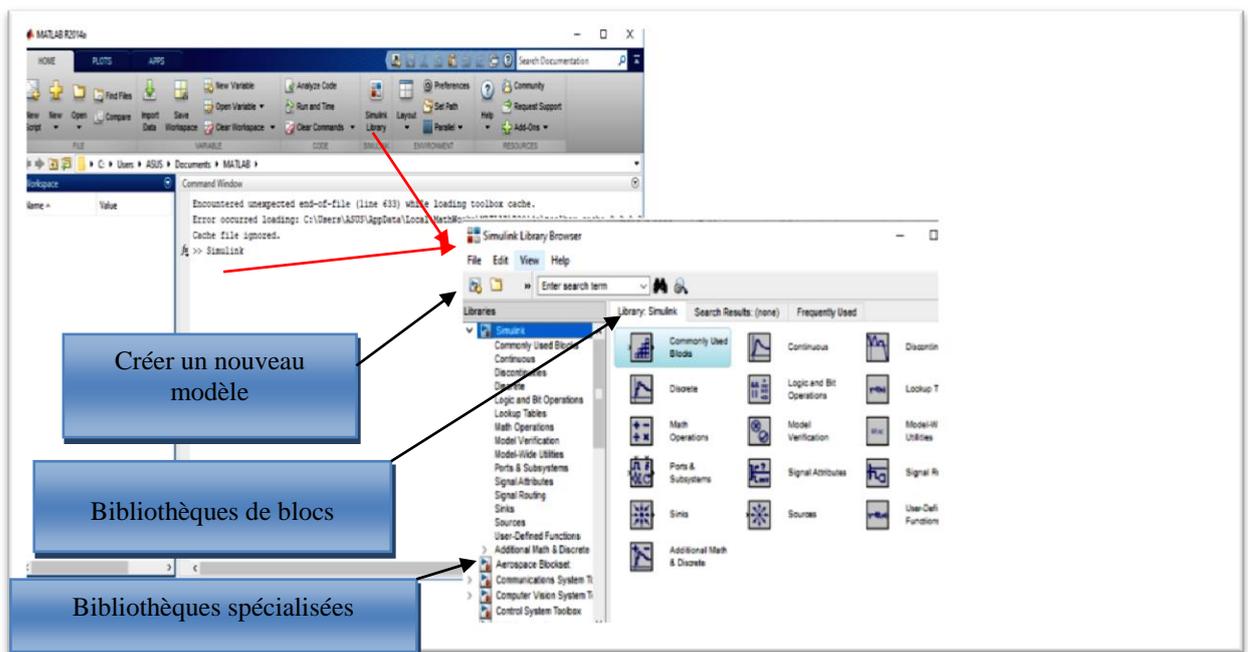


Figure III.3 accès à la bibliothèque Simulink

- La fenêtre Simulink Library Browser va s'ouvrir, elle permet l'accès à la bibliothèque Simulink. Cette fenêtre contient différentes collections de blocs indiqués dans la figure III.4, que l'on peut ouvrir en cliquant double cliquer dessus.

N°	Compartiment	Définition
1	Commonly Used Blocks	Blocs Utilisés Généralement
2	Continuous	Continue
3	Discontinuous	Discontinue
4	Discrete	Discret
5	Logic And Bit Operations	Operation Logique et Binaire
6	Lookup Table	Tableau De Consultation
7	Math Operations	Operations Mathématiques
8	Model Verification	Verification Des Modèles
9	Model-Wide Utilities	Utilités Modèle- Large
10	Ports & Subsystems	Ports et Sous Systèmes
11	Signal Attributes	Attributs Du Signal
12	Signal Routing	Cheminement Du Signal
13	Sinks	Eviers
14	Sources	Sources
15	User-Defined Functions	Fonctions Définies Par L'utilisateur
16	Additional Math & Discrete	Math D'additionnelle Discrete

Figure III.4 Les différentes collections de bloc

- La figure III.5 présente comment explorer la fenêtre Simulink.

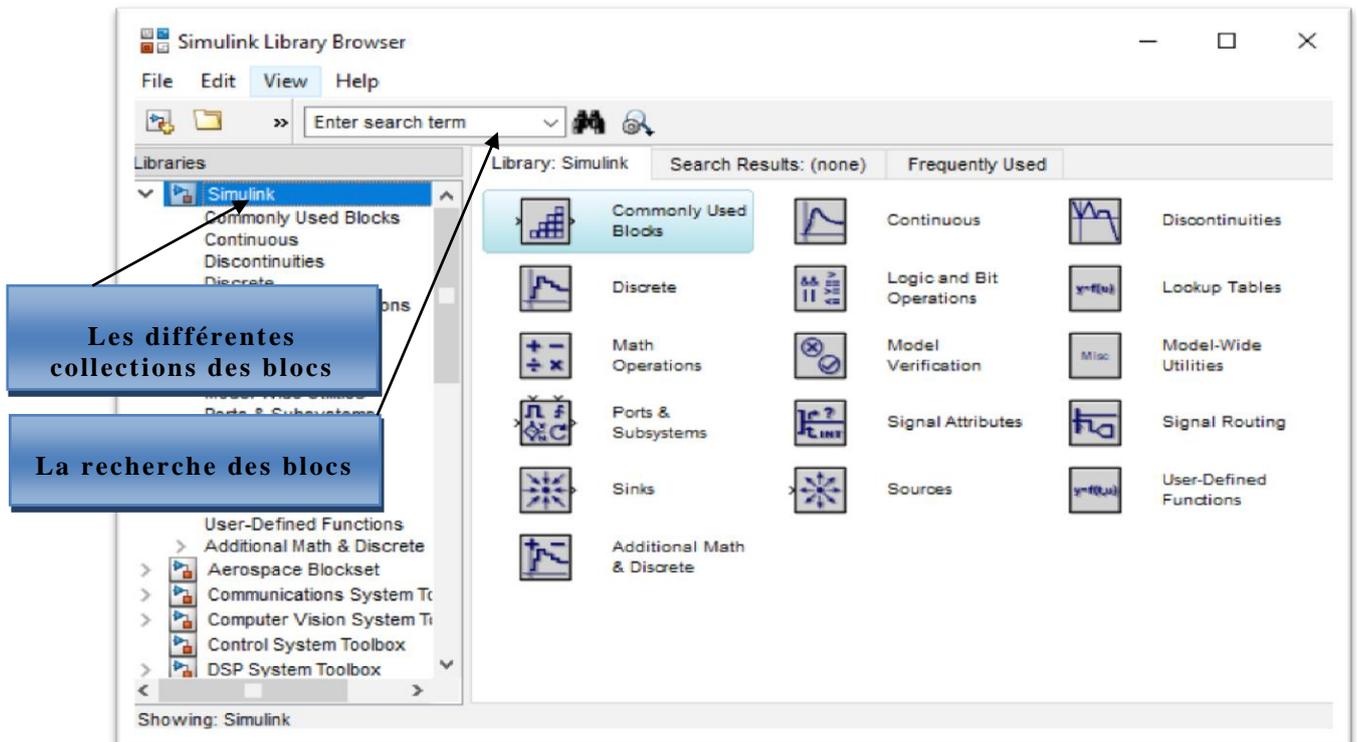


Figure III.5 La bibliothèque Simulink

- La création d'un nouveau modèle consiste à cliquer sur l'icône « nouveau modèle »(1), et pour ajouter un bloc au modèle, d'abord nous faisons une recherche du bloc dans la bibliothèque (2) ensuite on le fait glisser vers le modèle créé (3).

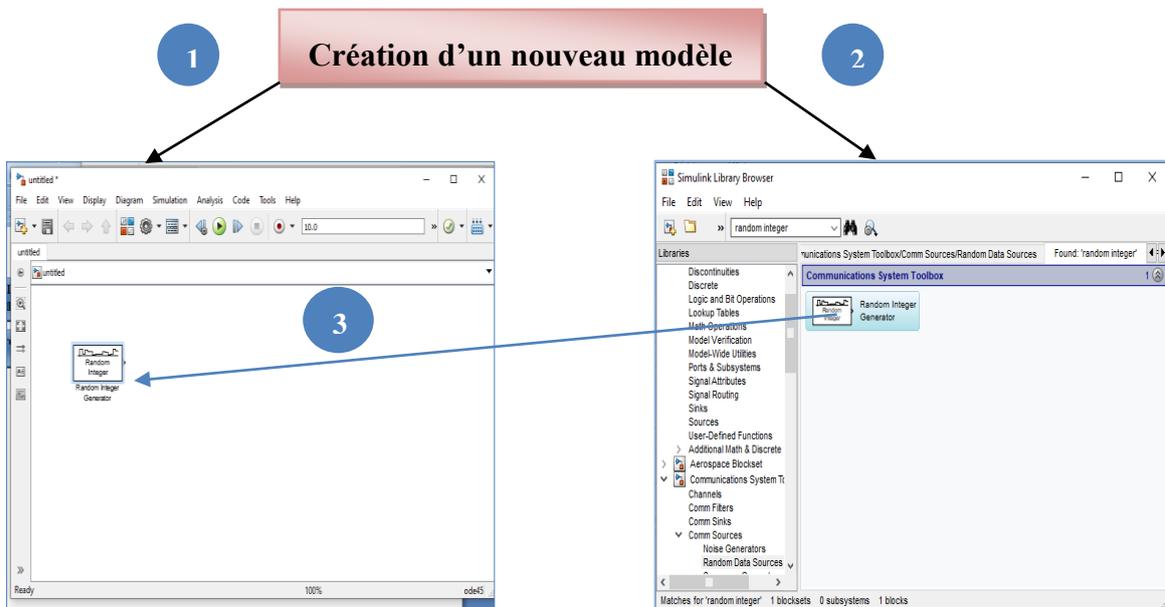


Figure III.6 Exemple d'un nouveau modèle

4. Simulation d'une chaîne de transmission d'un système NOMA-AWGN

La figure suivante, nous présente le schéma d'un modèle d'une chaîne de transmission PD-NOMA-AWGN pour deux utilisateurs simulée sous l'environnement Simulink

**Figure III.7 Modèle de simulation de la technique PD-NOMA
pour un canal AWGN**

4.1. Description des blocs du modèle :

La chaîne de transmission simulée comprend les blocs suivants :

4.1.1. Le bloc générateur des nombres entiers aléatoires (Random Integer Generator) :

Le générateur des nombres entiers aléatoires (Random Integer Generator) distribue uniformément les nombres entiers générés dans l'intervalle $[0, M-1]$ où M est le nombre d'état de chaque symbole. Supposons que $M=2$, l'intervalle des nombres est $[0,1]$, le générateur des nombres aléatoires est conventionnellement utilisé comme une source d'information où ses paramètres sont illustrés sur la figure III.8.

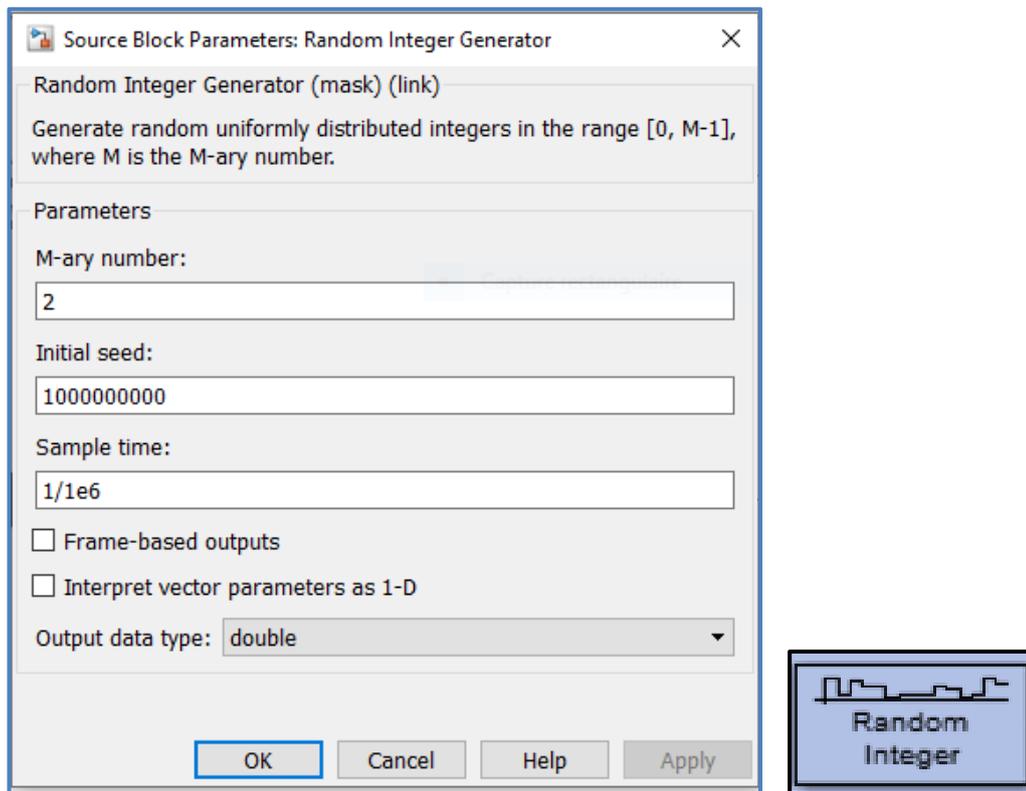


Figure III.8 bloc générateur des nombres entiers aléatoires

La source est présentée comme un générateur de nombres aléatoires allant de 0 à $M-1$. Dans ce cas $M=2$ qui correspond à la modulation BPSK.

4.1.2. Le bloc de mémoire Goto :

Le bloc Goto transmet ses données au bloc From qui lui correspond (chaque bloc Goto a un bloc from qui lui correspond dans la chaîne de transmission). L'entrée de ce bloc peut être un signal ou un vecteur à valeur réelle ou complexe de n'importe quel type de données. Les blocs From et Goto permettent de faire passer un signal d'un bloc à l'autre sans les connecter. La fenêtre des paramètres de ce bloc est illustrée dans la figure III.9.

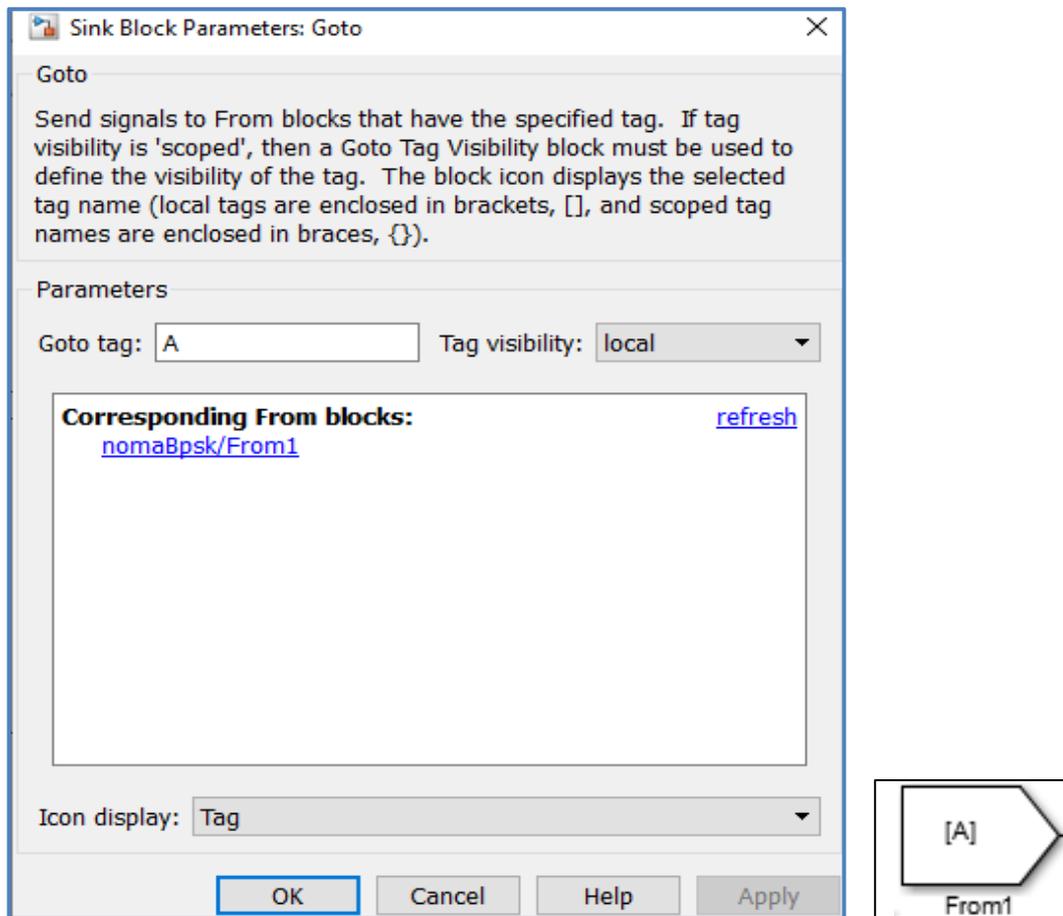


Figure III.9 Le bloc de mémoire Goto

Le paramètre Goto tag désigne le nom des données mémorisées.

4.1.3. Le bloc de la modulation BPSK (BPSK modulator) :

Pour des raisons techniques, l'acheminement d'une information numérique, ne peut pas se faire en bande de base, l'utilisation d'une onde porteuse est nécessaire. Pour cela, on introduit l'opération de la modulation qui fait correspondre à chaque niveau de signal numérique un état d'amplitude, de fréquence ou de phase d'une onde porteuse. Dans ce travail nous avons utilisé la modulation par déplacement de phase binaire à deux états BPSK, où le signal déplace la phase de l'onde avec deux états de 0° à 180° ou vice-versa. Pour appliquer ce processus dans la chaîne de transmission le bloc BPSK modulator est inséré.



Figure III.10 Le bloc BPSK modulateur

4.1.4. Le bloc du gain

Ce bloc multiplie l'entrée par une valeur constante. Dans notre cas, cela revient à multiplier les signaux par des différents niveaux de puissances selon les caractéristiques du canal de chaque utilisateur.

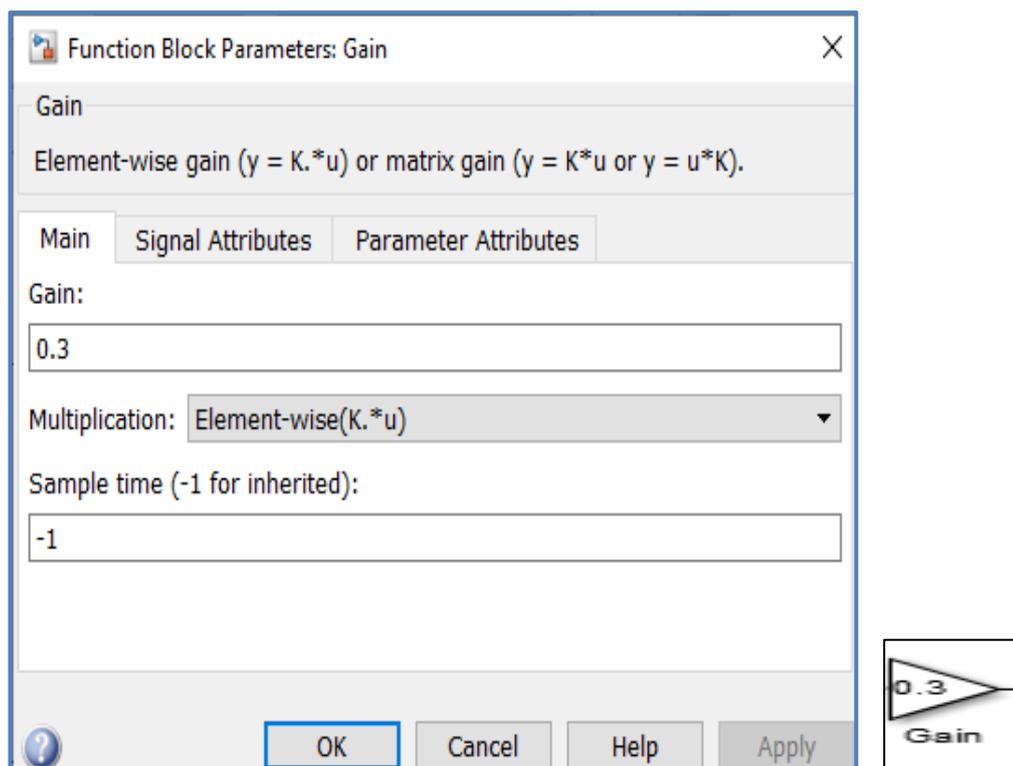


Figure III.11 Le bloc Gain

- La valeur du gain 0.7 est pour l'utilisateur le plus éloigné de la station de base.
- La valeur du gain 0.3 est pour l'utilisateur le plus proche de la station de base.

Pour chacun des deux utilisateurs de la chaîne précédente (Figure III.7), la génération de données, la modulation et l'allocation de puissance se font séparément. Vient par la suite la superposition de code selon le mécanisme de la technique d'accès multiples non-orthogonale. Le bloc d'addition est désormais inclus.

4.1.5. Le bloc d'addition (add (++))

Ce bloc effectue des additions ou des soustractions sur ses entrées. Il peut ajouter ou soustraire des entrées scalaires, vectorielles ou matricielles. Les opérations du bloc sont spécifiées avec les signes plus (+) ou moins (-). Dans ce bloc le nombre d'entrées doit être égale au nombre de signes. Par exemple pour deux entrées, il faut insérer deux signes, comme illustre la figure suivante :

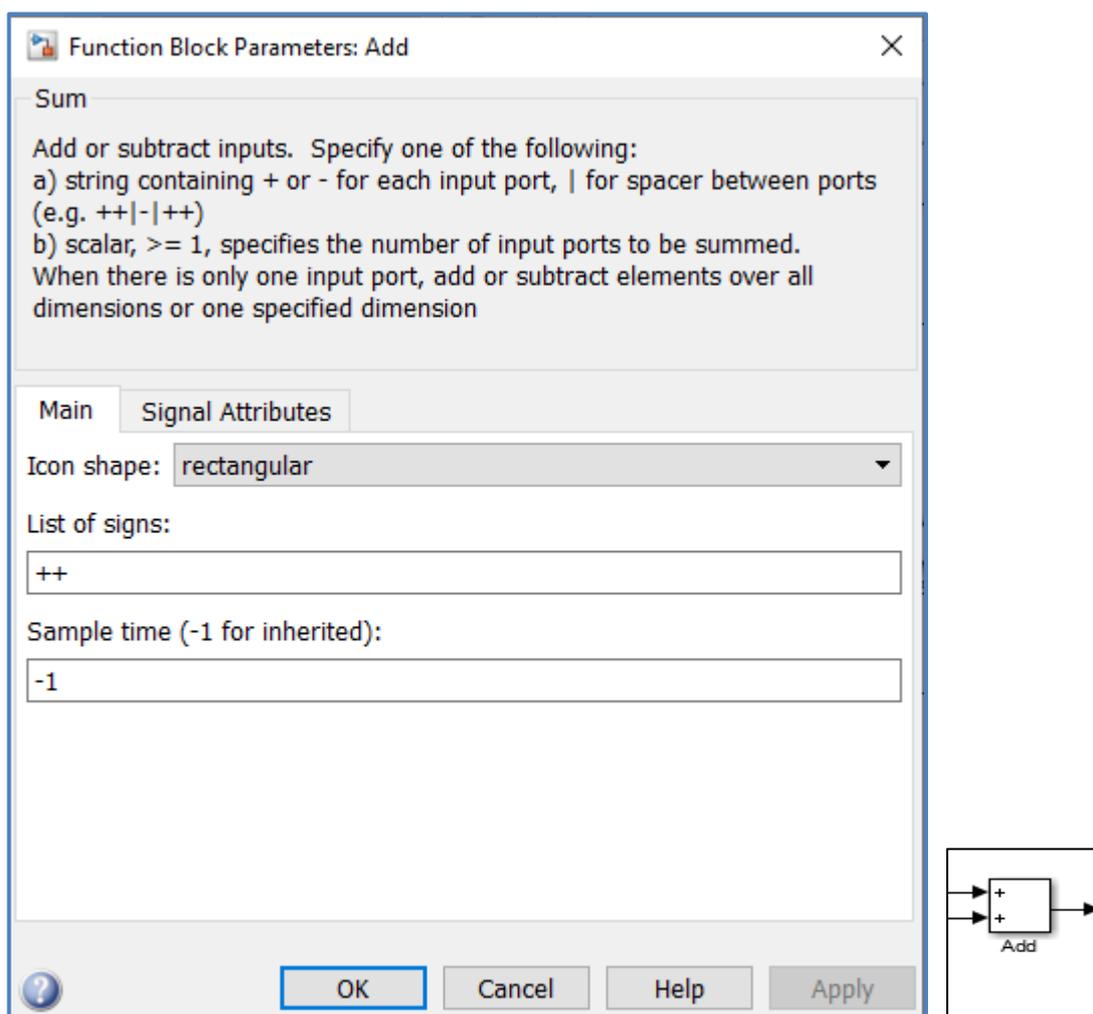


Figure III.12 Le bloc Add

Dans notre cas, Ce dernier contient deux entrées et une seule sortie. Il fait la sommation des signaux des deux utilisateurs qui sont arrivés à ses entrées pour avoir un seul signal à la sortie qui combine les deux signaux précédents.

4.1.6. Le bloc du canal AWGN

Le signal transmis, est envoyé à travers un canal à bruit blanc gaussien additif. La sortie du canal AWGN est composée du signal d'information plus le bruit.

Pour ce modèle (figure III.7) la valeur du rapport E_b/N_0 est [0,20] dB.

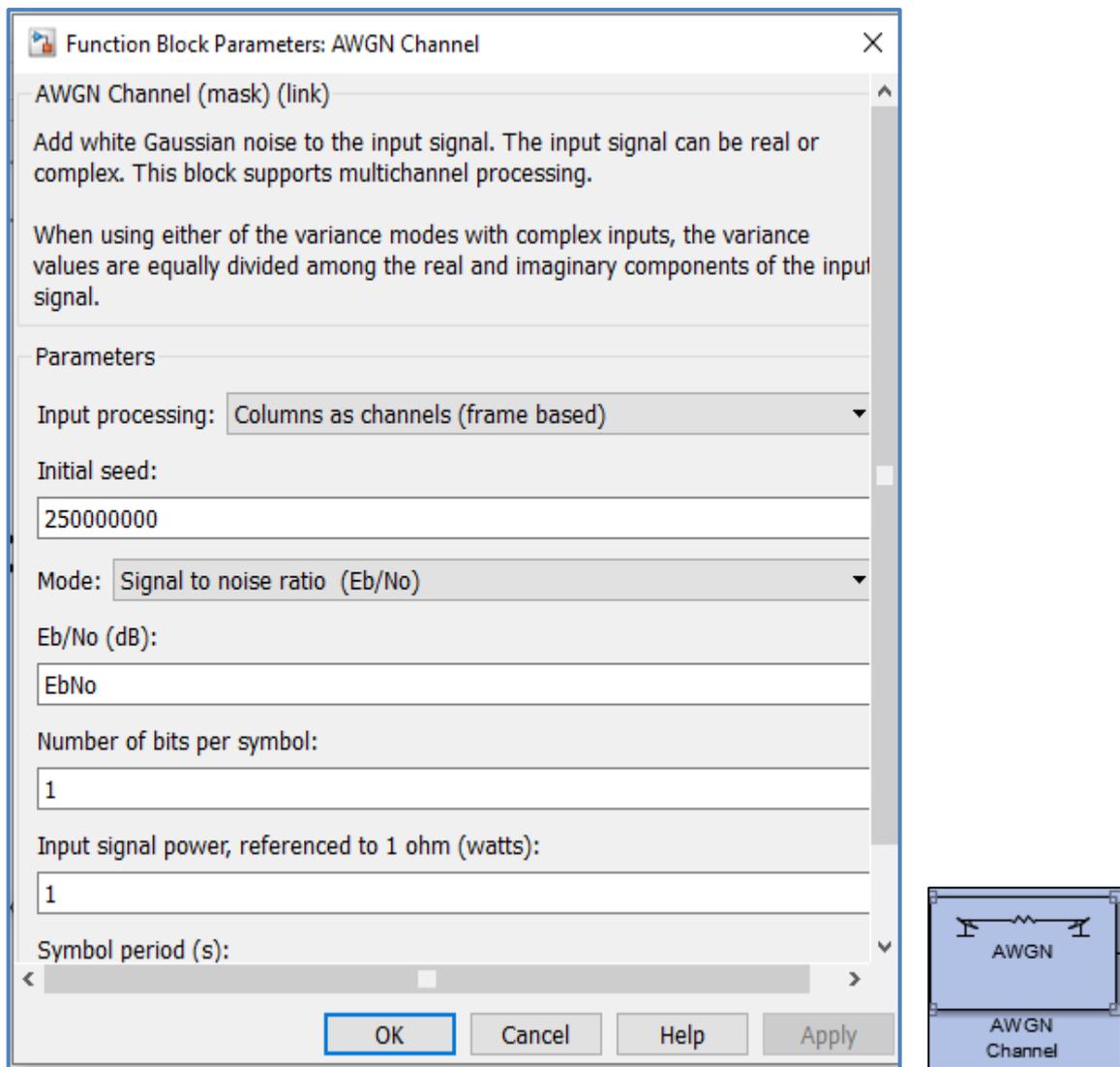


Figure III.13 Le bloc AWGN Channel

Les blocs précédents : génération de données, modulation, allocation de puissance (le gain), le bloc addition et le bloc du canal AWGN sont identiques pour les deux utilisateurs. Après avoir reçu le signal transmis par le canal AWGN, chaque utilisateur applique une procédure de détection selon les caractéristiques de son canal.

Pour le récepteur du premier utilisateur qui a la faible puissance, il inclut à sa réception le détecteur sic, ce dernier est représenté par les blocs suivants :

4.1.7. Le bloc de mémoire From

Le bloc From accepte un signal d'un bloc Goto correspondant et le transmet en sortie. Le type de données à la sortie est le même que celui de l'entrée du bloc Goto. Les blocs From et Goto permettent de faire passer un signal d'un bloc à l'autre comme si les blocs étaient physiquement connectés.

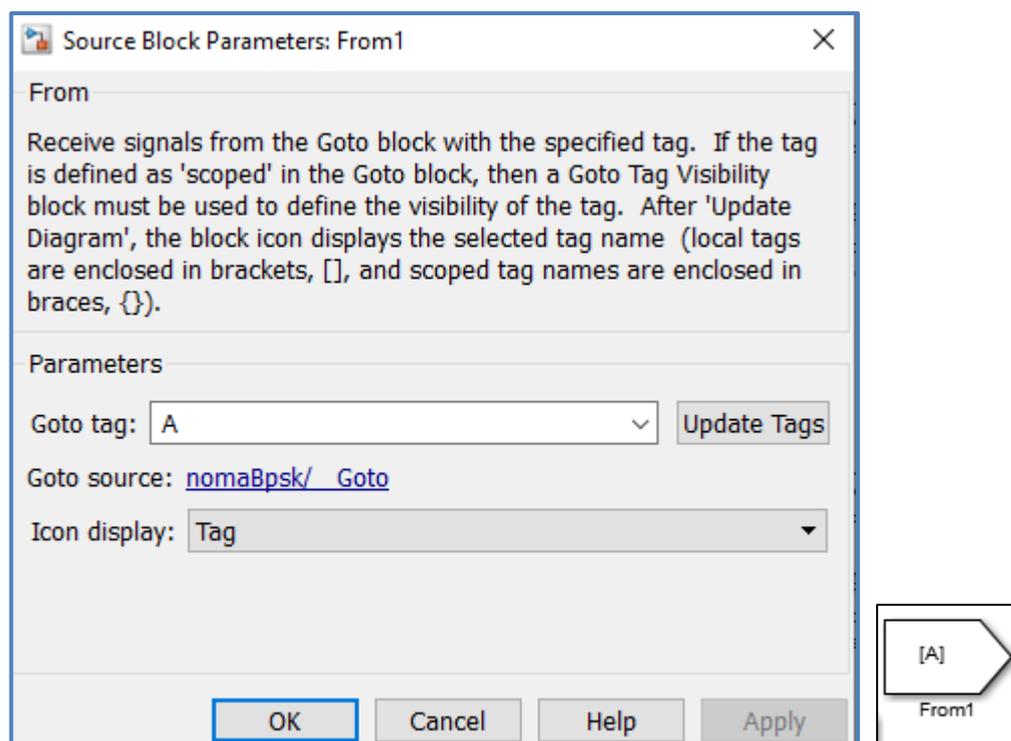


Figure III.14 Le bloc From

4.1.8. Le bloc d'addition (add (+-))

Ce bloc comprend deux entrées. La première a un signe + (plus), appartenant au signal reçu du bloc AWGN. La deuxième a un signe - (moins) relevant du signal reçu du bloc from qui comporte le signal [B] du deuxième utilisateur. Le bloc add (+-) va faire une soustraction du signal [B] au signal reçu.

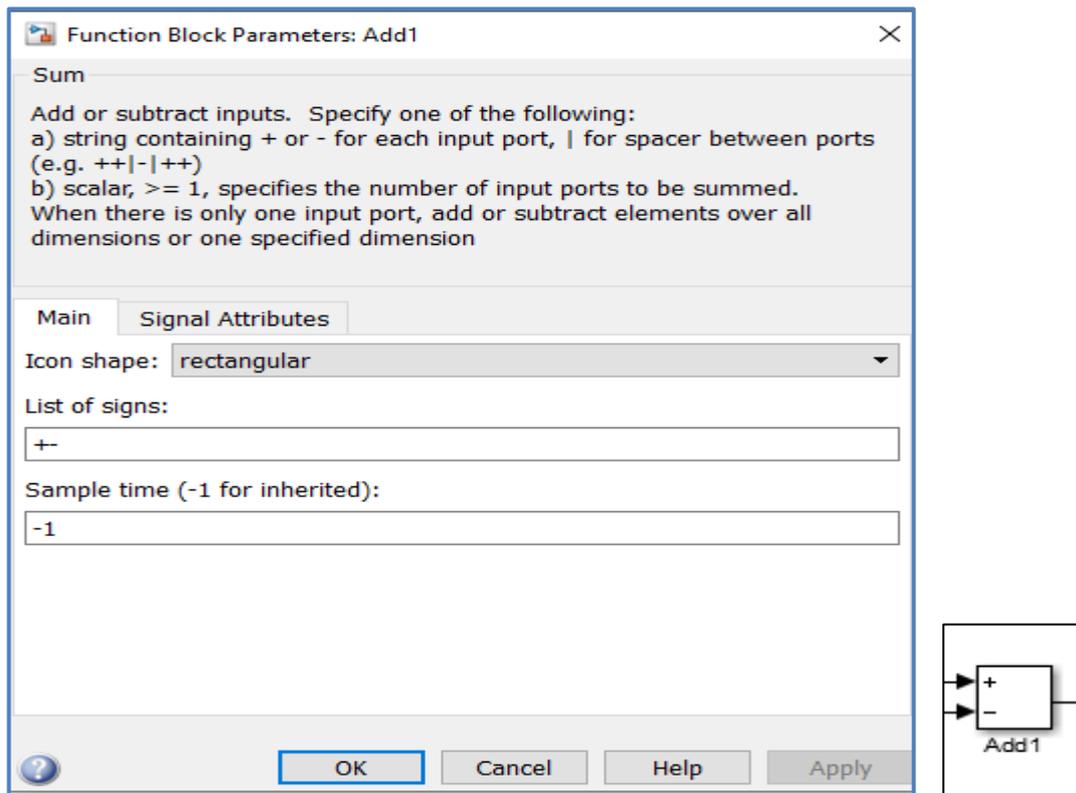


Figure III.15 Le bloc d'addition Add

4.1.9. Le bloc de démodulation BPSK (BPSK demodulator)

La démodulation est l'opération inverse de la modulation. Dans la situation actuelle, le signal reçu du bloc précédent se dirige vers le démodulateur BPSK où il sera démodulé avec les mêmes paramètres du modulateur BPSK.



Figure III.16 Le bloc BPSK démodulateur

4.1.10. Le bloc de calcul de taux d'erreur (Error rate calculation)

Ce bloc permet le calcul du taux d'erreur binaire TEB (BER). Il compare les données d'entrée de l'émetteur avec celles du récepteur. La sortie de ce bloc est un vecteur à trois éléments comprenant le taux d'erreur, le nombre d'erreurs détectées et le nombre total de symboles. Ce vecteur peut être envoyé soit à l'espace de travail ou vers un port de sortie afin de l'utiliser dans la représentation graphique des résultats obtenus telle que le TEB.

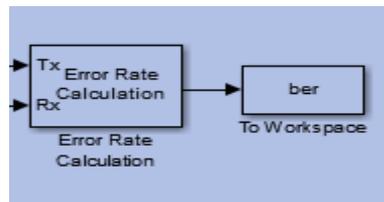


Figure III.17 Le bloc de calcul de taux d'erreur

En ce qui concerne le récepteur du deuxième utilisateur, le signal reçu du canal AWGN passe directement vers le bloc de démodulation, ensuite vers le bloc de calcul du BER.

Pour mieux voir les performances de cette chaîne de transmission dans de différentes conditions, nous avons utilisé d'autres ordres de modulations pour la modulation M-PSK et la modulation M-QAM.

4.2. Le système PD-NOMA avec les modulations M-PSK et M-QAM

La figure suivante représente la chaîne de transmission NOMA-AWGN à deux utilisateurs avec une modulation M-PSK :

**Figure III.18 Modèle de simulation de la technique PD-NOMA avec
la modulation M-PSK**

La figure III.19 représente la chaîne de transmission NOMA-AWGN à deux utilisateurs avec une modulation M-QAM :

**Figure III.19 Modèle de simulation de la technique PD-NOMA avec
la modulation M-QAM**

✚ Le bloc de la modulation M-PSK (M-PSK modulator):

Dans les deux modèles précédents de la chaîne de transmission PD-NOMA, nous avons utilisé la modulation M-PSK. Celle-ci va désigner la forme de modulation numérique qui doit véhiculer l'information binaire via la phase d'une onde porteuse où M représente le nombre des états de la phase.

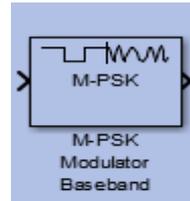


Figure III.20 Le bloc M-PSK modulateur

Les valeurs de M utilisées sont :

M=4 pour la modulation QPSK.

M=8 pour la modulation 8-PSK.

M=16 pour la modulation 16-PSK.

Les paramètres de ce bloc sont les suivants :

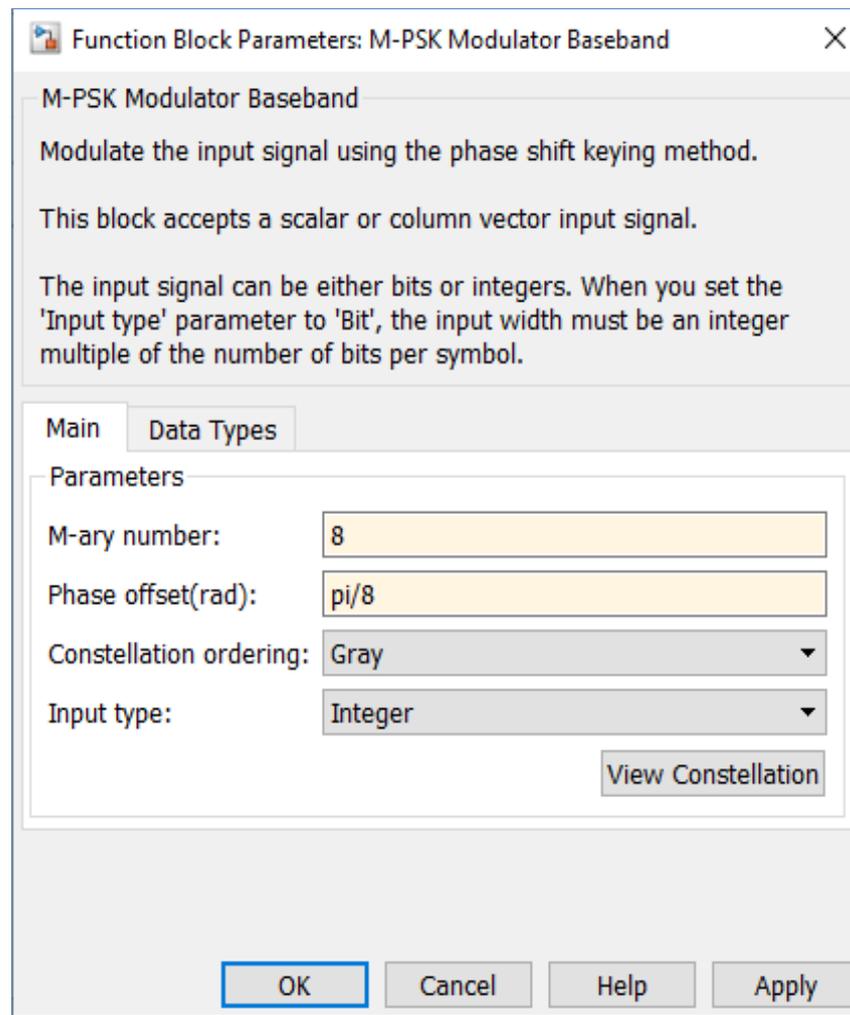


Figure III.21 La fenêtre des paramètres pour le bloc M-PSK

-**Le nombre M-aire (M-ary number)** : représente l'ordre de la modulation. Pour la modulation M-PSK les valeurs de M sont : M=2, M=4, M=8, M=16

-**La phase** : le décalage de phase.

-**Type d'entrée (Input type)** : indique si le type d'entrée est un entier ou un groupe de bits.

-**La commande de constellation (constellation ordering)** : pour le tracé du diagramme de constellation.

✚ **Le bloc de la modulation M-QAM (M-QAM modulator)** :

Ce bloc assure l'opération de la modulation QAM, une forme de modulation où l'information est transportée sur l'amplitude de l'onde porteuse et l'onde en quadrature (deux ondes porteuses déphasées de 90°). Pour introduire cette opération dans notre chaîne de transmission nous avons utilisé le bloc Rectangular M-QAM Modulator. La fenêtre des paramètres de ce modulateur est illustrée dans la figure suivante :

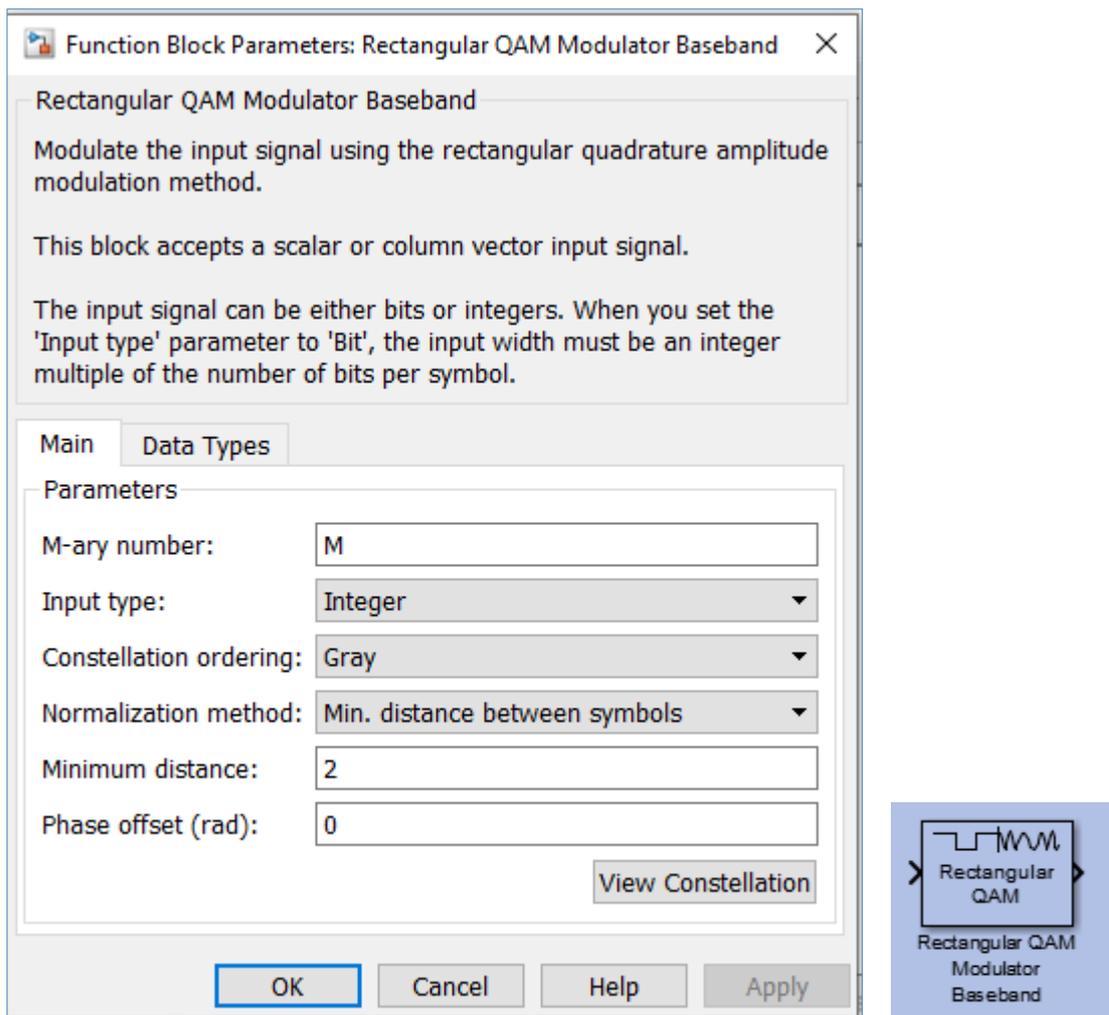


Figure III.22 La fenêtre des paramètres pour le bloc M-QAM

-Le nombre M-aire (**M-ary number**) : représente l'ordre de la modulation. Pour la modulation M-QAM les valeurs de M sont : $M=4$, $M=8$, $M=16$, $M=64$.

-La phase : le décalage de phase.

-Type d'entrée (Input type) : indique si le type d'entrée est un entier ou un groupe de bits.

-La commande de constellation (constellation ordering) : pour le tracé du diagramme de constellation.

-La méthode de normalisation (Normalisation method) : indique la méthode de mesure pour la constellation.

5. Simulation d'une chaîne de transmission d'un système NOMA-RAYLEIGH

Dans de nombreux réseaux mobiles, notamment pour les réseaux sans fil, il est indispensable d'adopter des modèles plus réalistes et plus précis où les interférences et les distorsions seront plus significatives. Pour cela, nous avons utilisé deux autres modèles de canaux.

La figure suivante représente la chaîne de transmission PD-NOMA pour un canal Rayleigh :



Figure III.23 Modèle de simulation de la technique PD-NOMA pour un canal Rayleigh

✚ Le bloc canal Rayleigh (Multipath Rayleigh Fading Channel)

Le bloc Multipath Rayleigh Fading Channel est utilisé pour simuler des environnements qui ont des trajets multiples et aucun trajet direct.

Les paramètres de simulation pour le bloc d'évanouissement de Rayleigh sont présentés dans la figure III.24

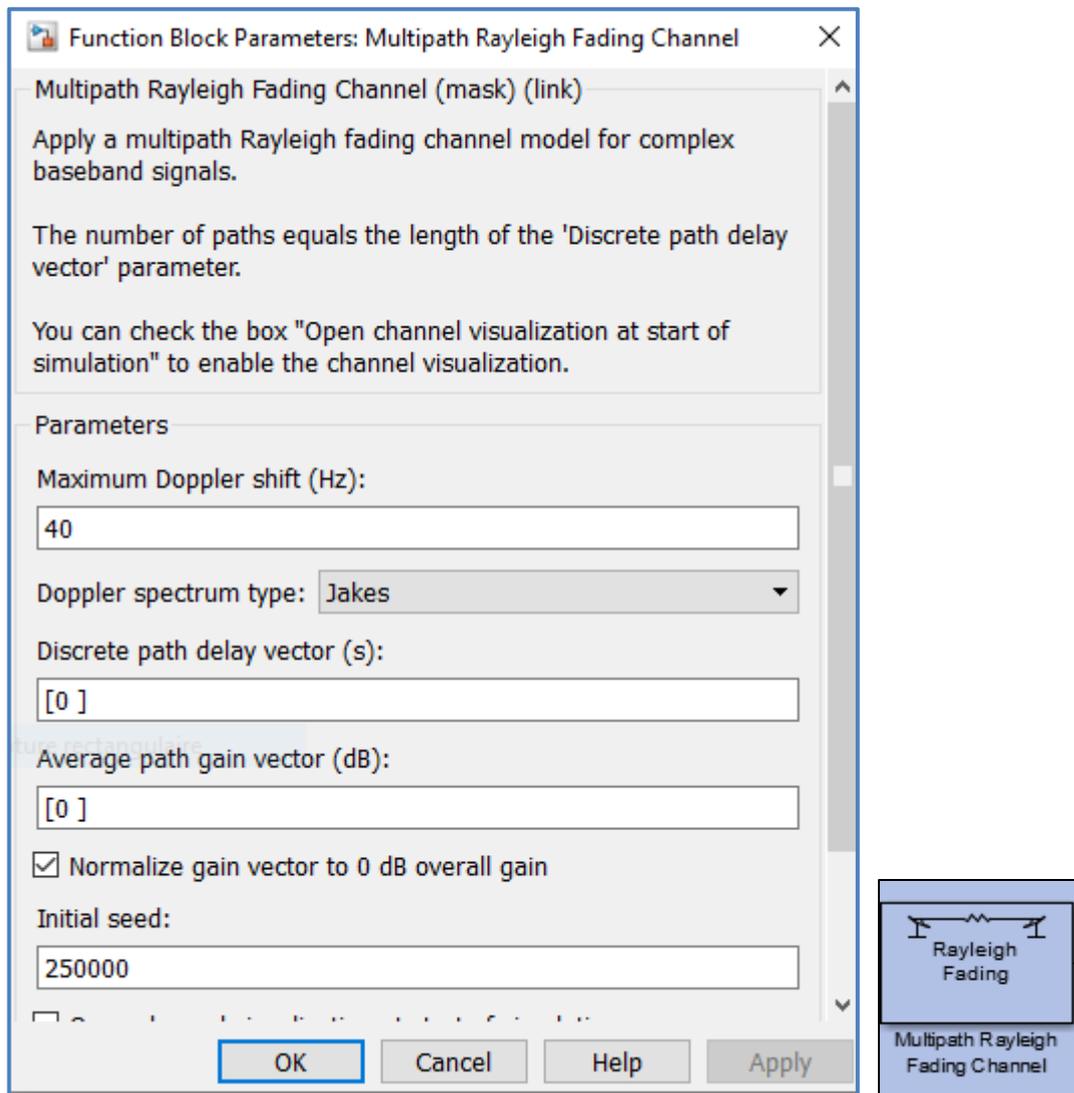


Figure III.24 Le bloc Mutipath Rayleigh Fading Channel

6. Simulation d'une chaîne de transmission d'un système NOMA-RICIAN

La figure suivante représente la chaîne de transmission PD-NOMA pour un canal Rician :

Figure III.25 Modèle de simulation de la technique PD-NOMA pour un canal Rician**✚ Le bloc canal Rice (Multipath Rician Fading Channel)**

Le bloc Multipath Rician Fading Channel est utilisé pour simuler des environnements qui ont des trajets multiples et un trajet direct.

Les paramètres de simulation pour le bloc d'évanouissement de Rayleigh sont présentés dans la figure III.26

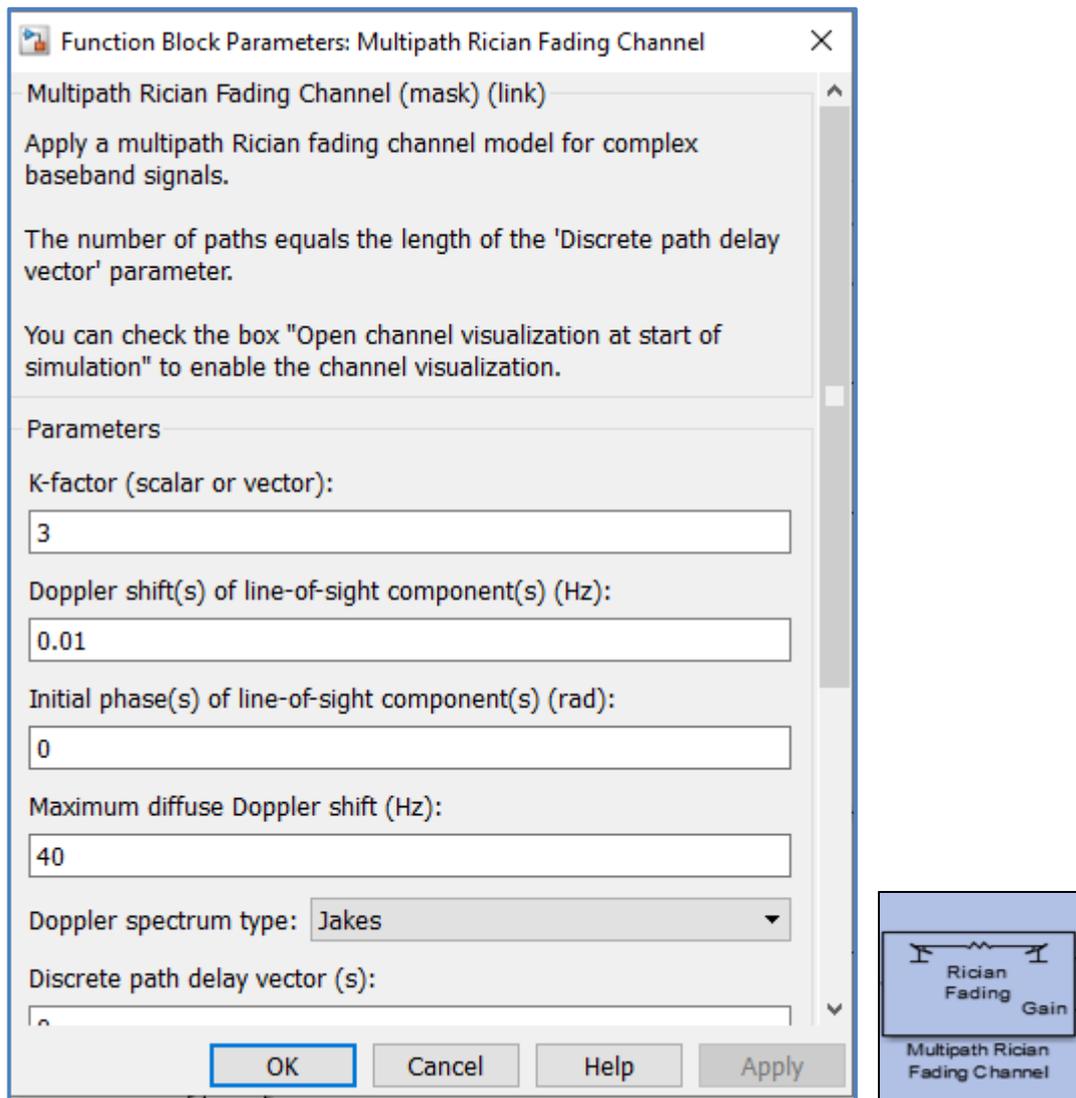


Figure III.26 Le bloc Mutipath Rician Fading Channel

7. Conclusion

L'implémentation d'une chaîne de transmission nous permet de mieux voir les différents aspects de la technique étudiée. Ceci nous aide à comprendre le fonctionnement du système de transmission de la technique PD-NOMA, dont le but est de trouver et de proposer de nouveaux mécanismes de cette dernière. Elle vise également à étudier à quelle échelle les performances de la PD-NOMA assure les exigences de la 5G.

Dans ce chapitre, nous avons simulé différents modèles de la chaîne de transmission PD-NOMA avec différentes conditions. Aussi, nous avons défini l'ensemble des blocs utilisés dans ces implémentations.

Le travail fait dans ce chapitre nous a conduit à trouver les résultats expliqués dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IV

Analyse des performances du système PD-NOMA

1. Introduction

Les performances d'un système de transmission sont généralement évaluées par sa robustesse contre les perturbations, c'est-à-dire assurer un BER aussi faible que possible. De ce fait, la difficulté qui se présente après l'implémentation d'un système de communication numérique, consiste à trouver les meilleurs outils de calcul et d'évaluation des performances, afin d'avoir des résultats précis et approfondis. Pour cela, nous avons besoin d'une méthode de calcul puissante qui permet de tester la robustesse du système PD-NOMA. Parmi les méthodes innovantes offertes par le logiciel Matlab, l'application BERTOOL qui permet de calculer le taux d'erreur binaire d'une chaîne de transmission sous l'environnement Simulink. BERTOOL sert également à tracer les courbes du BER en fonction du rapport Eb/No.

2. Les critères de performance pour un système de communication

Avec la croissance rapide des réseaux et des systèmes de communications sans fil, il est devenu nécessaire de garantir la qualité des services offerts aux différents utilisateurs. Cette enquête nous mène à chercher les paramètres qui permettent de qualifier la qualité des signaux transmis par ces systèmes. Nous introduirons dans ce qui suit, les critères couramment utilisés dans ce but.

2.1. Le rapport signal sur bruit

Le rapport signal sur bruit (Signal to noise SNR) est le rapport entre la puissance du signal utile P_s et la puissance du bruit N . Il permet d'évaluer la contribution du bruit ainsi que son impact sur la dégradation du signal [39].

$$SNR = \frac{P_s}{N} \quad (\text{IV.1})$$

Ce rapport est souvent exprimé en dB :

$$SNR(\text{dB}) = 10 * \log\left(\frac{P_s}{N}\right) \quad (\text{IV.2})$$

Le SNR est une donnée très intéressante, puisqu'il va permettre d'estimer la dégradation subite par le bruit. En effet, plus le rapport signal à bruit est faible, plus le signal est dégradé par le bruit et plus il sera difficile de supprimer l'influence du bruit sur le signal. Il est nécessaire de garantir un rapport signal à bruit important pour s'assurer que le signal reçu reste une « copie fidèle » du signal transmis [39].

2.2. La probabilité d'erreur binaire

La probabilité d'erreur est une des méthodes utiles pour l'évaluation des performances d'un système de communication. Elle présente la probabilité de prendre une décision erronée sur un élément binaire. Cette probabilité n'est jamais strictement nulle, il suffit qu'elle prenne une valeur suffisamment faible pour satisfaire un certain critère de fidélité.

2.3. Le taux d'erreur binaire (TEB ou BER)

Le taux d'erreur binaire est le rapport entre le nombre de bits erronés reçus au niveau du récepteur et le nombre de bits transmis par l'émetteur.

$$\mathbf{BER} = \frac{\mathbf{nombre\ de\ bits\ erronés}}{\mathbf{nombre\ de\ bits\ reçus}} \quad (\mathbf{IV.3})$$

La probabilité d'erreur binaire est la valeur moyenne du taux d'erreur binaire. A cet égard, le taux d'erreur de bits peut être considéré comme une estimation approximative de la probabilité d'erreur binaire [39].

Le BER peut s'exprimer en fonction du rapport E_b/N_0 ainsi le type de la modulation utilisée dans la conception du système.

$$\mathbf{BER} = \alpha \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\beta \sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right) \quad (\mathbf{IV.4})$$

Avec :

E_b : représente la puissance transportée par un bit.

N_0 : représente la densité spectrale de bruit.

α, β : représentent les constantes dépendantes de la modulation utilisée.

$\text{erfc}(x)$: représente la fonction d'erreur complémentaire de la fonction $\text{erf}(x)$

Où $\text{erf}(x)$ permet d'exprimer la marge d'erreur des évaluations statistiques.

$$\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x) \quad (\text{IV.5})$$

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-u^2) du \quad (\text{IV.6})$$

Le tableau ci-dessous donne les expressions théoriques du BER pour différents types de modulation dans le cadre d'un canal AWGN :

<i>Type de modulation</i>	<i>BER=f(Eb/No)</i>
BPSK	$\text{BER} = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right)$
QPSK et 4-QAM	$\text{BER} = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right)$
M-PSK	$\text{BER} = \frac{1}{n} \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{n E_b}{N_0} \sin^2 \left(\frac{\pi}{M} \right)} \right)$
16-QAM	$\text{BER} = \frac{3}{2} \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{2 E_b}{5 N_0}} \right)$
M-QAM	$\text{BER} = 2 \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{2 E_b}{3 * (M - 1) N_0}} \right)$

Table III.1 Les relations du BER en fonction du rapport SNR pour différents types de modulation

Dans ce travail, nous allons utiliser la notion de taux d'erreur binaire pour évaluer notre réseau PD-NOMA, c'est la métrique la plus utilisée pour qualifier les performances des systèmes de communication sans fil.

3. Application de la méthode BERTOOL pour l'évaluation de taux d'erreur binaire

L'évaluation des critères de performances dans les systèmes de communication est généralement impossible par des méthodes analytiques. Pour cela, nous faisons appel aux méthodes de simulation informatiques. Dans notre étude, nous allons utiliser l'application BERTOOL fournie par le logiciel MATLAB.

L'application BERTOOL permet d'analyser les performances du taux d'erreur binaire (BER) des systèmes de communication. Son rôle principal est le calcul du BER en fonction du rapport signal/bruit. Cette opération de calcul utilise la méthode d'estimation d'erreur Monte Carlo, elle est utile pour des fonctions MATLAB et pour des modèles Simulink.

3.1. La procédure du calcul du BER avec l'application BERTOOL

Démarrer l'application

La première étape consiste à lancer l'application BERTOOL en tapant la commande "BERTOOL" pour avoir la fenêtre suivante [35]:

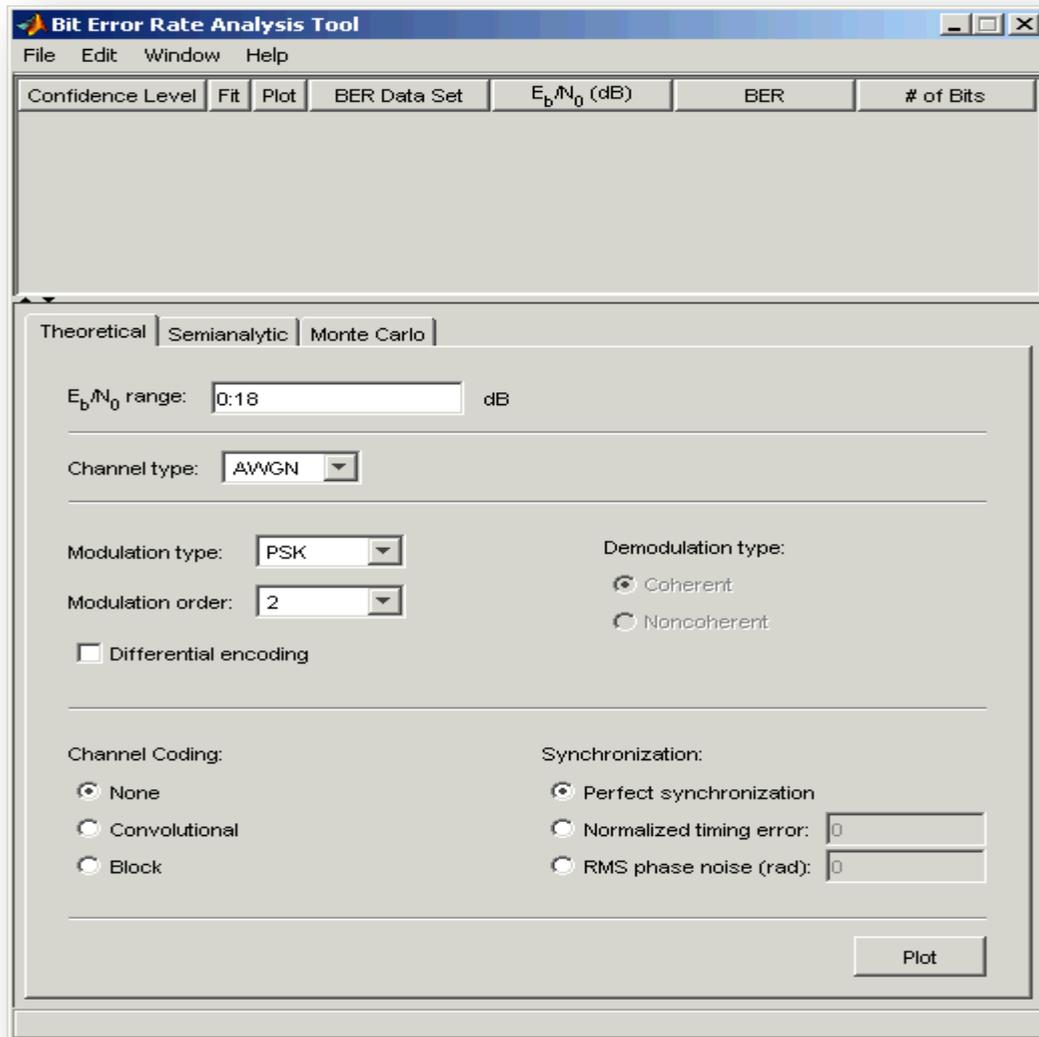


Figure IV.1 Fenêtre de l'application BERTOOL

Nous remarquons un champ de données en haut de la fenêtre vide avant le lancement de la simulation.

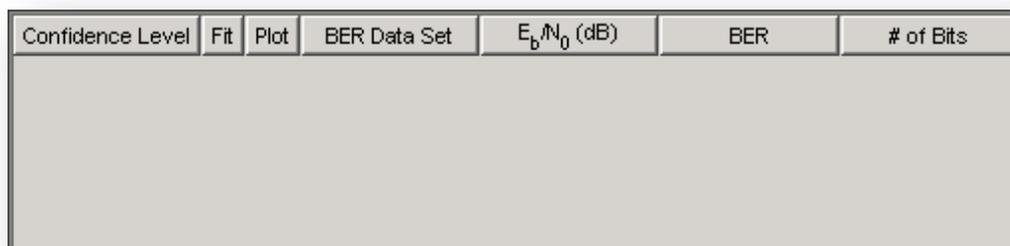


Figure IV.2 Champ de données l'application BERTOOL

Un ensemble d'onglets en bas : théorique, Semianalytic et Monte Carlo, les différentes méthodes et procédures par lesquelles BERTOOL peut générer les données de BER.

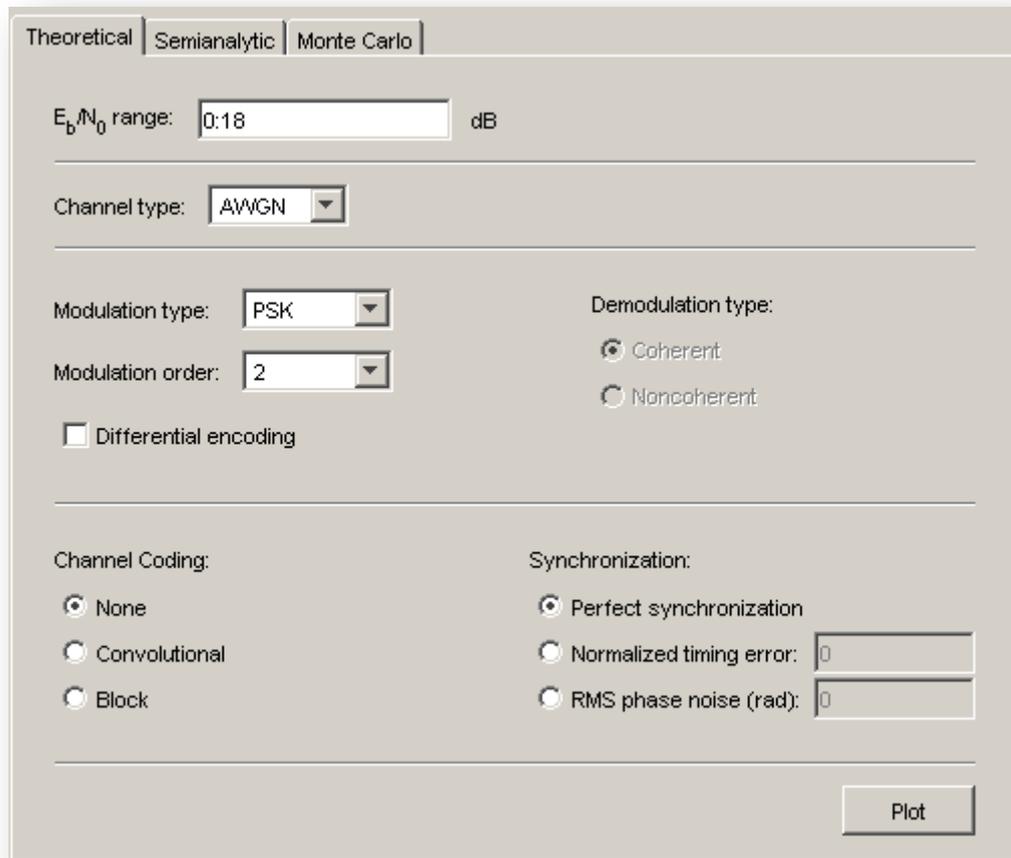


Figure IV.3 Les méthodes de calcul du BER avec l'application BERTOOL

✚ Accéder à l'onglet Monte Carlo

Le but de ce travail est l'étude de la variation du taux d'erreur binaire pour les différents modèles de Simulink de la chaîne de transmission PD-NOMA. À cet effet, nous choisissons la méthode Monte Carlo dans l'application BERTOOL.

La méthode Monte Carlo sous l'application BERTOOL est utilisée en conjonction avec les modèles Simulink implémentés afin de générer et analyser des données BER. L'application BERTOOL lance la simulation du modèle Simulink dont nous souhaitons étudier ses performances pour des valeurs E_b/N_0 que nous

spécifications, collecte les données BER calculées et crée un tracé. Elle permet également de modifier facilement la plage Eb/No [35].

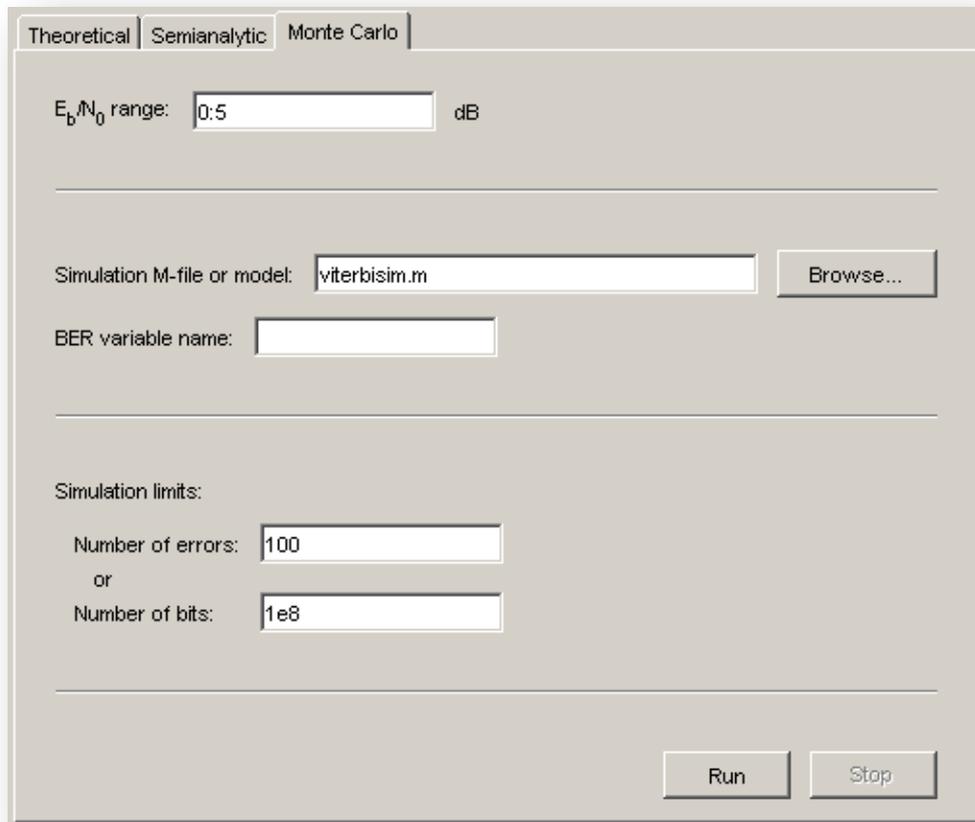


Figure IV.4 L'onglet de la méthode Monte Carlo

✚ La définition des paramètres :

- L'intervalle du rapport Eb/No
- Le chemin du fichier du modèle Simulink choisi
- Le nom de la variable qui collecte les données du BER.

✚ L'exécution :

Après la définition des paramètres, l'application BERTOOL exécute la fonction de simulation et recueille des données BER sous forme d'une liste.

Confidence Level	Fit	Plot	BER Data Set	E_b/N_0 (dB)	BER	# of Bits
off	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	simulation0	[0 1 2 3 4 5]	[0.3743 0.2...	[10000 1000...

Figure IV.5 Les valeurs du BER en fonction du rapport E_b/N_0

BERTOOL utilise les données collectées et trace la courbe du BER en fonction du rapport E_b/N_0 . Le résultat se présente dans une figure « BER figure »

(Voir figure IV.6).

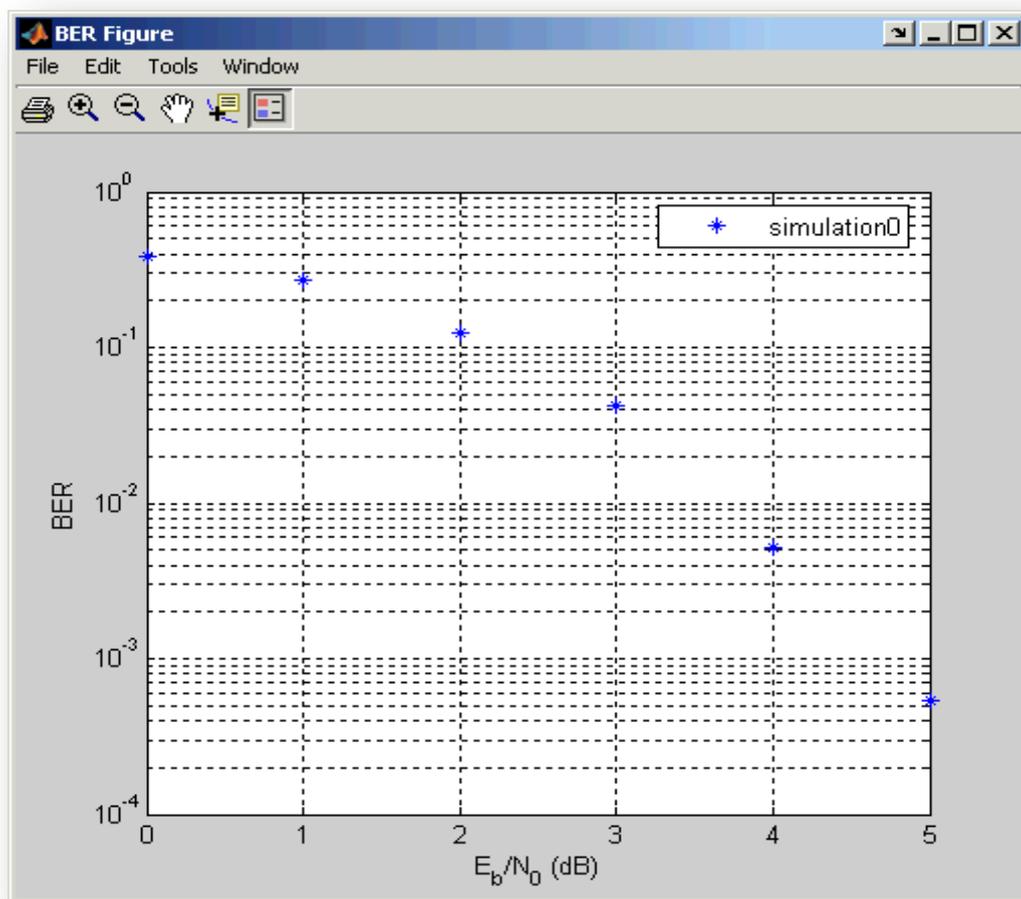


Figure IV.6 Exemple d'un tracé du BER en fonction du rapport E_b/N_0 résultant de l'application BERTOOL

4. Comparaison entre le BER de deux utilisateurs dans un système PD-NOMA

Dans cette partie, nous allons étudier la progression du BER en fonction du SNR. Ces résultats sont fournis à l'aide de l'application BERTOOL sous le logiciel MATLAB. La figure IV. 7 représente une comparaison des performances en terme BER pour l'utilisateur numéro 1 (user1) et l'utilisateur numéro 2 (user2).

En ce qui concerne l'utilisateur numéro 1, nous considérons qu'il a les meilleures caractéristiques du canal, ceci nous mène à lui allouer la puissance la plus faible. Cette allocation de puissance est représentée par le bloc "gain" dans la chaîne de transmission PD-NOMA expliquée dans le chapitre précédent. Par ailleurs, nous admettons que l'utilisateur numéro 2 a des caractéristiques plus mauvaises que celles de l'utilisateur précédent donc la valeur de la puissance allouée est plus élevée.

L'exécution de l'application BERTOOL donne les résultats illustrés dans la figure IV. 7.

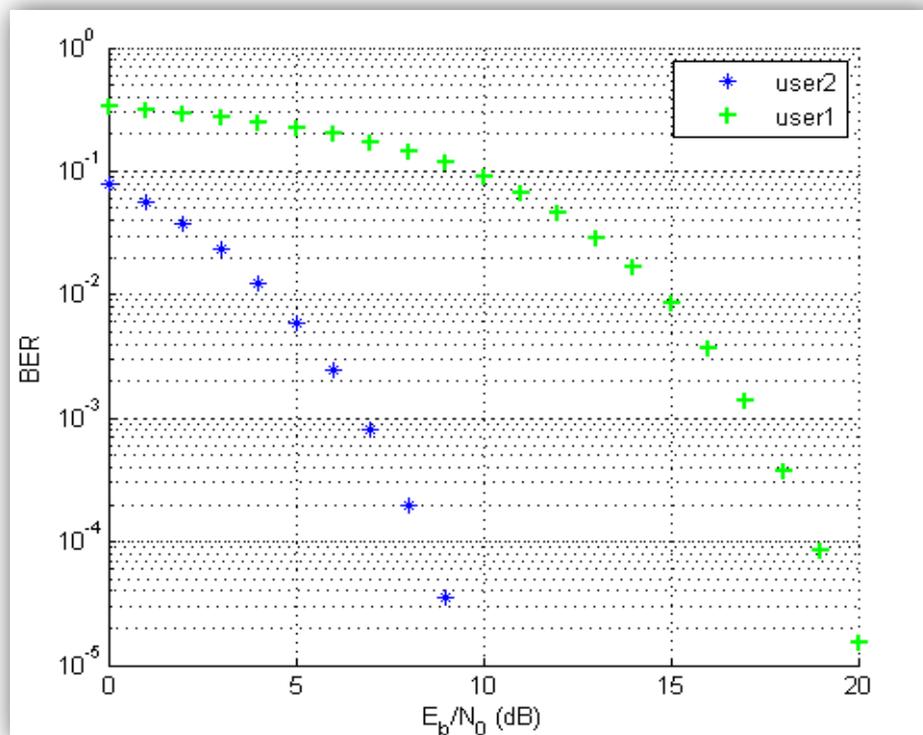


Figure IV.7 Le BER de la chaîne de transmission PD-NOMA pour deux utilisateurs

Les courbes de cette figure représentent le tracé du BER, nous faisons varier le rapport E_b/N_0 de 0 dB à 20 dB.

A première vue, nous remarquons que les valeurs du taux d'erreur binaire diminuent en augmentant les valeurs du rapport E_b/N_0 . Ensuite, si nous comparons les performances du BER entre les deux utilisateurs ; on observe que l'utilisateur 1 a un BER plus élevé que l'utilisateur 2. C'est parce que l'utilisateur 1 doit appliquer le détecteur SIC. Lors de l'exécution du SIC, l'utilisateur 1 doit d'abord estimer les données de l'utilisateur 2 à partir du signal reçu. Si cette estimation est fautive, alors, cette erreur se reflétera dans le décodage de ses propres informations car les données erronées seraient soustraites du signal reçu. En d'autres termes, l'utilisateur 1 doit décoder à la fois les données de l'utilisateur 2 et ses propres données correctement. Toute erreur de décodage des données de l'utilisateur 2 ou de ses propres données aura un impact sur son BER. C'est pourquoi l'utilisateur 1 connaît un BER plus élevé que l'utilisateur 2 qui décode directement ses propres données.

5. BER pour une modulation M-aire

Pour avoir une bonne évaluation du système PD-NOMA, nous avons utilisé deux formes de modulation M-aire : la modulation M-PSK et la modulation M-QAM. Pour chaque forme de modulation, nous allons faire l'étude pour des différents ordres. ($M=2$, $M=4$, $M=8$, $M=16$, $M=64$)

Pour chaque comparaison, les valeurs du BER sont relatives au 2^{ème} utilisateur, car il est le plus avantageux dans un système PD-NOMA.

5.1. BER pour une modulation M-PSK

La figure IV.8 illustre les résultats de la simulation pour des différents ordres de la modulation M-PSK ($M=2$, $M=4$, $M=8$, $M=16$).

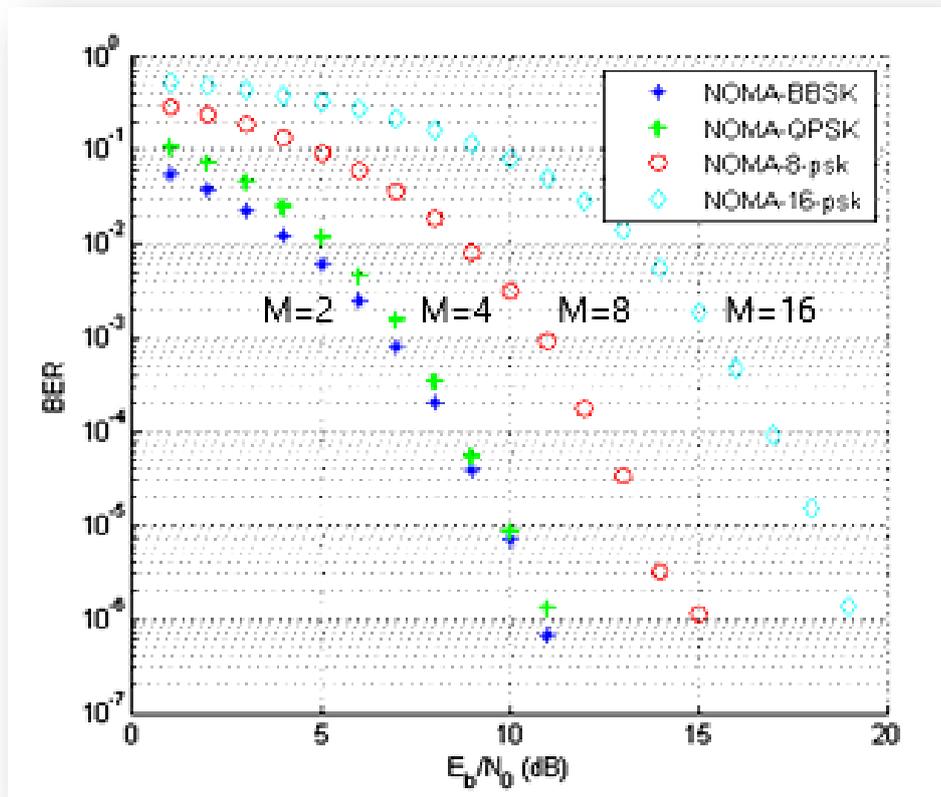
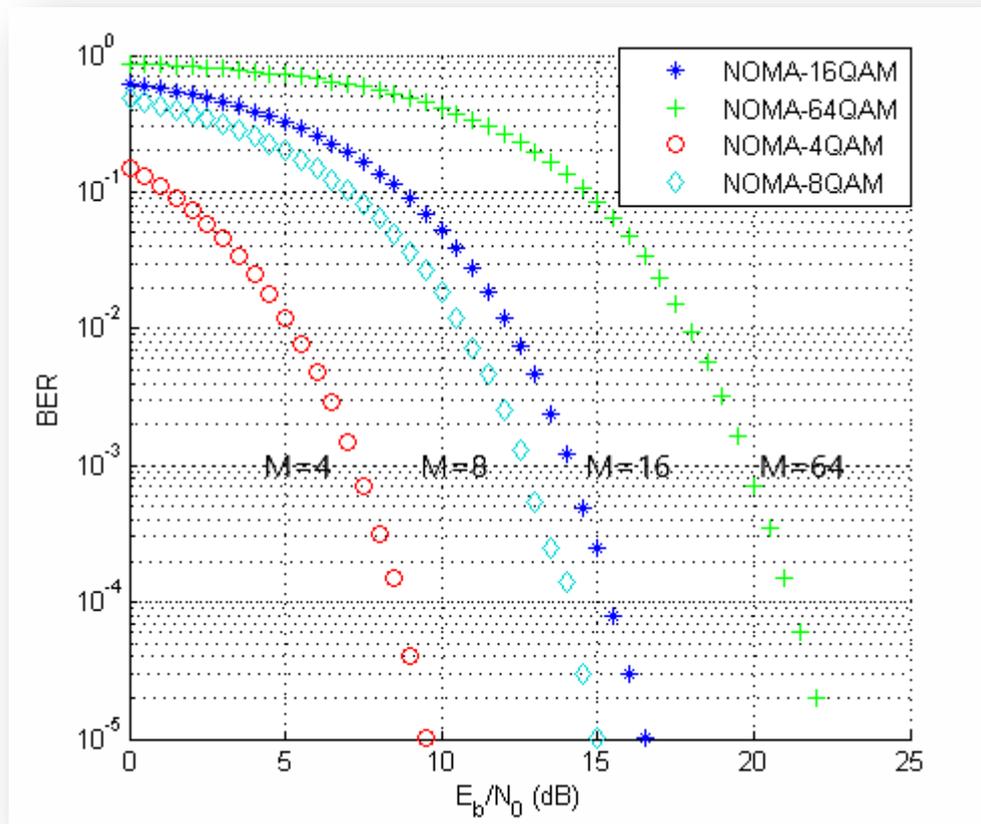


Figure IV.8 Le BER de chaîne de transmission PD-NOMA avec le canal AWGN et la modulation M-PSK

5.2. BER pour une modulation M-QAM

La figure IV.9 nous donne une vue comparative du BER des différents ordres de la modulation M-QAM.



IV.9 Le BER de chaîne de transmission PD-NOMA avec le canal AWGN et la modulation M-QAM

On voit clairement que plus la valeur de la valence M augmente, c'est-à-dire le nombre de bit par symbole augmente, plus le taux d'erreur binaire augmente. Ces résultats montrent également que la modulation M-PSK est plus robuste au bruit que la modulation M-QAM.

6. Comparaison entre le BER d'un système PD-NOMA avec un canal AWGN et un canal Rayleigh

Jusqu'à présent, nous avons étudié le système PD-NOMA avec un canal à bruit blanc additif gaussien, ce type de canal est supposé idéal et ne provoque pas d'interférence entre symbole.

A cet effet, nous introduisons d'autres types de canaux (RAYLEIGH et RICIAN) pour voir l'impact de l'évanouissement du canal sur les performances du signal transmis par un système PD-NOMA.

Nous allons faire un aperçu sur les performances du BER des canaux à évanouissement de Rayleigh. Le taux d'erreur binaire pour un canal RAYLEIGH est exprimé par la relation suivante :

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \left[1 - \sqrt{\frac{\frac{E_b}{N_0}}{1 + \frac{E_b}{N_0}}} \right] \quad (\text{IV.7})$$

La figure IV.10 représente les courbes du BER de la chaîne de transmission PD-NOMA avec un canal RAYLEIGH.

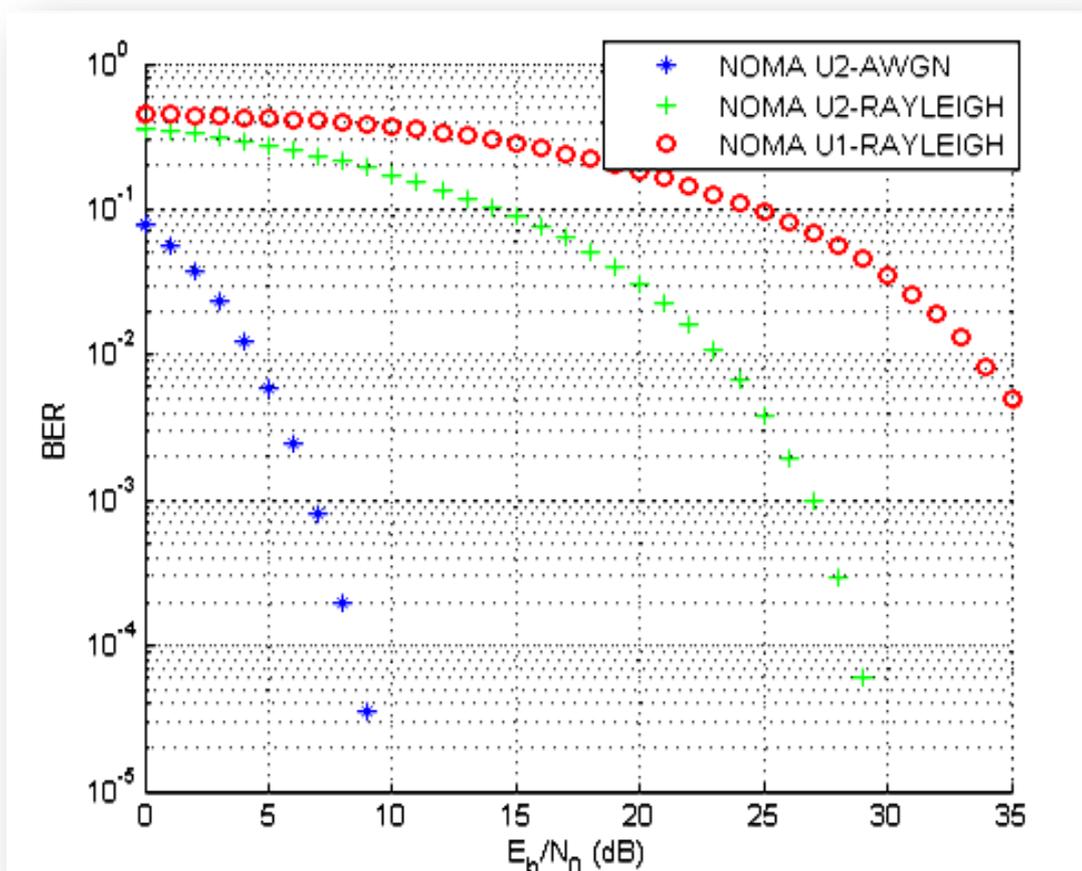


Figure IV.10 Le BER de la chaîne de transmission PD-NOMA pour un canal AWGN et un canal RAYLEIGH

Nous comparons la courbe du BER pour un canal RAYLEIGH avec celle du canal AWGN, le BER pour un canal AWGN est trop faible par rapport à un canal RAYLEIGH. Par exemple, pour une valeur du rapport E_b/N_0 de 15 dB le BER pour le canal AWGN égale à 0 dB et pour le canal RAYLEIGH le BER, égale à 10^{-11} dB.

7. Le BER du système PD-NOMA pour un canal RICIAN

Le taux d'erreur binaire pour un canal Rician est exprimé mathématiquement par la relation suivante :

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{k \left(\frac{E_b}{N_0} \right)}{k + \frac{E_b}{N_0}} \right] \quad (\text{IV.8})$$

Où K est le rapport entre la puissance du trajet direct (LOS) et la variance du multi-trajets (NLOS)

$$k = \frac{A^2}{2\sigma^2}$$

La figure IV.11 expose les résultats de la simulation de la chaîne de transmission PD-NOMA avec un modèle de canal RICIAN. Les valeurs de BER sont en fonction du rapport E_b/N_0 et le facteur k .

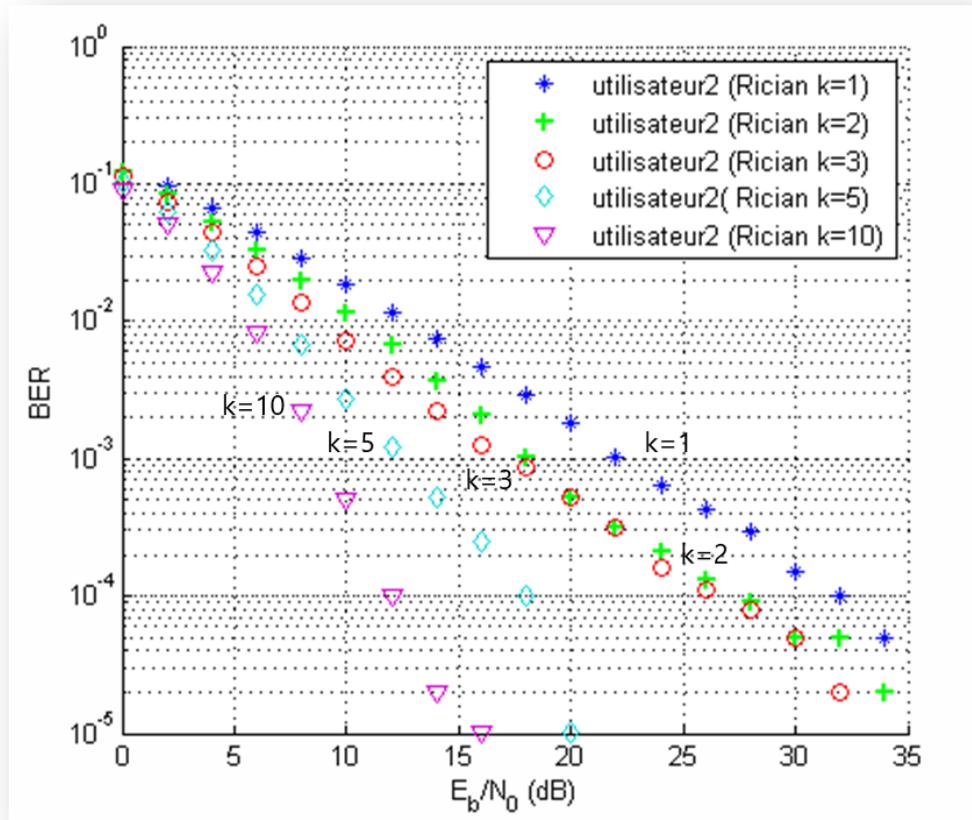


Figure IV.11 Le BER de la chaîne de transmission PD-NOMA pour un canal RICIAN

Au début, la valeur du facteur étant $k=1$ et le SNR variant de 0 dB à 35 dB. Après l'exécution de l'application BERTOOL la courbe résultante présente des valeurs élevées pour le taux d'erreur binaire. Prenons l'exemple du SNR à la valeur 12 dB, son BER est égale à 10^{-2} .

Après cela, nous augmentons progressivement la valeur du facteur k . La croissance du facteur k conduit à des valeurs faibles du taux d'erreur. Du fait que la puissance du trajet direct est la plus élevée.

8. Comparaison entre les performances du BER pour trois types de canaux (AWGN, RAYLEIGH, RICIEN)

Dans cette partie, nous allons comparer les résultats obtenus avec les 3 types de canaux.

La figure IV.12 représente les performances du système PD-NOMA en termes de variation de BER en fonction du rapport E_b/N_0 .

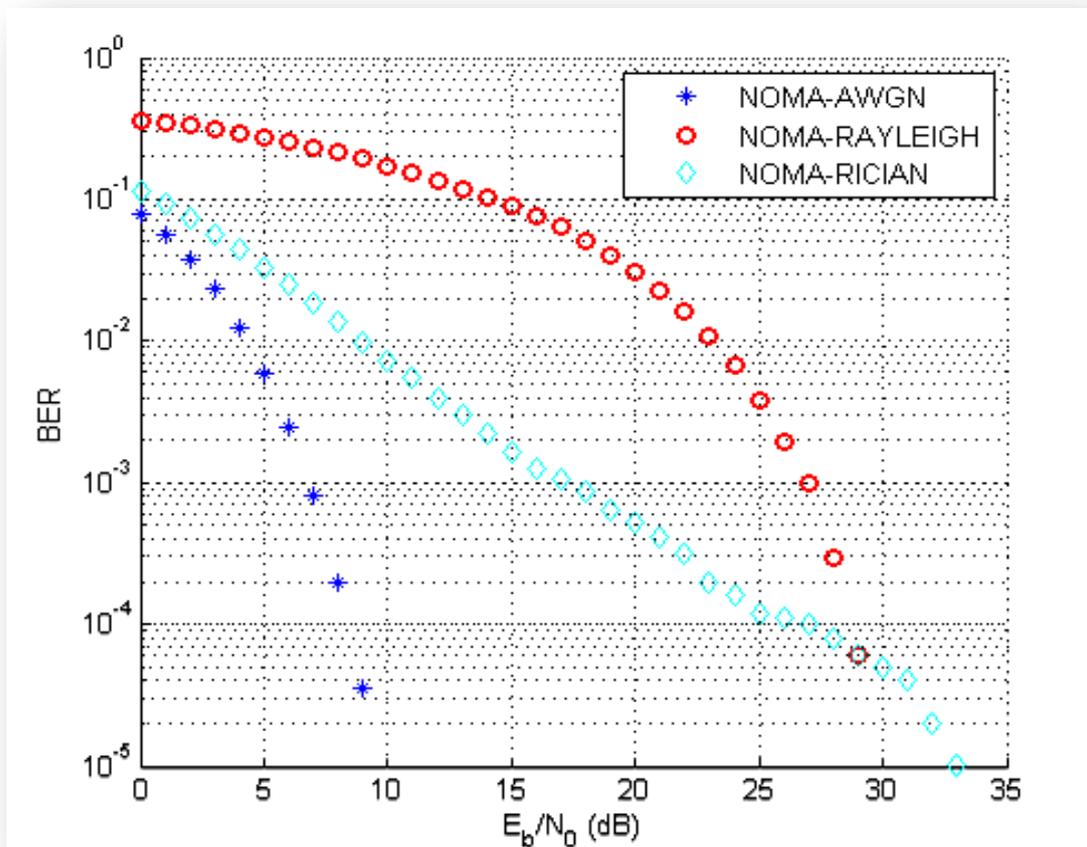


Figure IV.12 Le BER de la chaîne de transmission PD-NOMA pour un canal AWGN, RAYLEIGH et RICIEN

Dans ce qui suit nous présentons un tableau qui résume les valeurs du BER pour la modulation M-PSK étant $M = \{4, 16\}$ et $E_b/N_0 = \{2, 8, 14, 18\}$.

Type du canal		M-PSK	
		M=4	M=16
		Eb/No	BER
AWGN	2	0.0732	0.4881
	8	0.00037	0.1650
	14	0.0000	0.0058
	18	0.0000	0.00001
	20	0.0000	0.0000
RAYLEIGH	Eb/No	BER	
	2	0.5430	0.8536
	8	0.3651	0.7237
	14	0.1860	0.5175
	18	0.0974	0.3558
	20	0.0606	0.0233
RICIAN	Eb/No	BER	
	2	0.1354	0.5202
	8	0.0257	0.2325
	14	0.0043	0.0533
	18	0.0015	0.0118
	20	0.0000	0.0035

Table IV.1 Les valeurs du BER dans un canal AWGN, RAYLEIGH et RICIAN pour une modulation M-PSK

Nous présentons aussi les valeurs du BER pour la modulation M-QAM . Nous prenons $M=\{16, 64\}$ et $E_b/N_0 =\{2, 8, 14, 18\}$.

Type du canal		M-QAM	
		M=16	M=64
		E _b /N ₀	BER
AWGN	2	0.5137	0.8451
	8	0.1368	0.5533
	14	0.0012	0.1344
	18	0.0000	0.0093
	20	0.0000	0.0007
		E _b /N ₀	BER
RAYLEIGH	2	0.8561	0.9570
	8	0.7454	0.9160
	14	0.5272	0.8033
	18	0.3562	0.6125
	20	0.2816	0.5657
		E _b /N ₀	BER
RICIAN	2	0.5413	0.8277
	8	0.2192	0.5842
	14	0.0435	0.2293
	18	0.0127	0.0806
	20	0.0070	0.0444

Table IV.2 Les valeurs du BER dans un canal AWGN, RAYLEIGH et RICIAN pour une modulation M-QAM

Nous constatons que le BER pour un système PD-NOMA avec le canal AWGN est le meilleur, de sorte qu'il génère les plus faibles valeurs du BER. De même pour un modèle du canal RICIAN, les valeurs de taux d'erreur binaire sont plus faibles que celles du modèle RAYLEIGH.

9. Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons appris l'utilisation de l'application BERTOOL. Les résultats obtenus de BERTOOL ont facilité l'analyse des différents modèles de la chaîne de transmission PD-NOMA implémentés.

Par la suite, nous avons comparé les résultats de la simulation obtenus, en variant le type de la modulation, ainsi que le modèle du canal utilisé. À partir des mesures du taux d'erreur binaire obtenues, nous constatons que la technique d'accès multiples non-orthogonales offre des valeurs de BER faibles dans le domaine de puissance. Cette nouvelle approche assure l'équité entre les différents utilisateurs du réseau, de sorte que l'utilisateur le plus éloigné de la station de base est le plus performant en termes de BER.

CONCLUSION GENERALE

Ce projet a été dédié à l'étude des performances de la technique NOMA dans le domaine de puissance. Pour cela, nous avons fait l'étude théorique des mécanismes de cette technique. Pour mieux évaluer la PD-NOMA, nous avons implémenté une chaîne de transmission PD-NOMA sous l'environnement MATLAB-Simulink. Pour cette étude, nous avons utilisé les différents ordres des modulations M-PSK et M-QAM avec trois types de canaux AWGN, RAYLEIGH, Rician.

À travers ce travail, nous avons eu l'occasion d'approcher la technique d'accès multiples non-orthogonale c'est l'une des techniques d'accès multiples cible et importante dans les recherches courantes, dans le but d'améliorer les performances des communications sans fils pour la 5G.

Dans ce mémoire, nous avons examiné la stratégie d'allocation de puissance dans un réseau PD-NOMA, la superposition des signaux (SC), l'équité entre les différents utilisateurs (l'allocation de puissance) et le schéma du détecteur SIC. A partir de l'analyse de ces processus et les performances de la PD-NOMA, nous déduisons que NOMA peut être adoptée comme une approche prometteuse qui marque une excellente évolution pour les systèmes de communication mobile de la 5ème génération.

NOMA répond aux exigences de la 5G étant donné :

- ✓ L'efficacité spectrale élevée en desservant plusieurs utilisateurs en même temps et avec la même ressource de fréquence, et en atténuant les interférences via le détecteur SIC.
- ✓ L'augmentation du nombre d'utilisateurs servis simultanément et donc prendre en charge une connectivité massive.
- ✓ En raison de la nature de la transmission simultanée, un utilisateur n'a pas besoin de passer par un intervalle de temps programmé pour transmettre ses informations et par conséquent, il subit une latence plus faible.

- ✓ NOMA peut maintenir l'équité pour les utilisateurs et une qualité de service diversifiée par un contrôle flexible de la puissance entre les différents utilisateurs.

Les schémas de NOMA présentés dans ce mémoire réalisent le multiplexage des signaux dans le domaine de puissance. En revanche dans des futurs travaux, nous pouvons introduire la deuxième catégorie des systèmes NOMA, qui réalise le multiplexage dans le domaine de code. Le concept de domaine de code NOMA s'inspire des systèmes CDMA classiques, dans lesquels plusieurs utilisateurs partagent les mêmes ressources temps-fréquence, mais adoptent des différentes séquences d'étalement. Toutefois, la principale différence par rapport aux systèmes CDMA est que les séquences d'étalement sont des séquences non-orthogonales.

Nous pouvons aussi travailler sur la combinaison des deux domaines code et puissance dans la liaison montante afin de soutenir un grand nombre d'utilisateurs dans le réseau.

Dans le présent travail, nous avons limité le potentiel de la NOMA en seulement un système SISO, dans lequel l'allocation de puissance et l'équité pour l'utilisateur sont les principales préoccupations. Néanmoins les performances de NOMA peuvent être encore améliorées en la combinant avec la technologie MIMO (multi-input multi-output). Dans MIMO-NOMA, les utilisateurs sont ajustés en clusters et les mécanismes de la NOMA sont appliqués uniquement parmi les utilisateurs du même cluster.

L'un des principaux avantages de la technique NOMA est la possibilité de la pénétrer et la combiner dans les autres réseaux mobiles et avec d'autres techniques y compris MIMO, mmwave et le beamforming. Cette combinaison rend la technique NOMA plus pratique et ses limites seront surmontées.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Techtarget. Définition 5G [**en ligne**]. (Modifier en janvier 2020). Disponible sur :< <https://whatis.techtarget.com/fr/definition/5G> > (Consulté le 11/03/2020).
- [2] RANDROID. Réseau 5G : déploiement, fonctionnement, usages et smartphones compatibles. [**en ligne**].(modifier le 31 mai 2020). Disponible sur :< https://www.frandroid.com/telecom/488716_reseau-5g-tout-ce-qui-va-changer-quels-usages-et-pourquoi-la-technologie-est-importante> (Consulté le 3/06/2020).
- [3] Techtarget. Définition 5G [**en ligne**]. (Modifier en octobre 2018) 3GPP (3rd Generation Partnership Project). Disponible sur :<<https://searchnetworking.techtarget.com/definition/3rd-Generation-Partnership-Project-3GPP>> (Consulté le 13/03/2020).
- [4] Internet Society. A propos de l'IETF [**en ligne**]. (Modifier le 28 aout 2018). Disponible sur :< <https://www.internetsociety.org/fr/about-the-ietf/>> (Consulté le 13/03/2020).
- [5] UIT Engagée à connecter le monde. A propos de l'Union internationale des télécommunications (UIT) [**en ligne**]. (Modifier en janvier 2020). Disponible sur :< <https://www.itu.int/fr/about/Pages/default.aspx>> (Consulté le 13/03/2020).
- [6] P. W. C. Chan et al., "The Evolution Path of 4G Networks : FDD or TDD ?," IEEE Commun. Mag., vol. 44, no. 12, pp. 42–50, 2006.
- [7] S. Hong et al., "Applications of self-interference cancellation in 5G and beyond," IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 2, pp. 114–121, 2014.
- [8] Cigref- 5. Anticipation et opportunités 2020 janvier influence de la 5G sur les architectures. France.Janvier 2020.
- [9] Club Iot by siapartners. Tour d'horizon des innovations technologiques à l'origine de la révolution 5G et ses impacts sur l'IoT [**en ligne**]. Disponible

sur :< <https://www.club-iot.sia-partners.com/article-5g>> (Consulté le 20/03/2020).

- [10] FRENCHWEB.FR. Les nombreux défis de la 5G [**en ligne**] (Modifier le 30 juillet 2020) Disponible sur :< <https://www.frenchweb.fr/les-nombreux-defis-de-la-5g/317383#gsc.tab=0>> (Consulté le (14/07/2020).
- [11] INT SPOTLIGHT. Massive Machine Type Communication in 5G and beyond network. Disponible sur : <<https://itnspotlight.com/massive-machine-type-communication-in-5g-and-beyond-network/>> (Consulté le 01/06/2020).
- [12] Colloque Avicca. Couverture mobile : les défis des zones blanches... et de la 5G. 23 mai 2017 Rémi Stefanini Directeur « Mobile et innovation » page 12.
- [13] NTT DOCOMO, “5G Radio Access: Requirements, Concept and Technologies,” Jul-2019. [en ligne]. Disponible sur: <https://www.nttdocomo.co.jp/english/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper_5g/DOCOMO_5G_White_Paper.pdf> (Consulté le 11/06/2020).
- [14] Ericsson. 5G radio access, capabilities and technologies, Apr-2016. [en ligne] (Modifier le: 16-Mar-2019). Disponible sur: <<https://www.ericsson.com/res/docs/whitepapers/wp-5g.pdf>> (Consulté le 14/07/2020)
- [15] futura-sciences. 5G DÉFINITION Classé sous :INFORMATIQUE , RÉSEAU , INTERNET DES OBJETS [en ligne] Disponible sur : <<https://www.futura-sciences.com/tech/definitions/informatique-5g-17101/>> (Consulté le 16/06/2020).
- [16] Opinions Libres le blog d’olivier Ezratty. Les nombreux défis de la 5G [en ligne] (Modifier le 1 mars 2018). Disponible sur :<<https://www.oezratty.net/wordpress/2018/nombreux-defis-5g/>> (Consulté le 14/07/2020).

- [17] Cisco Blogs. Three Services from 5G: More, Better! [en ligne] (modifier le 20 septembre 2019) Disponible sur :<<https://blogs.cisco.com/sp/5gwebplayers>> (Consulté le 14/07/2020).
- [18] Olfa Chabbouh. Gestion Des Ressources Des Réseaux Cloud RAN Dans un Contexte 5G.Thèse de doctorat. Université de Carthage École Supérieure des Communications de Tunis École Doctorale en Technologies de l'Information et de la Communication. 13 Octobre 2017.
- [19] E-santé.fr . Première opérations chirurgical à plus 7000km de distance .Disponible sur :< <https://www.e-sante.fr/premiere-operation-chirurgicale-plus-7-000-km-distance/actualite/657>> (Consulté le 20/07/2020).
- [20] Linglong D , Bichai W, Zhiguo D, Zhaocheng W, Sheng Ch,Lajos H. A Survey of Non-Orthogonal Multiple Access for 5G. In : IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 20, NO. 3, THIRD QUARTER 2018.
- [21] GAL YNA PISKONOVA . Transmission OFDM pour la téléphonie. Thèse de doctorat. Ecole de technologie supérieur université du QUÉBEC.19 Décembre 2013.
- [22] futura-sciences. LA TECHNIQUE OFDM [en ligne]. Disponible sur :<<https://www.futura-sciences.com/tech/definitions/tech-ofdm-3915/>> (Consulté le 20/06/2020).
- [23] SOLTANI Samira. Etude de performances des modulations multi porteuses OFDM dans un canal radio mobile. Mémoire de master. Université de MSILA Faculté de technologie. Département : Electronique. Juin 2012.
- [24] R. W. Chang, "Synthesis of Band-limited Orthogonal Signals for Multichannel Data Transmission," The Bell System Technical Journal, pp. 1775–1796, Decembre 1966.
- [25] H BEN HNIA, A KACHOURI, O BEN BELGHITH, L KAMOUN. Etude des performances de la modulation OFDM pour l'utilisation dans les systèmes de communication sans fils de la 4G. In : SETIT 2004.

International Conference: Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications.4 pages.

- [26] Annick Le Glaunec . MODULATIONS MULTIPORTEUSES. Centrale Supélec. Université paris-Saclay.17 pages.
- [27] BENDAOU F, ABDENNEBI M, DIDI f. Allocation des ressources radio en LTE. **In** : International Congress on Telecommunication and Application'14 University of A.MIRA Bejaia, Algeria, 23-24 APRIL 2014. 6 Pages.
- [28] A Choumane « Synthèse d'un canal de propagation par système multi antennes pour la caractérisation de terminaux mobiles à diversité » page 17 2011.
- [29] TAo Y, Liu L, Liu S, ZHANG Z A Survey: Several Technologies of Non-Orthogonal Transmission for 5G China Communications October 2015.
- [30] Ziad Qais Abdulkareem Al-Abbasi « RESOURCE ALLOCATION FOR DOWNLINK NON-ORTHOGONAL MULTIPLE ACCESS (NOMA) SYSTEM » School of Electrical and Electronic Engineering 2017.
- [31] Linglong D , Senior M, Bichai W, Zhiguo ,Zhaocheng W , S Sheng Chen , Fellow, Lajos H « Survey of Non-Orthogonal Multiple Access for 5G » IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 20, NO. 3, THIRD QUARTER 2018.
- [32] Mahmoud A, Mesut T,Selahattin G,Güne G « A Tutorial on Nonorthogonal Multiple Access for 5G and Beyond » Hindawi Wireless Communications and Mobile Computing Volume 2018, Article ID 9713450.
- [33] S.M. Riazul Islam, Nurilla Avazov, Octavia A. Dobre, and Kyung-Sup Kwak « Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G Systems: Potentials and Challenges ».
- [34] Talgat M, Refik ,Yau . Optimum Power Allocation for Non-orthogonal Multiple Access (NOMA) . 10e Conférence internationale de l'IEEE sur l'application des technologies de l'information et de la communication, AICT 2016. Azerbaïdjan. BAKOU. 25 juillet 2017.

- [35] Mathwork.com.BERTOOL. [en ligne] Disponible sur :<<https://www.mathworks.com/help/comm/ug/bit-error-rate-ber.html#bsvziy0>> (Consulté le 14/06/2020).
- [36] Yann Benoit. L'évolution du réseau: En route vers la 5G [en ligne]. Québec.Novembre 2018.
- [37] Le routeur Wifi.Qu'est-ce qu'un réseau 5G. [en ligne] (modifier le 27 mai 2020). Disponible sur : <<https://le-routeur-wifi.com/quest-ce-quun-reseau-5g/>> consulté le 25/04/2020.
- [38] Numerama. Julien Lausson. 5G tout comprendre au réseau mobile du futur.[en ligne] (modifier 25 juillet 2020).Disponible sur :<<https://www.numerama.com/tech/147723-5g-tout-savoir-sur-le-reseau-mobile-du-futur.html>>.(Consulté le 17 aout 2020).
- [39] Alexandre Boyer. Canaux de transmission bruités [en ligne].Toulouse INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE TOULOUSE 4 ème Année IR. Septembre 2014.139p. Disponible sur :<http://alexandreboyer.fr/alex/enseignement/cours_transmission_bruite_sept11_v2_sans_reponses.pdf>. (Consulté le 29/06/2020).