

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Electrique

Filière : Télécommunications

Option : Réseaux et Télécommunications

Réf :2019/2020

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme :

**MASTER**

*Thème*

# Etude d'un modèle de canal MIMO

Présenté par :

**MAZRI Ammar**

Soutenu le : 30 Septembre 2020

Devant le jury compose de :

Mr. BOUKREDINE Salah Eddine	MAA	Université de Biskra	Président
Mr. ABDESSELAM Salim	MCB	Université de Biskra	Rapporteur
Mm. OUARHLENT Saloua	MAA	Université de Biskra	Examinatrice

**Année universitaire: 2019 / 2020**

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : Télécommunications  
Option : Réseaux et Télécommunications

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme :

**MASTER**

*Thème*

# Étude d'un modèle de canal MIMO

Présenté par :

*MAZRI Ammar*

Avis favorable de l'encadreur :

Dr. ABDESSELAM Salim

Avis favorable du Président du Jury

Mr BOUKREDINE Salah Eddine

Cachet et signature

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Electrique

Filière : Télécommunications

Option : Réseaux et Télécommunications

*Thème :*

# Étude d'un modèle de canal MIMO

Proposé par : MAZRI Ammar

Dirigé par : Dr ABDESSELAM Salim

## Remerciements

*Nous tenons à remercier en premier lieu et avant tout ALLAH le tout puissant, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir notre travail dans les meilleures conditions.*

*Je remercie **ma famille** pour les sacrifices qu'ils ont consentis pour que nous puissions terminer nos études.*

*Je voudrais exprimer, par ce modeste travail, ma gratitude, ma reconnaissance, ma considération et mes grands remerciements à mon encadreur, le **Dr : ABDESSALAM Salim** d'avoir proposé, suivi et corrigé ce travail et je vous remercie chaleureusement pour le savoir que vous m'avez enseigné.*

*Je tiens à adresser mes plus sincères remerciements aux membres du jury :*

*Le président : Mr. **BOUKREDINE Salah Eddine**, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de mon mémoire.*

*L'examineur : Mme. **OVARHLENT Saloua** pour l'intérêt qu'elle a portée à mon travail en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.*

*Je tiens à remercier vivement toutes les personnes qui m'ont aidé à élaborer et à réaliser ce mémoire, ainsi tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à accomplir ce travail.*

*Mes remerciements vont aussi à tous les enseignants du de **l'université Mohamed Kfider Biskra** surtout du département de génie électrique.*

*A tout personne ayant participé de près ou de loin à aider pour la réalisation de ce travail et tout personnes dont nous avons oublié de citer.*

# *Dédicace*

*À mes parents,*

*À ma famille,*

*À mes amis.*

*Ammar*

بسم الله الرحمن الرحيم

والحمد لله رب العالمين والصلاة والسلام على خاتم الأنبياء والمرسلين

الحمد لله الذي من على بأن أكون في مكاني هذا أكتب هاته الكلمات ومنحني فرصة

شكر أشخاص غالين على قلبي.

أهدي هذا العمل:

إلى من كلة الله بالهبة والوقار.. إلى من علمني العطاء بدون انتظار.. إلى من أحمل أسمه

بكل افتخار.. أرجو من الله أن يمد في عمرك لترى ثماراً قد حان قطافها بعد طول انتظار

وستبقى كلماتك نجوم أهتدي بها اليوم وفي الغد وإلى الأبد والذي العزيز مازري مبارك

إلى ملاكي في الحياة.. إلى معنى الحب وإلى معنى الحنان والتفاني.. إلى بسمه الحياة وسر

الوجود إلى من كان دعائها سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي

إلى أغلى الحبايب أمي الحبيبة عمراني حدة

إلى سندي وقوتي وملاذي بعد الله إلى من آثروني على أنفسهم إلى من علموني علم الحياة

إلى من أظهروا لي ما هو أجمل في الحياة إلى من حبهم يجري في عروقي ويلهج بذكراهم

فؤادي اخواتي وأخواتي عيشوش، كريمة، صبرينة، ايمان، لسعد، لميسى.

إلى جميع عائلتي وجميع الأقارب

إلى من آنسني في دراستي وشاركني همومي واصدقائي الذين جمعتني بهم الغربة والدراسة

تمنيت انا تكتمل فرحتي بوجودكم وحضوركم في المناقشة لكن الوباء منعانا نسأل الله

عزوجل ان يرفعا عنا هذا البلاء والوباء

عمار مازري

# Résumé

---

La recherche dans le domaine des futurs réseaux de radio communication est en pleine expansion. Le développement de nouveaux systèmes a pour objectif la transmission d'information numérique à des débits toujours plus élevés et pour une qualité de service de plus en plus exigeante. Dans ce contexte, les systèmes de transmission de type MIMO (Multiple Input Multiple Output), comportant plusieurs antennes à l'émission et à la réception, sont considérés comme étant des techniques incontournables. D'une part, l'efficacité spectrale potentielle d'un tel système est bien plus élevée que celle d'un système mono-antenne. En effet, la capacité d'un système MIMO augmente linéairement avec le nombre d'antennes à l'émission.

D'autre part, grâce à une meilleure exploitation de la diversité, ce système est plus robuste aux évanouissements du canal de transmission améliorant ainsi la qualité de la transmission.

Les systèmes multi-antennes ou systèmes MIMO sont maintenant reconnus comme l'outil indispensable pour obtenir des débits très élevés sans augmenter la bande passante. La contrepartie est que ces systèmes génèrent des interférences considérables et qu'il faut créer en réception des dispositifs capables de supprimer au mieux ces interférences pour retrouver le flux de données originel. Le travail proposé dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la recherche de techniques de réception multi-antennes capables de supprimer au mieux les interférences.

Les travaux présentés dans cette thèse sont principalement consacrés à l'étude des techniques de réception utilisées dans les systèmes MIMO et concernent également l'étude comparative de leurs performances en termes de taux d'erreur sur les bits en fonction du rapport signal sur bruit. (SNR).

**Mots-clés** : système MIMO, capacité du canal, Réception multi-antennes, efficacité spectrale. BER, SNR.

## ملخص

يتوسع البحث في مجال شبكات الاتصالات الراديوية المستقبلية بسرعة. يهدف تطوير أنظمة جديدة إلى نقل المعلومات الرقمية بمعدلات أعلى من أي وقت مضى وإلى جودة الخدمة التي تتطلب المزيد من المتطلبات. في هذا السياق، تعتبر أنظمة الإرسال من نوع MIMO (متعدد المدخلات والمخرجات)، التي تشتمل على عدة هوائيات للإرسال والاستقبال، من التقنيات الأساسية. فمن ناحية، تكون الكفاءة الطيفية المحتملة لمثل هذا النظام أعلى بكثير من كفاءة نظام هوائي واحد. في الواقع، تزداد قدرة نظام MIMO خطيًا مع عدد الهوائيات المرسل. من ناحية أخرى، بفضل الاستخدام الأفضل للتنوع، يكون هذا النظام أكثر قوة في خبو قناة الإرسال، وبالتالي تحسين جودة الإرسال.

يتم التعرف الآن على أنظمة الهوائيات المتعددة أو أنظمة MIMO كأداة أساسية للحصول على سرعات عالية جدًا دون زيادة عرض النطاق الترددي. الجانب السلبي هو أن هذه الأنظمة تولد تداخلًا كبيرًا وأنه يجب إنشاء أجهزة استقبال قادرة على القضاء على هذا التداخل على أفضل وجه ممكن من أجل استعادة تدفق البيانات الأصلية. العمل المقترح في هذه الأطروحة هو جزء من البحث عن تقنيات استقبال متعددة الهوائيات قادرة على قمع التداخل على أفضل وجه.

العمل المقدم في هذه الأطروحة مكرس بشكل أساسي لدراسة تقنيات الاستقبال المستخدمة في أنظمة MIMO ويتعلق أيضًا بالدراسة المقارنة لأدائها من حيث معدل خطأ البتات كدالة لنسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR).

**الكلمات المفاتيح:** نظام MIMO، سعة القناة، استقبال متعدد الهوائيات، كفاءة طيفية، BER، SNR.

**Table des matières**

Remerciements	I
Dédicaces	II
Résumé	IV
Table de matières	VI
Liste des figures	X
Liste des tableaux	XII
Listes des acronymes et abréviations	XIII
Introduction générale	1

---

**Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes multi-antennes**

---

1.1. Introduction	3
1.2 Définition d'une antenne	3
1.3 Principaux paramètres d'une antenne	4
1.3.1 Impédance d'entrée	4
1.3.2 Coefficient de réflexion	5
1.3.3 Rapport d'onde stationnaire	6
1.3.4 Fréquence de résonance et bande passante	6
1.3.5 Diagramme de rayonnement	7
1.3.6 Le gain d'une antenne	8
1.3.7 Directivité d'une antenne	8
1.4 Evanouissement et multi-trajets	9
1.4.1 Evanouissement	9
1.4.2 Les trajets multiples	10
1.5 Présentation des systèmes multi-antennes	11

---

1.5.1 Systèmes multi-antennes en émission	12
1.5.2 Systèmes multi-antennes en réception	12
1.6 Généralité de diversité	13
1.6.1 Notions de diversité	13
1.6.2 Types de diversité	14
1.6.2.1 Diversité de polarisation	14
1.6.2.2 Diversité spatiale	14
1.6.2.3 Diversité temporelle	15
1.6.2.4 Diversité fréquentielle	15
1.6.2.5 Diversité angulaire	16
1.6.2.6 Diversité de diagramme	16
1.6.2.7 Diversité de parcours	17
1.6.2.8 Diversité spatio-temporelle	17
1.6.2.9 Diversité transformée	17
1.7 Les techniques de combinaisons de signaux	17
1.7.1 Combinaison par sélection (SC)	18
1.7.2 Combinaison par commutation	19
1.7.3 Combinaison par gain égal (EGC)	20
1.7.4 Combinaison par rapport maximal (MRC)	20
1.8 Conclusion	21

---

## **Chapitre 2 : Étude technologie MIMO et Massive MIMO**

---

2.1 Introduction	22
2.2 Présentation des systèmes MIMO	22
2.3 Principe de la technologie MIMO	23

---

2.4 Les différents types de codage MIMO	23
2.4.1 Le multiplexage par répartition de fréquence orthogonale (OFDM)	23
2.4.2 Le multiplexage par division spatiale (SDM)	24
2.4.3 Le codage spatio-temporel par bloc (STBC)	24
2.5 Types des systèmes MIMO	25
2.5.1. Système SISO (Single Input Single Output)	25
2.5.2 Système MISO (Multiple Input Single Output)	25
2.5.3 Système SIMO (Single Input Multiple Output)	27
2.5.4 Système MIMO (Multiple Input Multiple Output)	27
2.6 Modèle d'un canal MIMO	28
2.6.1 Capacité d'un canal MIMO	29
2.7 Domaines d'utilisation de la technologie MIMO	30
2.7.1 La technologie MIMO dans le système WiMAX	30
2.7.2 La technologie MIMO dans le système WiFi	31
2.8 Algorithmes de réception associés aux systèmes MIMO	31
2.8.1 L'égaliseur de forçage à zéro (ZF)	31
2.8.2 L'égaliseur minimisant l'erreur quadratique moyenne (MMSE)	32
2.8.3 L'égaliseur à Maximum de Vraisemblance (ML)	32
2.8.4 L'égaliseur à Annulations Successives d'Interférences Ordonnées (OSIC)	33
2.9 Les avantages de la technologie MIMO	34
2.10 La technologie Massive MIMO	34
2.10.1 Beamforming (Formation de faisceau)	35
2.10.2 Multi-User MIMO (MU-MIMO)	36
2.11 Caractéristiques de Massive MIMO	36

2.11.1 L'évolutivité	36
2.11.2 Massive MIMO préfère Time-Division Duplex (TDD) Schème	37
2.11.3 Massive MIMO offre une propagation favorable	37
2.12 Modèle du système MIMO massifs	38
2.13 Conclusion	39

---

***Chapitre 3 : Etude des performances d'un système MIMO : Simulation et résultats***

---

3.1 Introduction	40
3.2 Le langage utilisé (Matlab)	40
3.3 Capacité des systèmes MIMO	41
3.3.1 Comparaison entre capacité MIMO et Shannon	41
3.4. La capacité des systèmes MIMO (SISO- SIMO- MISO-MIMO)	43
3.4.1. Les systèmes MIMO avec ( $N_t = 2$ et $R_t = 2$ )	43
3.4.2. Les systèmes MIMO avec ( $N_t = 4$ et $R_t = 4$ )	44
3.4.3. Les systèmes MIMO avec ( $N_t = 5$ et $R_t = 5$ )	45
3.5 Comparaison des performances des schémas MRC et Alamouti	46
3.6 Algorithmes de détection dans le récepteur MIMO	47
3.6.1 MIMO avec l'égaliseur (ZF, MMSE, ML)	48
3.6.2 Comparaison entre détection linéaire et non linéaire	49
3.7 Conclusion	51
Conclusion Général	52
Bibliographie	53

## Liste des figures

<b>Figure 1.1 :</b> Liaison radio typique comportant une antenne émettrice et une antenne réceptrice	4
<b>Figure 1.2 :</b> Modélisation d'une ligne transmission	5
<b>Figure 1.3 :</b> Exemple de rayonnement d'une antenne et son système de coordonnées	7
<b>Figure 1.4 :</b> Exemple de diagramme de rayonnement d'antenne en 3D.	7
<b>Figure 1.5 :</b> Exemple de Diagrammes de Directivité	9
<b>Figure 1.6 :</b> Propagation par multi-trajets dans un environnement	11
<b>Figure 1.7 :</b> Schéma d'un système de transmission multi-antennes	11
<b>Figure 1.8 :</b> Principe de la diversité	14
<b>Figure 1.9 :</b> Le même signal est transmis sur plusieurs intervalles temporels	15
<b>Figure 1.10 :</b> Le même signal est transmis sur plusieurs intervalles fréquentielles	16
<b>Figure 1.11 :</b> Représentation des différentes techniques de combinaison	18
<b>Figure 1.12 :</b> Combinaison par sélection (SC)	19
<b>Figure 1.13 :</b> Combinaison par commutation	19
<b>Figure 1.14 :</b> Combinaison par gain égal (EGC)	20
<b>Figure 1.15 :</b> Combinaison par rapport maximal (MRC)	20
<b>Figure 2.1 :</b> Principe de la technologie MIMO.	23
<b>Figure 2.2 :</b> Model du système MIMO-OFDM	24
<b>Figure 2.3 :</b> Système SISO	25
<b>Figure 2.4:</b> Système MISO	26
<b>Figure 2.5:</b> Système SIMO	27
<b>Figure 2.6 :</b> Système MIMO	28
<b>Figure 2.7 :</b> Schéma d'un système de transmission MIMO.	28

<b>Figure 2.8</b> : Canal MIMO	29
<b>Figure 2.9</b> : Détection Maximum de Vraisemblance.	32
<b>Figure 2.10</b> : Egaliseur V-BLAST	33
<b>Figure 2.11</b> : Une illustration architecture de massive MIMO	35
<b>Figure 2.12</b> : Système Massive MIMO en transmission multi-utilisateurs [15]	36
<b>Figure 2.13</b> : La contrainte de M et K sur TDD et FDD pour un système MIMO massive [7]	37
<b>Figure 2.14</b> : Le modèle du système MIMO massive	38
<b>Figure 3.1</b> : Comparaison entre les capacités des canaux SISO et MIMOs	42
<b>Figure 3.2</b> : Capacités des systèmes MIMO(2x2), SIMO(1x2), MISO(2x1) et SISO(1x1)	43
<b>Figure 3.3</b> : Capacités des systèmes MIMO (4x4), SIMO (1x4), MISO (4x1) et SISO (1x1)	44
<b>Figure 3.4</b> : Capacités des systèmes MIMO (5x5), SIMO (1x5), MISO (5x1) et SISO (1x1)	45
<b>Figure 3.5</b> : BER pour divers schémas de diversité d'émission et de réception sur le canal à évanouissements de Rayleigh à l'aide de BPSK.	46
<b>Figure 3.6</b> : Organigramme de calcul	47
<b>Figure 3.7</b> : Le BER pour le système MIMO avec l'égaliseur ZF, ML et MMSE (canal de Raleigh).	48
<b>Figure 3.8</b> : Le BER pour le système MIMO (2x2) avec l'égaliseur (ZF, ZF SIC, MMSE, MMSE-SIC) pour un canal Raleigh.	49
<b>Figure 3.9</b> : Le BER pour le système MIMO (4x4) avec l'égaliseur (ZF, ZF SIC, MMSE, MMSE-SIC) pour un canal Raleigh.	50

## Liste des tableaux

<b>Tableau. 3.1</b> : Capacité MIMO en fonction de SNR.	43
<b>Tableau. 3.2</b> : BER en fonction de SNR	49
<b>Tableau. 3.3</b> : BER en fonction de SNR	50

## *Listes des acronymes et abréviations*

<b>BER</b>	Bit Error Rate
<b>BS</b>	Base Station
<b>CSI</b>	Channel State Information
<b>FDD</b>	Frequency -Division Duplex
<b>LTE</b>	Long Term Evolution
<b>MIMO</b>	Multi Input Multi Output
<b>MISO</b>	Multi Input Single Output
<b>M-MMSE</b>	Multicell Minimum Mean-Squared Error
<b>MR</b>	Maximum Ratio
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
<b>RF</b>	Radio Frequency
<b>SDM</b>	Spatial Division Multiplexing
<b>SIMO</b>	Single Input Multi Output
<b>SISO</b>	Single Input Single Output
<b>SNR</b>	Signal-to-Noise Ratio
<b>STBC</b>	Space-Time Bloc Code
<b>SU-MIMO</b>	Single User MIMO
<b>SVD</b>	Singular Value Decomposition
<b>TDD</b>	Time-Division Duplex
<b>UT</b>	User Terminal
<b>ZF</b>	Zero Forcing

## **Introduction Générale**

La recherche dans le domaine des futurs réseaux de radio communication est en pleine expansion. Le développement de nouveaux systèmes a pour objectif la transmission d'information numérique à des débits toujours plus élevés et pour une qualité de service de plus en plus exigeante. Le besoin créé par les nouvelles applications de ce domaine, impose aux opérateurs une capacité importante en termes de bande passante dans leurs réseaux. Afin de fournir notamment des services multimédias, ces opérateurs proposent désormais des systèmes multi-antennes avec de multiples bandes de fréquences. Ces systèmes doivent non seulement couvrir plusieurs standards mais doivent aussi garder une taille compacte, et une bonne efficacité. Dans ce contexte, les systèmes de transmission de type MIMO (Multiple Input Multiple Output), comportant plusieurs antennes à l'émission et à la réception, sont considérés comme étant des techniques incontournables. D'une part, l'efficacité spectrale potentielle d'un tel système est bien plus élevée que celle d'un système mono-antenne. En effet, la capacité d'un système MIMO augmente linéairement avec le nombre d'antennes à l'émission. D'autre part, grâce à une meilleure exploitation de la diversité, ce système est plus robuste aux évanouissements du canal de transmission améliorant ainsi la qualité de la transmission.

Le premier chapitre de cette thèse sera consacré aux généralités sur les antennes. Nous montrons la définition de l'antenne et son rôle dans un système de communication radio fréquence ainsi qu'aux différentes bases du domaine et aux principaux paramètres d'une antenne. Pour éviter les phénomènes d'évanouissements causés par l'environnement de propagation multi-trajets et augmenter la capacité du canal, seront définis les systèmes multi-antenne et types des diversités.

Le deuxième chapitre couvre le développement de la technologie MIMO et se compose de deux parties : La première partie est consacrée à l'introduction de systèmes MIMO et de différents types avec différentes capacités de configuration (SISO, SIMO, MISO et MIMO) et Algorithme de réception associés aux systèmes MIMO. Dans la deuxième partie, nous décrirons l'énorme technologie MMIMO.

Le chapitre troisième présenter l'analyse des résultats de simulation pour la capacité des systèmes MIMO en fonction du rapport signal-bruit avec lequel il peut être assuré que plus d'antennes dans le système conduisent à une meilleure capacité. En plus de simuler les capacités des différents systèmes MIMO (SISO, SIMO, MISO) ainsi que nous étudions les

algorithmes du récepteur MIMO, qui permettent de détecter les symboles transmis au niveau du récepteur. Ces algorithmes de détection sont classés en détecteurs linéaires (ZF et MMSE) et détecteurs non linéaires (SIC et ML)

## **Chapitre 1**

### **Généralités sur les systèmes multi-antennes**

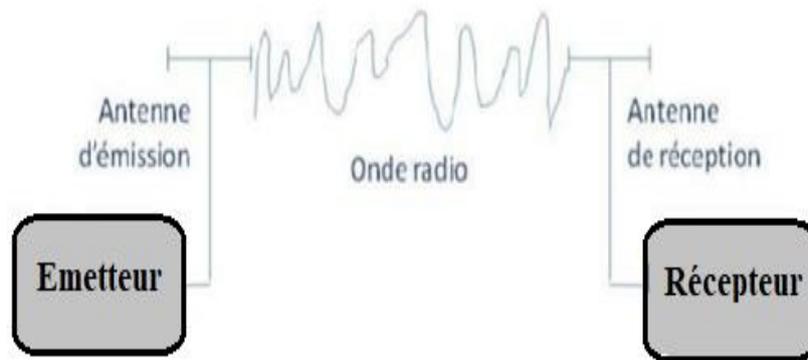
#### **1.1. Introduction**

Les communications sans fil de toutes sortes ont connu un grand développement au cours des dernières décennies. Pousse Le besoin de toujours améliorer les débits de transmission de données, avec une grande capacité à transmettre des informations, qui a donné naissance à de nouvelles technologies de communication, en particulier en ce qui concerne les antennes.

Dans ce chapitre, nous couvrirons la présentation générale des définitions des différents paramètres de base dans le domaine des antennes et leur rôle dans le système de communication radiofréquence, ainsi que les différentes règles du domaine et les principaux paramètres de l'antenne, il est donc important de revoir ces définitions. Pour ce faire, nous commençons par invoquer le concept d'antenne et ses principaux paramètres. Nous déterminerons des systèmes de diversité et différentes techniques de composition du signal, en affichant plusieurs systèmes d'antennes et en indiquant également que l'environnement dans lequel l'antenne est placée joue un rôle très important dans l'analyse des performances de diversité.

#### **1.2 Définition d'une antenne**

Selon le standard IEEE, une antenne est définie comme « Un système permettant de rayonner ou recevoir des ondes radio » [1]. L'antenne transforme l'énergie électrique d'un signal en énergie électromagnétique qui se propage sous forme d'onde. Une antenne émettrice reçoit un signal d'une ligne de transmission et le diffuse dans l'espace libre. Au contraire, une antenne réceptrice recueille l'onde électromagnétique incidente et la convertit en une tension. L'antenne est donc la partie indispensable de tout dispositif sans fil et fait le lien entre l'espace libre et le circuit électrique, ou inversement comme l'illustre la Figure 1.1 est constitué d'un bloc d'émission et d'un bloc de réception, séparés par un canal de propagation dans lequel se propage le signal électromagnétique.



**Figure 1.1 :** Liaison radio typique comportant une antenne émettrice et une antenne réceptrice

En d'autres termes, l'antenne est une structure de transition entre l'espace libre et le dispositif de guidage, ou inversement. Le dispositif de guidage ou la ligne de transmission peut prendre la forme d'une ligne coaxiale ou d'un guide d'ondes par exemple, et est utilisé pour transporter l'énergie électromagnétique de la source d'émission vers l'antenne ou de l'antenne vers le récepteur.

L'antenne a plusieurs rôles dont les principaux sont les suivants

1. Permettre une adaptation correcte entre l'équipement radioélectrique et le milieu de propagation.
2. Assurer la transmission ou la réception de l'énergie dans des directions privilégiées
3. Transmettre le plus fidèlement possible une information

### 1.3 Principaux paramètres d'une antenne

De nombreux paramètres sont utilisés pour décrire les caractéristiques et les performances des antennes tels que l'impédance d'entrée, le coefficient de réflexion, la directivité, le gain, l'efficacité ainsi que les diagrammes de rayonnement.

#### 1.3.1 Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée de l'antenne appelée  $Z_A$  est définie comme l'impédance fournie par l'antenne à ses bornes (a, b), et c'est donc la rapport complexe observée entre la tension et le courant à l'entrée de l'antenne d'émission à ses bornes. Le rapport entre les composantes électriques et magnétiques du champ aux accès de l'antenne.



**Figure 1.2 :** Modélisation d'une ligne de transmission

Dans la Figure 1.2, ces bornes sont désignées par les points (a) et (b). Cette impédance se présente sous une forme complexe composée d'une partie réelle  $R_A$  et d'une partie imaginaire  $X_A$  :

$$Z_A = \frac{V_A}{I_A} = R_A + j X_A \quad (1.1)$$

Où :

$Z_A$ : est l'impédance d'antenne aux bornes a et b [Ohms].

$X_A$ : est la réactance d'antenne aux bornes a et b [Ohms].

$R_A$ : est la résistance de l'antenne aux bornes a et b [Ohms].

En général la partie réelle  $R_A$  est considérée comme étant constituée des deux composantes  $R_r$  et  $R_L$  :

$$R_A = R_r + R_L \quad (1.2)$$

Où :

$R_r$  : est la résistance de rayonnement de l'antenne. Elle représente l'énergie échangée entre l'espace libre et le circuit.

$R_L$  : est la résistance de pertes de l'antenne : pertes diélectriques, pertes de conduction et pertes par ondes de surface. Elle représente l'énergie totale perdue sous différentes formes.

### 1.3.2 Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion est le rapport de l'amplitude entre l'onde incidente (transmise à l'antenne) et l'onde réfléchie du fait des discontinuités entre le circuit et l'antenne. En fait, lorsqu'une onde incidente change de milieu de propagation, une partie de cette onde est réfléchie, une autre partie est transmise dans le milieu.

$$\Gamma = \frac{V_{réfléchie}}{V_{incidente}} \quad (1.3)$$

Noté  $\Gamma$  ou S11 dans le cas d'un système d'accès unique, il permet de caractériser l'adaptation de l'antenne au circuit qui la précède. Idéalement, le passage du régime "guidé" au régime de propagation dans l'espace doit se faire sans pertes. Pour cela, il faut minimiser le coefficient de réflexion, c.-à-d. minimiser l'énergie réfléchie par l'antenne.

En connaissant l'impédance  $Z_A$  de l'antenne, nous pouvons déterminer le coefficient de réflexion  $\Gamma$  :

$$\Gamma = \frac{z_A + z_C^*}{z_A + z_C} \quad (1.4)$$

Sachant que  $Z_C$  est l'impédance caractéristique de la ligne (en générale elle est réelle et égale à 50  $\Omega$ ). Si aucune onde n'est réfléchie, alors l'antenne est parfaitement adaptée ( $Z_A = Z_C$ ), et par conséquent ( $\Gamma = 0$ ).

### 1.3.3 Rapport d'onde stationnaire

Le rapport d'onde stationnaire noté ROS, se calcule à partir du coefficient de réflexion présenté précédemment. Il quantifie la désadaptation de l'impédance entre deux composants.

$$\text{ROS} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (1.5)$$

ROS exprime la qualité de l'adaptation d'antenne, à une ligne de transmission, En pratique, l'antenne n'est jamais parfaitement adaptée. Le cas ROS=1 est le cas minimal traduisant une adaptation parfaite.

### 1.3.4 Fréquence de résonance et bande passante

La fréquence de résonance ( $f_{res}$ ) est la fréquence pour laquelle la partie réelle de l'impédance d'entrée est maximale et sa partie imaginaire est nulle.

Les fréquences utilisées doivent être comprises dans la bande passante de l'antenne. Cette bande se déduit de la courbe du coefficient de réflexion mesuré à l'analyseur de réseaux. Elle peut s'exprimer de manière absolue ou, de manière relative en pourcentage par rapport à la fréquence d'adaptation ou à la fréquence centrale :

$$BP_{\%} = \frac{(f_2 - f_1)}{(f_{adpt} \times 100)} \quad (1.6)$$

Où :  $f_1$  et  $f_2$  sont les fréquences limites correspondant à la limite du coefficient de réflexion autorisé. Cette représentation permet de comparer plus équitablement les antennes.

### 1.3.5 Diagramme de rayonnement

Un diagramme de rayonnement d'une antenne est défini comme une représentation de la répartition du rayonnement (de l'énergie électromagnétique rayonnée) autour de l'antenne. Il est déterminé dans la région du champ lointain et est représenté généralement en fonction des coordonnées sphériques.

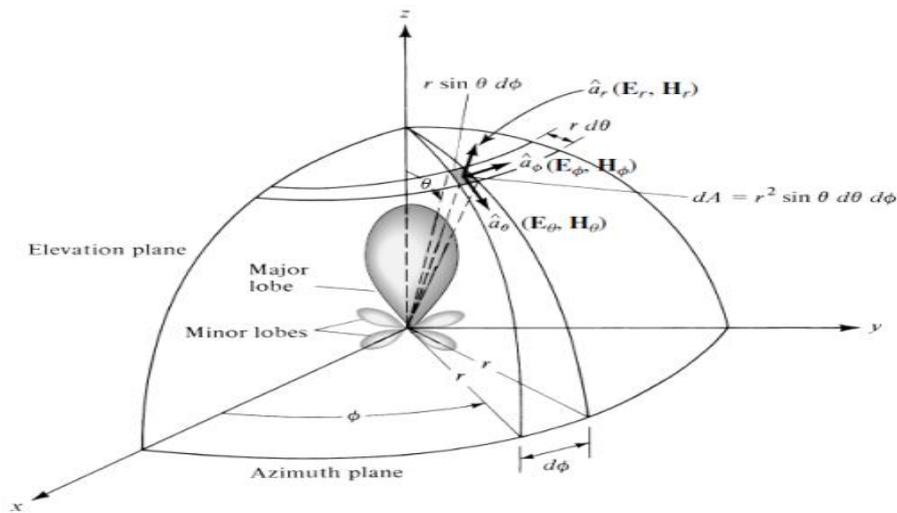


Figure 1.3 : Exemple de rayonnement d'une antenne et son système de coordonnées

En d'autres termes, le diagramme de rayonnement représente les variations de la puissance que rayonne l'antenne dans les différentes directions de l'espace autour d'elle.

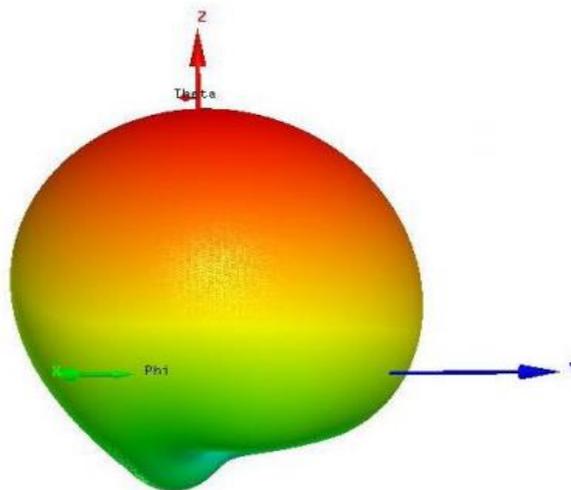


Figure 1.4 : Exemple de diagramme de rayonnement d'antenne en 3D.

### 1.3.6 Le gain d'une antenne

Un autre paramètre utile décrivant la performance d'une antenne est le gain. Le gain d'une antenne, dans une direction donnée, est défini comme le rapport de la densité de puissance rayonnée par l'antenne sur la densité de puissance rayonnée par une antenne isotrope de référence (antenne qui rayonne uniformément dans toutes les directions) [2]. Logiquement, le gain maximal est élevé sur des antennes directives (nous verrons la notion de diversité au point suivant). Ça peut être exprimé comme suit :

$$Gain(\theta, \varphi) = 4\pi \times \frac{\text{Densité de puissance rayonnée}}{\text{puissance total acceptée(injectée)}} = \frac{4\pi \cdot U(\theta, \varphi)}{P_{in}} \quad (1.7)$$

Où :

$U(\theta, \varphi)$  : représente la densité de puissance rayonnée de l'antenne.

$P_{in}$  : est la puissance injectée dans l'antenne.

Le gain est exprimé en  $dB_i$ , quantifie le gain en décibel par rapport à l'antenne isotrope. Il peut être relevé sur les diagrammes de rayonnement mesurés en chambre anéchoïde.

### 1.3.7 Directivité d'une antenne

C'est une propriété qui caractérise la capacité d'une antenne à focaliser l'énergie dans une direction particulière. La directivité d'une antenne est définie comme le rapport de l'intensité du rayonnement dans une direction donnée de l'antenne à l'intensité de rayonnement d'une source isotrope (la source isotrope rayonne la même puissance dans toutes les directions et son intensité de rayonnement est égale à la puissance totale rayonnée par l'antenne divisée par  $4\pi$ ).

Plus simplement la directivité d'une antenne est le rapport de la puissance rayonnée  $P(\theta, \varphi)$  à la puissance que rayonnerait la source isotrope  $P_{ray}/4\pi$  .[1]

$$D(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{\frac{P_{ray}}{4\pi}} = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_{ray}} \quad (1.8)$$

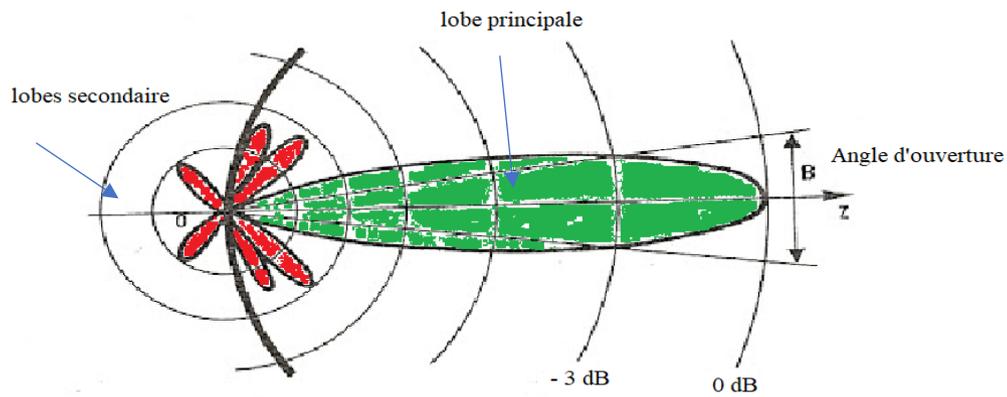


Figure 1.5 : Exemple de Diagrammes de Directivité

## 1.4 Evanouissement et multi-trajets

Le signal d'une antenne radio est réparti dans toutes les directions (si l'antenne est omnidirectionnelle), ou dans un ensemble directionnel très précis, si l'antenne est dirigée. Le signal transmis est soumis à des réflexions, réfraction et propagation autour d'obstacles dans l'environnement de propagation entre la source et la destination. Comme exemples d'obstacles, nous citons des bâtiments, des arbres et des voitures pour l'environnement extérieur, sinon pour l'intérieur, nous citons des meubles, des murs, ...etc. Par conséquent, le récepteur voit plusieurs versions du signal transmis, des capacités débilantes et certains retards.

### 1.4.1 Evanouissement

L'expérience de l'évanouissement dans une connexion sans fil est en fait une perte de puissance du signal perçue pour diverses raisons en fonction du type d'évanouissement rencontré. Nous pouvons les regrouper en trois catégories :

1. **Ombre** : dû à la présence d'obstacles fixes sur le chemin de propagation d'un signal radio.
2. **Capacité de propagation libre** : est en fait une perte d'énergie car le signal électromagnétique se propage dans l'espace.
3. **Evanouissement** : est l'évanouissement approprié, qui se compose des effets combinés de multiples trajets de propagation, des mouvements rapides des unités d'émission et de réception et, enfin, des obstacles. Cette dernière catégorie est celle qui nous intéresse.

Cet évanouissement décrit des fluctuations rapides de l'amplitude du signal reçu sur une courte période de temps. Ce phénomène se produit car au moins deux copies du signal transmis qui atteignent le récepteur se chevauchent avec une légère différence de temps. Le résultat peut varier considérablement en amplitude et en phase en fonction de plusieurs facteurs tels que la densité, le retard entre les vagues, ...etc. Ainsi, les performances du système peuvent être gravement dégradées en raison de l'évanouissement, mais heureusement, de nombreuses techniques peuvent aider à le contrer.

### **1.4.2 Les trajets multiples**

Dans n'importe quel canal de propagation, le signal suit des multiples trajets pour atteindre sa destination dépendant des types d'obstacles (bâtiment, relief, végétation...). Ces signaux subissent des phénomènes de réflexion, diffraction et diffusion [3]. Ils sont décrits ci-après et sont illustrés dans la figure I.5.

Nous décrivons en détail ces phénomènes liés à la propagation des ondes :

➤ **Réflexion**

Lorsqu'une onde électromagnétique frappe une surface lisse de très grandes dimensions par rapport à sa longueur d'onde telle que les murs, les bâtiments, le sol, nous avons donc un phénomène de réflexion.

➤ **Diffraction**

Lorsque le chemin de transmission entre l'émetteur et le récepteur est obstrué par un corps dense de dimension comparable avec la longueur d'onde ou par une surface possédant des irrégularités pointues (les sommets, les collines et les bâtiments), nous avons la présence du phénomène de diffraction qui implique une formation d'ondes secondaires derrière le corps obstruant.

➤ **Diffusion**

La diffusion intervient lorsqu'une onde radio rencontre de grandes surfaces ou de petits objets (les bâtiments, les fenêtres, le feuillage) ou par d'autres irrégularités dans le canal. Ce phénomène implique un étalement de l'énergie dans toutes les directions.

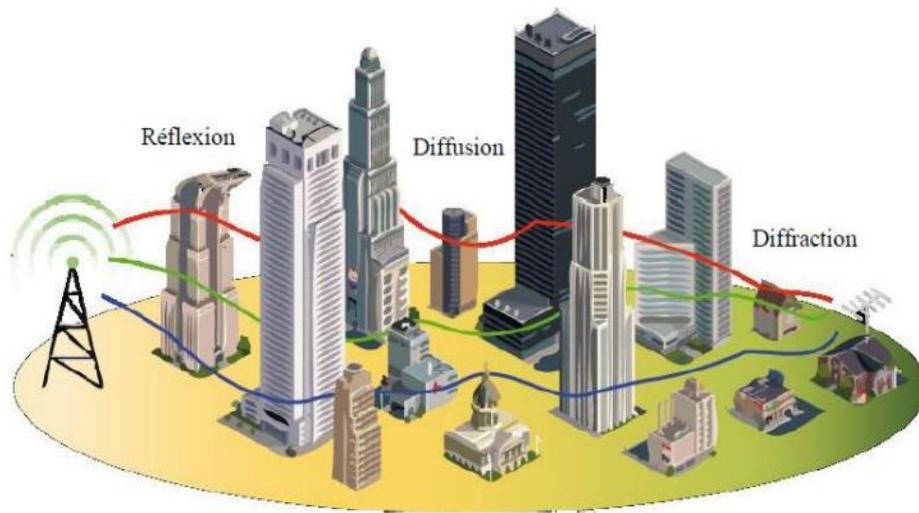


Figure 1.6 : Propagation par multi-trajets dans un environnement

## 1.5 Présentation des systèmes multi-antennes

Dans un système mono-antenne, l'augmentation de la taille de la modulation ou de la bande de fréquence utilisée est les seules solutions pour augmenter le débit de donnée, avec tous les problèmes de complexité ou d'encombrement que cela entraîne. Partant du point de vue de la théorie de l'information, deux membres des laboratoires de recherche Bell, Telatar [4] et Foschini [5], ont parallèlement et indépendamment montré que la capacité des systèmes multi-antennes augmentait linéairement avec le nombre d'antennes émettrices, dépassant de manière significative la limite théorique de Shannon [6]. Le moyen qui permet de combattre les phénomènes d'évanouissement du signal dans ces environnements multi-trajets et qui permet d'améliorer les performances des liaisons sans fils en milieu difficiles est l'utilisation des techniques de diversité et de MIMO.

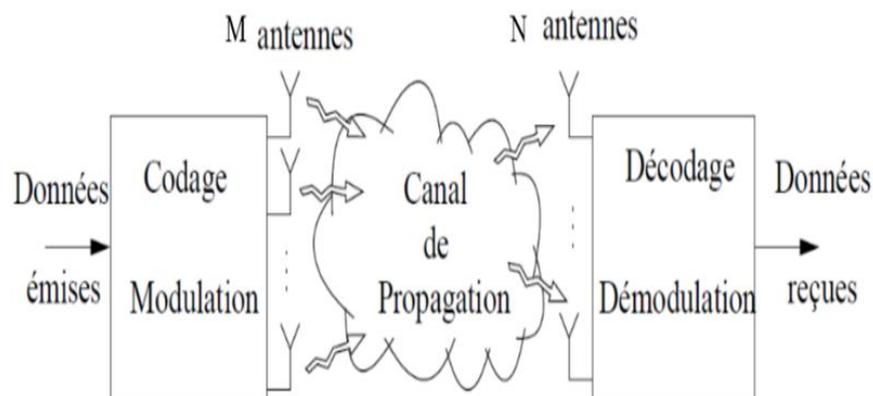


Figure 1.7 : Schéma d'un système de transmission multi-antennes

### **1.5.1 Systèmes multi-antennes en émission**

Depuis une dizaine d'années, la diversité d'émission est intensivement étudiée comme une méthode pour combattre des effets d'évanouissement dans des canaux sans fil en raison de sa simplicité par l'utilisation de plusieurs antennes en émission. En 1993, Wittneben [7] a proposé le premier système de diversité à retard utilisant plusieurs antennes d'émission. Différentes antennes transmettent les mêmes informations, mais elles sont formées par des préfiltres orthogonaux avant l'envoi des signaux. Ce préfiltre provoque des interférences entre les symboles qui peuvent convertir le canal de propagation en un canal à évanouissement sélectif en une fréquence. Un égaliseur est requis pour la réception.

Par la suite, un système similaire est proposé par Seshadri et Winters [8] pour un seul émetteur dans lequel les copies de la même information sont transmises sur les différentes antennes. En réception, un détecteur avec un critère du maximum de vraisemblance est requis pour retrouver l'information transmise en exploitant la diversité créée en émission.

La technologie de retard de diversité peut maximiser les gains de diversité, mais cette technique, qui équivaut à du code répété. Il est donc nécessaire d'élaborer de nouvelles normes de construction plus approprié pour faire fonctionner plusieurs antennes. Les nouvelles technologies qui peuvent atteindre une diversité maximale et des performances optimales sont appelées « codage temporel spatial » en appliquant la théorie de l'information au traitement d'antenne.

### **1.5.2 Systèmes multi-antennes en réception**

L'exploitation de plusieurs antennes en réception permet de lutter contre les évanouissements temporels en utilisant la diversité spatiale, qui a été expérimentée dès 1927. Plusieurs types de combinaisons des différentes versions des signaux à la réception existent tels que la combinaison à gain égal, la sélection du maximum de puissance et la combinaison à gain maximal. Les trois méthodes classiques de diversité pour le système multi-antennes permettent de réduire la variation des évanouissements et aussi d'accroître le rapport signal sur bruit. L'amélioration de la qualité de la liaison dépend beaucoup du rapport entre les caractéristiques du canal et celles de la diversité utilisée.

## 1.6 Généralité de diversité

La puissance d'un signal RF transmise entre deux antennes est atténuée à travers l'espace ce qui peut affecter considérablement les performances en réception. Cette atténuation de la puissance entre l'émetteur et le récepteur est due à plusieurs phénomènes parmi lesquels :

- *Le « slow fading »* ou l'affaiblissement lent dû au parcours, il caractérise l'affaiblissement que subit une onde lorsqu'elle parcourt la distance entre l'émetteur et le récepteur. Qui est dû également aux obstacles rencontrés sur le chemin (immeubles, montagnes, ...).
- *Le « fast fading »* ou l'évanouissement rapide qui est une atténuation qui varie d'une façon irrégulière entre une valeur maximale et minimale. L'utilisateur se déplace dans des zones avec des obstacles de tailles diverses qui peuvent complètement atténuer le signal comme les immeubles, les tunnels ...etc.
- *Le « Rayleigh fading »* ou l'évanouissement de Rayleigh qui entraîne des variations irrégulières et imprévisibles du signal, qui sont très difficiles à prendre en compte. Différentes versions du même signal présentant différentes phases et amplitudes peuvent arriver au niveau du récepteur avec un effet cumulatif ou soustractif après avoir suivi divers trajets. Il est surtout présent en zones urbaines.

Les signaux émis subissent plusieurs phénomènes pendant leur transmission, qui provoquent leur évanouissement à petite ou à grande échelle. Pour bénéficier efficacement des effets multi-trajets, une autre solution généralement utilisée est la *technique de diversité*. La diversité se révèle donc être un outil très puissant pour combattre les évanouissements et les interférences entre canaux de transmission. Cette dernière consiste à répéter l'envoi d'un même message à travers plusieurs trajets différents dont les statistiques d'évanouissements sont indépendantes. [9]

### 1.6.1 Notions de diversité

La diversité est une technique utilisée pour éliminer l'évanouissement causé par les trajets multiples, son principe est de transmettre plusieurs copies de la même information sur plusieurs canaux avec puissance comparable et évanouissement indépendant, donc à la réception il y aurait au moins un ou plusieurs signaux non atténués, et bien sûr sans négliger la probabilité d'avoir une transmission de faible qualité. Il existe deux principales catégories de diversité : explicite et implicite.

1. La première transmettant d'une manière ou d'une autre plusieurs répliques du même message.
2. La deuxième envoyant une copie, mais à compter sur des concepts tel que multi trajets pour dupliquer le signal envoyé.

A la réception, il y a plusieurs antennes, ce qui implique la nécessité d'avoir une combinaison des signaux reçus [10]. La figure 1.5 illustre un cas simple où le récepteur dispose de deux antennes. Par combinaison des deux signaux, selon la sélection du meilleur SNR, l'évanouissement peut être réduit par rapport à un signal reçu par une seule antenne.

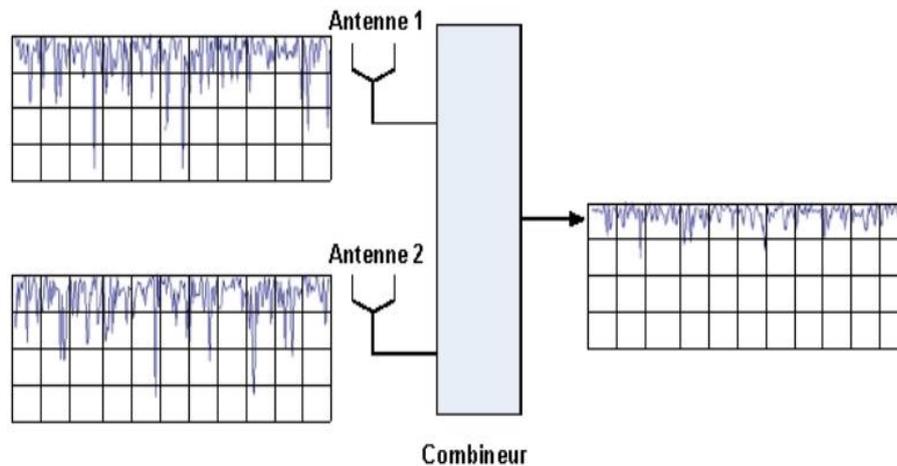


Figure 1.8 : Principe de la diversité

## 1.6.2 Types de diversité

Il existe plusieurs techniques de diversité, mais voici les principales techniques :

### 1.6.2.1 Diversité de polarisation

On parle de diversité de polarisation quand le même signal est émis et reçu simultanément sur des ondes polarisées orthogonalement et dont les caractéristiques de propagation sont indépendantes. Contrairement à la diversité spatiale, il n'y a pas de contrainte sur l'écartement relatif des antennes, et une diversité d'ordre 2 peut ainsi être facilement obtenue en utilisant une paire d'antennes de polarisations orthogonales. [11]

### 1.6.2.2 Diversité spatiale

La diversité spatiale est obtenue en utilisant plusieurs antennes pour émettre un signal ou des versions redondantes ou/et plusieurs antennes pour recevoir les différents signaux. Il s'agit d'avoir des trajets à évanouissement indépendants, et pour ce faire, les antennes ne doivent pas être trop proches pour que les signaux ne soient pas corrélés.

Une distance de cohérence est déterminée et permet d'assurer la diversité spatiale. Celle-ci est liée à la hauteur de l'antenne d'une station de base. [12]

### 1.6.2.3 Diversité temporelle

Elle est utilisée pour combattre l'évanouissement sélectif en temps, elle consiste à émettre plusieurs répliques du signal (ou des versions redondantes) dans des intervalles temporels séparés d'au moins le temps de cohérence du canal  $T_c$  (Figure 1.9). Le récepteur aura plusieurs signaux à évanouissements indépendants. Comme le canal de propagation est variable dans le temps, les différents signaux sont reçus à des instants différents et sont ainsi décorrélés. [13]

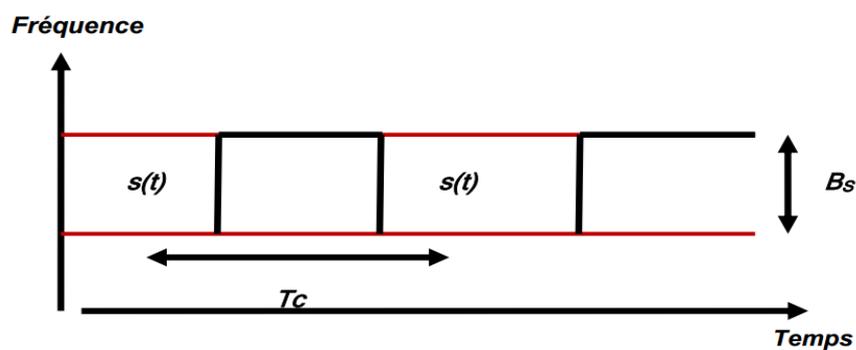


Figure 1.9 : Diversité temporelle

Où :

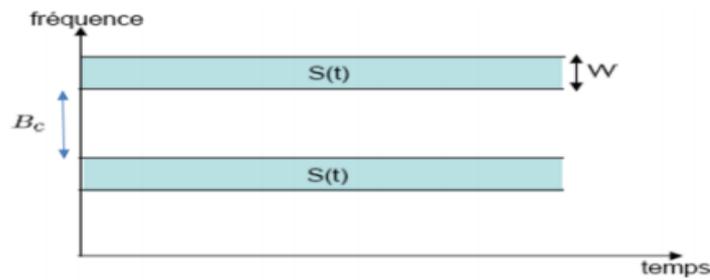
$s(t)$  : est le signal transmis sur plusieurs intervalles temporels.

$T_c$  : est le temps de cohérence du canal.

$B_S$  : est la largeur de bande du signal.

### 1.6.2.4 Diversité fréquentielle

Dans la diversité fréquentielle, le même signal est transmis avec différentes fréquences. C'est une technique qui est adéquate dans le cas où le canal est sélectif en fréquence. Pour faire une bonne diversité, il faut s'assurer que la différence entre les fréquences utilisées est supérieure à la bande de cohérence du canal  $B_C$  (Figure 1.10) [14]. Ce mécanisme est rarement mis œuvre pour des raisons d'efficacité fréquentielle. Les solutions utilisées à la place sont l'étalement du signal sur une large bande de fréquence pour lutter contre l'évanouissement, les sauts de fréquence, les modulations multi porteuses. [15]



**Figure 1.10** : Diversité fréquentielle

Où :

$S(t)$  : est le signal transmis sur plusieurs intervalles fréquentiels.

$B_c$  : est la largeur de bande de cohérence du canal.

$W$  : est la largeur de bande du signal.

La diversité fréquentielle peut être exploitée par l'utilisation d'une modulation multi-porteuse, conjointement avec un entrelaceur et un codage correcteur d'erreur. Les techniques d'étalement de spectre sont parfois considérées comme une source potentielle de diversité fréquentielle. Cette technique utilise une séquence pseudo aléatoire pour élargir le spectre du signal, autorisant ainsi une bonne résistance aux perturbations et une grande discrétion de transmission. Elles ont d'ailleurs été initialement développées pour des applications militaires. L'étalement de spectre par séquence directe et l'étalement par sauts de fréquence sont les plus répandus. [16]

#### 1.6.2.5 Diversité angulaire

On peut faire une rotation du diagramme de rayonnement de deux antennes similaires du système tout en étant étroitement espacées pour permettre aux signaux d'être captés sous différents angles et différentes directions. [17]

Dans la diversité angulaire, les faisceaux ne doivent pas se chevaucher considérablement pour obtenir une faible corrélation.

#### 1.6.2.6 Diversité de diagramme

En utilisant deux antennes ayant des diagrammes de rayonnement différents, les signaux arrivent à ces antennes de directions différentes et donc sont probablement indépendants. La diversité en diagramme est généralement combinée avec la diversité spatiale [18]. Par exemple, elle se fait dans les terminaux mobiles lorsque deux antennes omnidirectionnelles sont étroitement espacées et interagissent entre elles en raison de

l'effet de couplage mutuel. Les antennes agissent comme des éléments parasites les unes par rapport aux autres et modifient leurs configurations pour permettre aux signaux d'être captés depuis différentes directions. Ainsi, ce concept de diversité permet un espacement d'antenne beaucoup plus petit et fournit de multiples diagrammes d'antennes tout en conservant de faibles corrélations. Cependant, la diversité des diagrammes se fait au détriment de l'efficacité des antennes à cause du couplage mutuel. [19]

#### **1.6.2.7 Diversité de parcours**

C'est une technique implicite, utilisée lorsque la largeur de bande du signal est plus grande que la largeur de bande cohérente du canal. Le récepteur profite de la présence de plusieurs versions du signal pour obtenir un gain en diversité.

#### **1.6.2.8 Diversité spatio-temporelle**

C'est une combinaison de deux techniques de diversité, elle permet d'envoyer deux versions du signal différées dans le temps via deux antennes transmettrices.

#### **1.6.2.9 Diversité transformée**

Cette technique est utilisée lorsque le canal n'est pas connu au transmetteur, le problème est alors renvoyé au processus de combinaison qui devrait avoir connaissance du canal. Dans ce type, la diversité spatiale est convertie en diversité temporelle ou fréquentielle avec un codage à l'émission.

### **1.7 Les techniques de combinaisons de signaux**

La réception de plusieurs répliques du même signal nécessite une technique de combinaison pour obtenir la meilleure représentation du signal envoyé.

Lorsqu'un récepteur reçoit plusieurs répliques du signal, il est alors nécessaire d'utiliser une technique de recombinaison pour retrouver la meilleure représentation du signal d'origine. Cela permet de limiter les évanouissements. [20]

Il y a quatre méthodes de combinaison en diversité :

- a) La combinaison par sélection de signal.
- b) La combinaison par commutation de signal.
- c) La combinaison de signaux par gain égal (EGC : Equal Gain Combining).

- d) La combinaison de signaux par rapport maximal (MRC : Maximum Ratio Combining).

Ces méthodes de combinaison peuvent être regroupées en deux catégories [21] :

- A. La diversité par sélection (sélection et switch)
- B. La diversité par combinaison (EGC et MRC).

Le digramme de la Figure 1.11 illustre ces quatre types de combinaison. Grâce à ces différentes techniques, nous pouvons combiner les signaux pour obtenir un signal sans évanouissement.

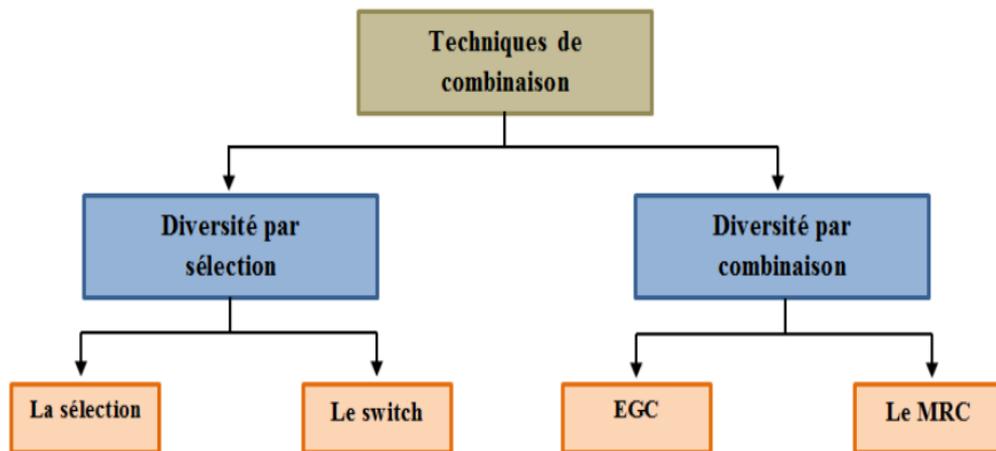


Figure 1.11 : Les différentes techniques de combinaison.

### 1.7.1 Combinaison par sélection (SC)

La combinaison par sélection est similaire à celle de la technique par commutation, excepté que les N récepteurs radios sont requis [22]. Le principe de la technique de combinaison par sélection est basé sur le choix du signal ayant la puissance maximale ou ayant le meilleur SNR. Donc, la branche avec le SNR de sortie le plus élevé, à chaque instant, est sélectionnée comme signal de sortie actif (Comme illustré à la Figure 1.12).

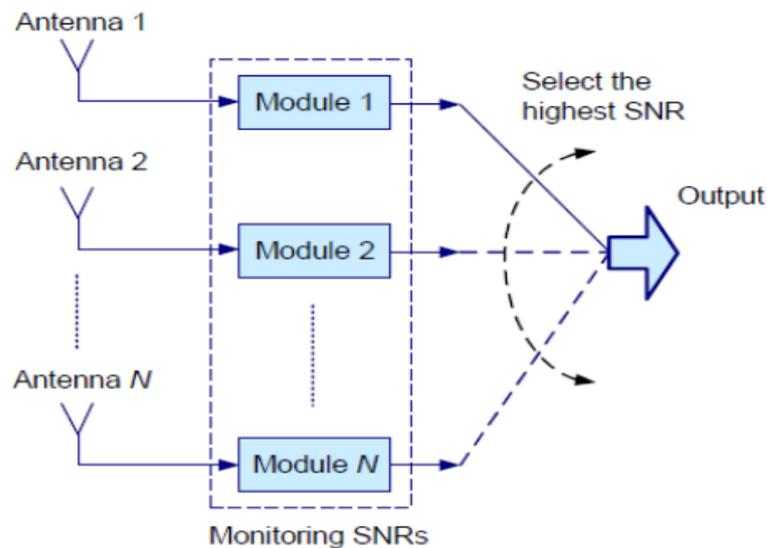


Figure 1.12 : Combinaison par sélection (SC)

### 1.7.2 Combinaison par commutation

La technique de combinaison par commutation ne nécessite qu'un seul récepteur radio entre les  $N$  branches comme illustré à la Figure 1.13, alors que les autres techniques utilisent  $N$  récepteurs radios (un pour chaque branche) pour contrôler les signaux instantanés.

A chaque instant, une branche ayant un signal supérieur au seuil fixé est sélectionnée. Mais dès que le signal est inférieur au seuil, alors il y a commutation sur une autre branche. Le récepteur est commuté sur une autre branche uniquement lorsque le SNR sur la branche en cours est inférieur à un seuil prédéfini. Ce seuil dépend du domaine d'utilisation de la diversité et peut être fixé par les fabricants. Due à la taille limitée du terminal mobile, la technique de combinaison par commutation est la technique qui est actuellement implémentée dans la plupart des terminaux utilisant la diversité d'antennes. [23]

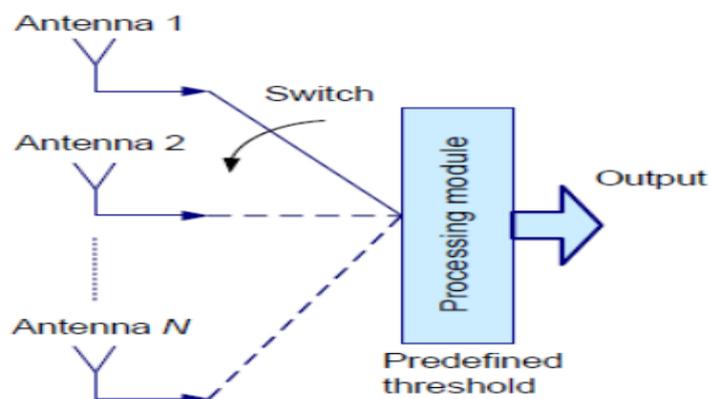


Figure 1.13 : Combinaison par commutation

### 1.7.3 Combinaison par gain égal (EGC)

Étant donné que les techniques de combinaison par commutation et par sélection utilisent uniquement le signal provenant de l'une des branches comme signal de sortie à un instant donné, l'énergie du signal dans les autres branches est perdue. Les signaux de toutes les branches peuvent cependant être combinés. Si cela est fait directement en utilisant les signaux complexes, leurs composantes réelles et imaginaires aléatoires se combineront de manière incohérente. Pour obtenir une diversité efficace et la plus grande puissance de signal de sortie disponible, les signaux doivent être mis en phase afin qu'ils soient cohérents. Chaque signal doit donc être multiplié par un co-phaseur pour que les signaux ne soient plus déphasés comme illustré à la Figure 1.14.

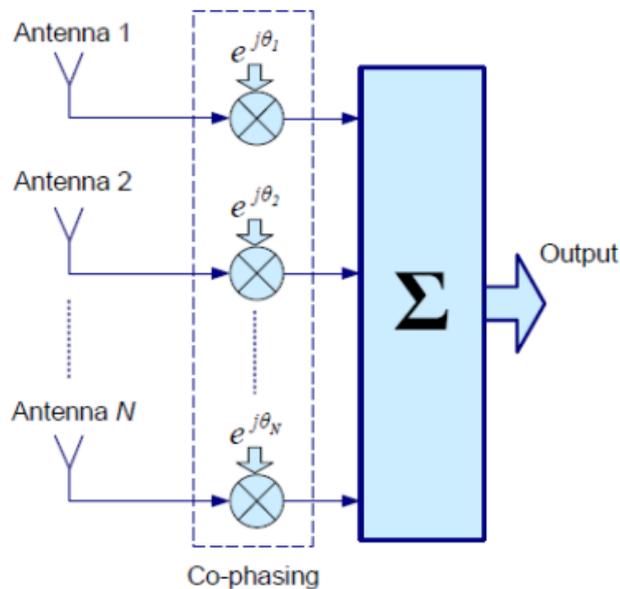


Figure 1.14 : Combinaison par gain égal (EGC)

### 1.7.4 Combinaison par rapport maximal (MRC)

Dans la technique MRC, un coefficient de pondération  $w_i$  est appliqué sur chaque branche avant que tous les signaux ne soient combinés, comme le montre la Figure 1.15. Ainsi pour maximiser le signal à la sortie du combineur, une branche avec un SNR élevé, donnera un coefficient de pondération élevé ce qui permettra de choisir les signaux à combiner. Afin de maximiser le rapport signal/bruit à la sortie, une pondération est appliquée à chaque branche avant que tous les signaux soient combinés de manière cohérente.

L'inconvénient majeur de la technique par EGC est que si l'une des branches a un signal très faible, cela peut entraîner une réduction du signal combiné à la sortie.

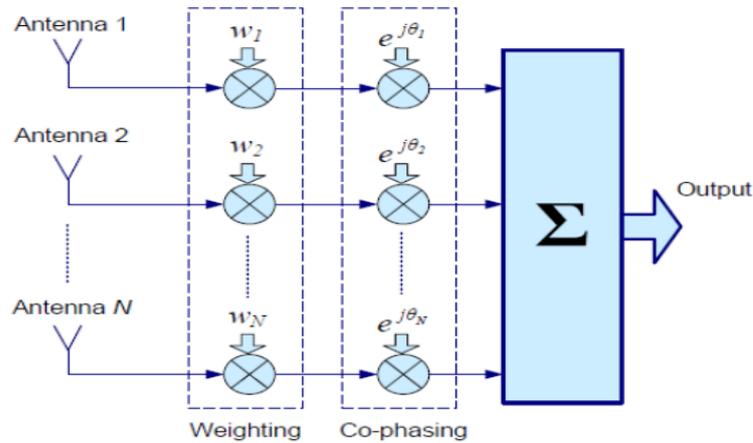


Figure 1.15 : Combinaison par rapport maximal (MRC)

## 1.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons identifié l'antenne et ses principaux paramètres dans le système radiofréquence. Certains de ces paramètres sont des objectifs que nous devons atteindre pour concevoir nos antennes. De nos jours, nous voyons également de plus en plus d'appareils sans fil multistandard, en particulier avec le développement de technologies telles que 4G, LTE, 5G. Ces antennes multi bandes nécessitent une bonne couverture pour de nombreuses fréquences de fonctionnement.

Nous avons vu que pour lutter contre la décoloration à laquelle le signal peut être exposé dans un environnement à trajets multiples, il est préférable d'utiliser différentes technologies ou un système multi-antennes. Ainsi, pour lutter contre les évanouissements, les solutions les plus efficaces restent les techniques de diversité, qu'elles soient temporaires, spatiales voire fréquentielle. Par conséquent, un paragraphe leur a été attribué, ainsi que des techniques plurielles. Nous avons vu que la performance en diversité pour éviter le phénomène d'évanouissements due à la multiplicité des pistes et à l'amélioration de la capacité du canal.

Dans le chapitre II, nous allons voir l'architecture des systèmes MIMO et MMIMO, en étudiant la capacité du canal, ainsi les différents types de codage, multiplexage et les techniques de réception employées pour traiter les signaux reçus.

## Chapitre 2

# Étude des technologies MIMO et Massive MIMO

### 2.1 Introduction

Avec la croissance rapide de l'utilisation des systèmes de communication sans fil, la plupart des recherches dans ce domaine se sont concentrées sur le déploiement de nouvelles technologies pour rendre les réseaux sans fil plus efficaces. La conception de nouvelles générations de réseaux sans fil se heurte toujours au problème de limiter la capacité imposée par une bande passante étroite et une capacité de transmission souvent limitée. Afin de surmonter ces obstacles, une nouvelle technologie appelée MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) tente de tirer parti de la dimension spatiale, en installant plusieurs antennes au niveau des émetteurs et/ou récepteurs.

Ainsi, l'utilisation de cette technologie permet une augmentation significative des vitesses de liaison de transmission (tout en conservant la même bande passante et la même capacité). La technologie MIMO et MMIMO (Massive MIMO) est l'une des nouvelles technologies les plus innovantes du monde sans fil.

Aussi MIMO massive, cette technologie émergente se présente comme l'une des méthodes les plus prometteuses pour les systèmes 5G révolutionnaires pour les réseaux mobiles et l'Internet des objets (IoT, de Internet of Things).

Dans ce chapitre, nous présentons une description de la technologie MIMO et son évolution MMIMO ; ainsi que les différentes catégories des deux systèmes.

### 2.2 Présentation des systèmes MIMO

Les systèmes MIMO sont l'un des principaux axes de développement pour augmenter les débits des communications sans fil. Leur particularité réside dans l'utilisation simultanée de plusieurs antennes, émettrices et réceptrices. D'autant plus, ces systèmes permettent d'améliorer les performances des appareils et permettent d'atteindre à la fois de très hautes efficacités spectrales et de lutter efficacement contre les évanouissements du signal. L'idée générale est de tirer profit de la dimension spatiale du canal et d'exploiter les trajets multiples plutôt que de les supprimer. [24]

## 2.3 Principe de la technologie MIMO

Dans les systèmes de communications traditionnels SISO (Single Input Single Output), il n'existe qu'une antenne à l'émission et une antenne à la réception. Or les futurs services de communications mobiles sans fils demandent plus de transmissions de données (augmentation de la capacité de transmission). Ainsi pour augmenter la capacité des systèmes SISO et satisfaire ces demandes, les bandes passantes de ces systèmes et les puissances à transmettre ont été largement augmentées. Mais les récents développements ont montré que l'utilisation de plusieurs antennes à l'émission et à la réception permettait d'augmenter le débit de transmission des données et cela sans augmenter ni la bande passante de l'antenne réceptrice du système SISO, ni la puissance du signal à l'émission. Cette technique de transmission s'appelle MIMO (voir Figure 2.1). Un système MIMO tire profit de l'environnement multi-trajets en utilisant les différents canaux de propagation créés par réflexion et/ou par diffraction des ondes pour augmenter la capacité de transmission. D'où l'intérêt aussi d'obtenir des signaux indépendants sur les antennes.

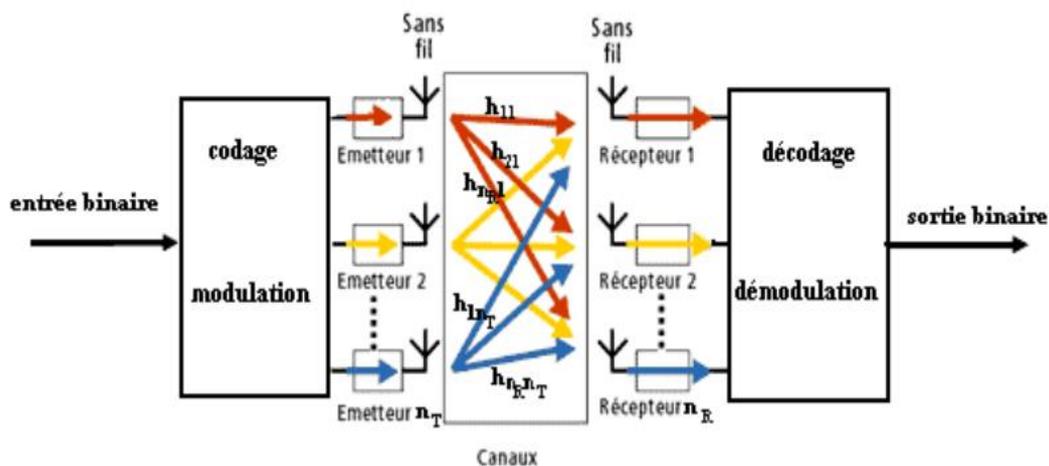


Figure 2.1 : Principe de la technologie MIMO.

## 2.4 Les différents types de codage MIMO

Dans un système MIMO, il existe plusieurs méthodes pour effectuer le codage des signaux :

### 2.4.1 Le multiplexage par répartition de fréquence orthogonale (OFDM)

La technique de multiplexage OFDM (d'Orthogonal frequency Division Multiplexing) consiste à diviser sur un grand nombre de porteuses, le signal numérique que nous souhaitons transmettre (comme si nous combinons le signal à transmettre sur des émetteurs indépendants et à des fréquences différentes). Pour que les fréquences des

porteuses soient les plus proches possibles et ainsi transmettre le maximum d'information sur une portion de fréquences donnée, l'OFDM utilise des porteuses orthogonales entre elles. Les signaux des différentes porteuses se chevauchent mais grâce à l'orthogonalité, ils n'interfèrent pas entre eux. Ainsi, dans un environnement multi-trajets où certaines fréquences seront détruites à cause des perturbations, le système sera tout de même capable de récupérer l'information perdue sur d'autres fréquences porteuses qui n'auront pas été détruites. [25]

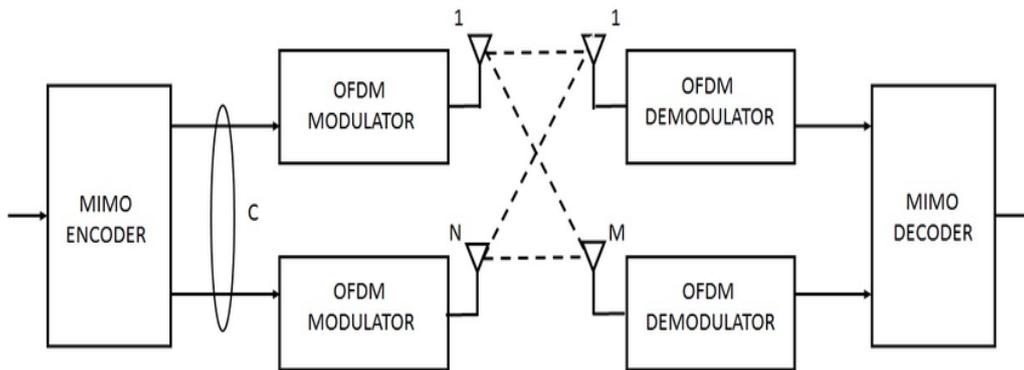


Figure 2.2 : Model du système MIMO-OFDM

#### 2.4.2 Le multiplexage par division spatiale (SDM)

La méthode de multiplexage (SDM, de Spatial Division Multiplexing) au cours duquel plusieurs flux de données indépendants sont simultanément multiplexés dans un canal spectral. Le multiplexage SDM peut améliorer le débit de façon significative, car le nombre de données spatiales résolues est plus important. Chaque flux spatial doit disposer de sa propre paire d'antennes de transmission/réception à chaque extrémité du lien radio. Il est important de noter qu'une chaîne de radio-fréquences RF et qu'un convertisseur analogique-numérique distincts sont nécessaires pour chaque antenne du système MIMO. Les configurations qui nécessitent plus de deux chaînes d'antennes RF doivent être conçues avec attention pour maintenir des coûts peu élevés tout en répondant aux attentes en matière de performances. [26]

#### 2.4.3 Le codage spatio-temporel par bloc (STBC)

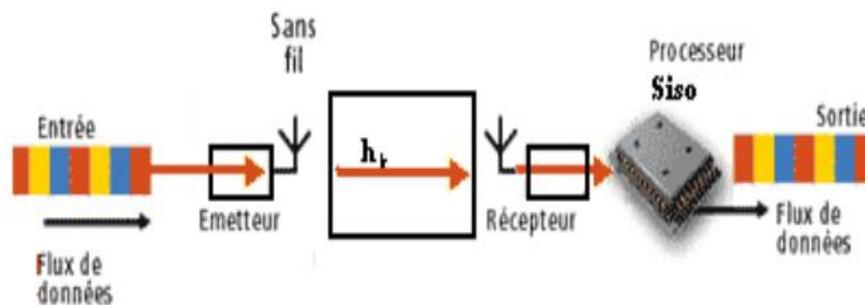
Cette technique (STBC, de Space-Time Bloc Code) tout comme le SDM permet d'envoyer des signaux différents sur chaque antenne. Le principe du STBC est d'introduire une redondance d'information entre les deux antennes. Le canal STBC comprend  $M \times N$  sous canaux. Chaque sous canal est un canal à évanouissements indépendants ; ce qui fait que le STBC augmente la diversité du canal de transmission

et donc la robustesse du récepteur. Cette méthode est très attractive car elle n'exige pas la connaissance de l'état du canal (CSI) même si cela peut réduire la capacité de transmission des données [27]. Le gain de diversité résultant améliore la fiabilité des liaisons sans fil à évanouissements et améliore la qualité de la transmission. Il est à noter que ce type de codage n'améliore pas la capacité de transmission linéairement avec le nombre d'éléments utilisés. Ainsi pour améliorer à la fois la capacité et la qualité, un système MIMO doit être implémenté avec les deux types de codages à savoir le SDM et le STBC. [28]

## 2.5 Types des systèmes MIMO

### 2.5.1. Système SISO (Single Input Single Output)

Un système SISO est un système possédant une seule entrée et une seule sortie. Ce sont les systèmes les plus simples (Figure 2.3), ils sont qualifiés aussi de mono\_variables. [29-30]



**Figure 2.3 :** Système SISO

La capacité du canal SISO est donner par :

$$C = W \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{P}{N_0 W} \right) [bit/s] \quad (2.1)$$

Où :

**P** : la puissance du signal utile en Watt,

**N<sub>0</sub>** : la densité spectrale de puissance du bruit calculé en W/Hz,

**W** : la bande passante donnée en Hz.

En normalisant la capacité par la bande utile **W**, on obtient :

$$C = (1 + \rho) [bit/s] \quad (2.2)$$

Avec  $\rho$  est le rapport signal sur bruit (SNR).

### 2.5.2 Système MISO (Multiple Input Single Output)

C'est une technique de diversité spatiale en émission ; c'est-à-dire plusieurs antennes émettent des signaux qui sont interceptés par une seule antenne en réception (Figure 2.4). [29-30]

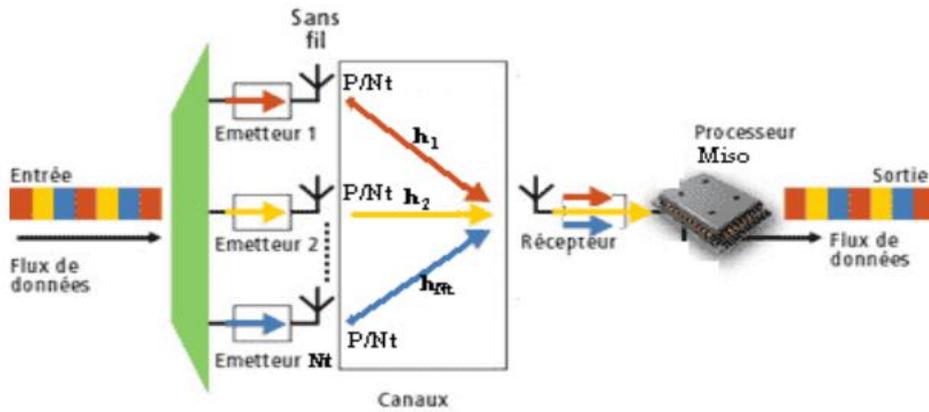


Figure 2.4 : Système MISO

Dans ce mode de transmission, une superposition du signal transmis simultanément par les  $N_t$  antennes émettrices est reçue. Chaque antenne émet le même symbole d'énergie ( $E_s/N_t$ ). C'est-à-dire que la puissance émise est divisée sur le nombre d'antenne telle que :

$$P = \sum_{i=1}^{N_t} P_i \quad (2.3)$$

Avec  $P_i$  est la puissance émise sur chaque antenne. Si cette puissance est égale sur toutes les antennes, alors on dira que :  $P = N_t \cdot P_i$ .

La capacité du canal MISO :

$$C = W \cdot \log_2 \left( 1 + N_t \frac{P_i}{N_0 W} \right) = W \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{P}{N_0 W} \right) [bit/s] \quad (2.4)$$

En normalisant la capacité par la bande utile  $W$ , on obtient :

$$C = \log_2 (1 + \rho) [bit/s] \quad (2.5)$$

L'avantage de la technique MISO par rapport à la technique SISO est dans le fait que dans les multi trajets ; la probabilité d'évanouissement dans  $N_t$  antennes est inférieure à la probabilité d'évanouissement sur une seule antenne.

### 2.5.3 Système SIMO (Single Input Multiple Output)

C'est une technique qui utilise plusieurs antennes en réception pour lutter contre l'évanouissement dû au canal [29-30]. Le signal reçu est additionné et le rapport signal sur bruit total est la somme des rapports signaux sur bruits de chacun des antennes de la réception (voir figure 2.5).

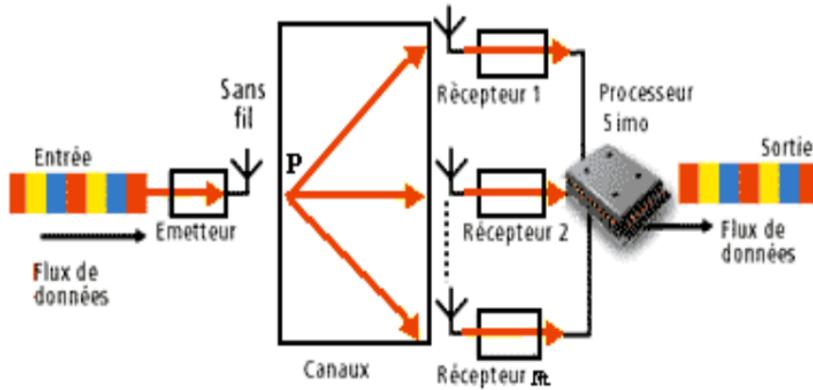


Figure 2.5: Système SIMO

La capacité du canal SIMO :

$$C = W \cdot \log_2 \left( 1 + N_r^2 \frac{P}{N_0 W} \right) \text{ [bit/s]} \quad (2.6)$$

$N_r$  : le nombre d'antenne réceptrice.

En normalisant la capacité par la bande utile  $W$ , nous obtenons :

$$C = \log_2 ( 1 + N_r^2 \rho ) \text{ [bit/s]} \quad (2.7)$$

Avec  $\rho$  est le rapport signal sur bruit.

### 2.5.4 Système MIMO (Multiple Input Multiple Output)

La technologie MIMO permet d'augmenter le débit linéairement avec le nombre d'antenne à la réception et de contrer l'évanouissement du canal. Ainsi, elle permet de minimiser la probabilité d'évanouissement et d'atténuation du signal. La différence entre un système MISO et un système MIMO est que ; le MISO envoie les mêmes paquets aux antennes qui émettent à la même fréquence. Tandis que, le MIMO envoie des paquets différents aux antennes qui émettent à la même fréquence (Figure 2.6). [29-30]

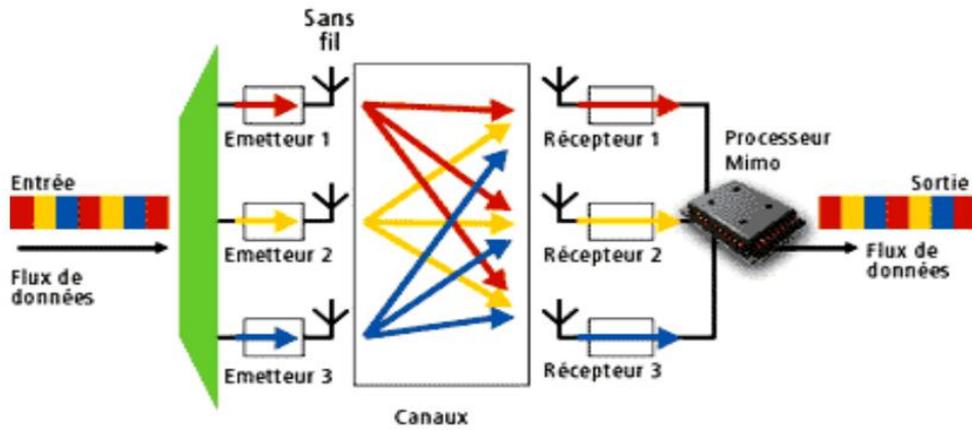


Figure 2.6 : Système MIMO

## 2.6 Modèle d'un canal MIMO

Considérons un système MIMO avec  $N_t$  émetteurs et  $N_r$  récepteurs (figure 2.7). On suppose ici, que le canal de transmission est non-sélectif en temps et en fréquence, ainsi le trajet entre la  $m^{ième}$  antenne émettrice et la  $n^{ième}$  antenne réceptrice est représenté par le coefficient d'atténuation complexe  $h_{nm}$ .

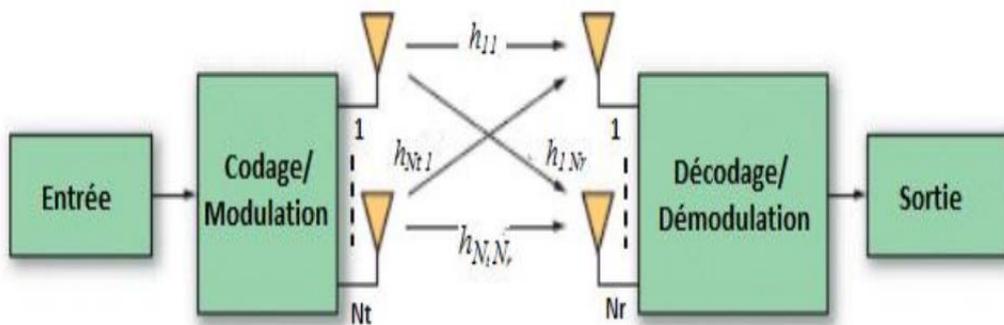


Figure 2.7 : Schéma d'un système de transmission MIMO.

On appelle  $S_m(k)$  le signal transmis sur la  $m^{ième}$  antenne à l'instant  $k$ , le symbole reçu sur la  $n^{ième}$  antenne s'écrit alors :

$$y_n(k) = \sum_{m=1}^{N_t} h_{nm} S_m(k) + b_n(k) \quad (2.8)$$

Où  $b_n$  représente un bruit additif.

En considérant l'ensemble des signaux reçus simultanément, cette relation peut s'écrire sous forme matricielle de dimension  $N_t \times N_r$  par :

$$y(k) = HS_{(k)} + b_{(k)} \quad (2.9)$$

Avec :

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1N_t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r1} & \cdots & h_{N_rN_t} \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

Et :

$$y = (y_1 \dots y_{N_r})^T$$

Par la suite on supposera que :

- Les symboles transmis sont de puissance unitaire.
- Le bruit additif est blanc, gaussien, de moyenne nulle et de variance  $\sigma^2$ .
- Le bruit et les symboles sont décorrélés, c'est-à-dire [31] :

$$E[ss^H] = I_{N_t}, \quad E[sb^H] = 0$$

### 2.6.1 Capacité d'un canal MIMO

Pour un canal MIMO (Figure 2.8), avec  $M$  antennes émettrices et  $N$  antennes réceptrices,

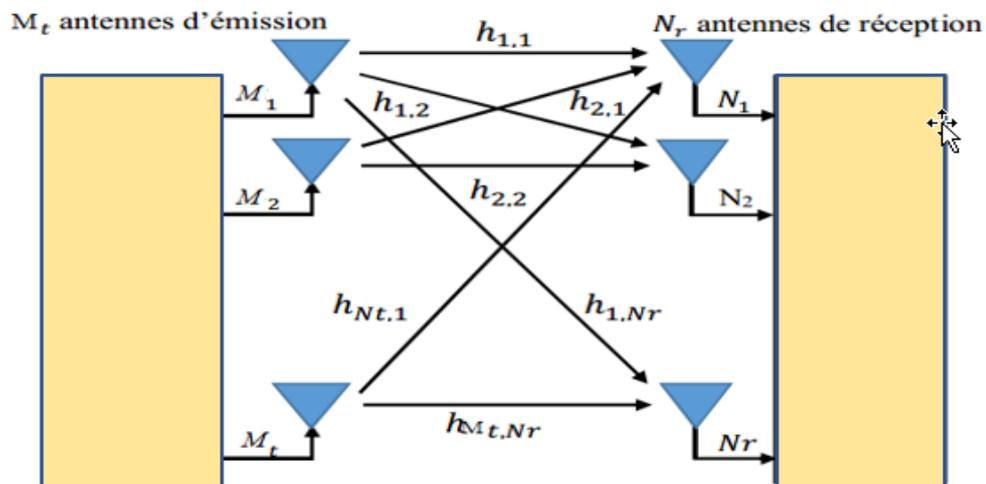


Figure 2.8 : Canal MIMO

Les trajets multiples se traduisent par un gain complexe du canal. Celui-ci est noté  $h_{ij}$  pour un trajet entre l'antenne d'émission  $i$  et l'antenne de réception  $j$ .

La matrice complexe  $H$  du canal représentant les trajets à évanouissement peut s'écrire selon l'équation (2.10).

La capacité d'un système MIMO peut s'écrire :

$$C = \log_2 \left( \det \left[ I_N + \frac{\rho}{M} HH^* \right] \right) \quad [\text{bit/s/Hz}] \quad (2.11)$$

$I_N$  : est la matrice identité de dimension  $N$ . La matrice du canal est considérée normalisée c'est-à-dire que les éléments de  $H$  ont une variance unitaire.

$\rho$  : est le SNR (rapport signal/bruit) au niveau du récepteur. Lorsque  $N$  et  $M$  sont grands, l'espérance de la capacité pour un canal de *Rayleigh* croît proportionnellement à  $N$  :

$$E[C] \approx N \log_2(1 + \rho) \quad [\text{bit/s/Hz}] \quad (2.12)$$

## 2.7 Domaines d'utilisation de la technologie MIMO

Les systèmes MIMO sont l'un des principaux axes de développement pour augmenter les débits des communications sans fil.

MIMO est également prévu pour être utilisé dans la radiotéléphonie mobile des normes récentes telles que : 3GPP et 3GPP2. En 3GPP, les normes : accès haute vitesse par paquets plus (HSPA+) et Long Term Evolution (LTE) prennent en compte le MIMO. Par ailleurs, à soutenir pleinement les environnements cellulaires, y compris les consortiums de recherche MIMO IST-MASCOT proposons de développer des techniques avancées MIMO, par exemple, MIMO multi-utilisateurs (MU-MIMO). [32]

Les systèmes : HiperLAN/2, WiFi et les systèmes de la 4<sup>ème</sup> génération tels que l'LTE et le WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) utilisent la technologie MIMO-OFDM, afin d'augmenter le débit de transmission et améliorer sa qualité. [33]

### 2.7.1 La technologie MIMO dans le système WiMAX

Le système WiMAX est le nom de marque de technologie pour l'exécution de la norme IEEE 802.16 indique interface d'air au PHY (couche physique) et à l'IMPER (couche moyenne de contrôle d'accès). Hormis indiquer l'appui de diverses largeurs de bande de canal et modulation et codage adaptatifs.

Les réalisations de WiMAX qui emploient la technologie MIMO sont devenues importantes. L'utilisation de la technologie MIMO améliore la réception et tient compte d'une meilleure extension et taux de transmission. L'exécution de MIMO donne également à WiMAX une augmentation significative d'efficacité spectrale. [34]

## 2.7.2 La technologie MIMO dans le système WiFi

La norme 802.11n est disponible depuis le 11 septembre 2009. Le débit théorique atteint les 300 Mbit/s (débit réel de 100 Mbit/s dans un rayon de 100 mètres) grâce aux technologies MIMO et OFDM. [32]

## 2.8 Algorithmes de réception associés aux systèmes MIMO

La détection est une opération nécessaire pour récupérer le signal émis. Plusieurs techniques de réception sont employées par les systèmes MIMO dont quelques-unes assez générales et d'autres étroitement liées à la technique voire au multiplexage spatial utilisé en émission.

Le récepteur doit envisager des algorithmes de réception (ou égaliseurs) pour récupérer les symboles transmis. Les moins complexes sont les récepteurs linéaires basés sur le critère de forçage à zéro (ZF) ou la minimisation de l'erreur quadratique moyenne (MMSE). Il existe d'autres récepteurs non linéaires, avec des approches différentes, pour estimer les symboles émis dans les systèmes MIMO appelée annulations successives d'interférences ordonnées (OSIC) [35-37], et nous aborderons le détecteur optimal basé sur le critère de maximum de vraisemblance (ML).

Dans ce qui suit nous allons présenter quelques récepteurs.

### 2.8.1 L'égaliseur de forçage à zéro (ZF)

Le récepteur linéaire le plus simple est le récepteur basé sur le critère de forçage à zéro, qui inverse tout simplement la matrice de canal tout en supposant que la matrice  $H$  est inversible. Le vecteur de symboles estimé de taille  $n_t \times 1$  est alors donné par la relation :

$$\hat{x} = H^{-1} \cdot y \quad (2.13)$$

Le récepteur ZF sépare ainsi parfaitement les symboles  $(x_i)_{i=1 \dots t}$  transmis dans le même canal [38].

Lorsque  $H$  est mal conditionnée, le récepteur ZF donne des résultats corrects pour des SNR élevés, mais pour de faibles SNR le bruit perturbe fortement les performances. En pratique, si  $H$  n'est pas carrée (i.e. si  $n_t \neq n_r$ ) le récepteur multiplier à gauche par la pseudo-inverse de la matrice de canal pour récupérer tous les symboles. Dans ce cas, le vecteur estimé s'écrit :

$$\hat{x} = H^+ \cdot y = (H^*H)^{-1}H^* \cdot y \quad (2.14)$$

Si un codeur est employé, on peut employer la redondance temporelle et spatiale pour retrouver les données.

### 2.8.2 L'égaliseur minimisant l'erreur quadratique moyenne (MMSE)

Le but du récepteur est de minimiser l'erreur quadratique moyenne due au bruit et aux interférences entre symboles. La solution proposée est :

$$\hat{x} = (H^*H + \frac{n_t}{SNR})^{-1} H^* \cdot y \quad (2.15)$$

Contrairement au ZF, le SNR intervient dans l'estimation des symboles. Grâce à la prise en compte de ce paramètre, ce récepteur améliore les performances pour les faibles SNR. Cependant, le terme  $\frac{n_t}{SNR}$  tend vers zéro à haut SNR et les récepteurs ZF et MMSE deviennent alors équivalents.

### 2.8.3 L'égaliseur à Maximum de Vraisemblance (ML)

La détection ML est optimale dans le sens de la probabilité d'erreur minimale lorsque tous les vecteurs de données sont également susceptibles. Ce type de détecteur exploite pleinement la diversité disponible.

Nous pouvons exprimer le problème de la détection ML, de la figure 2.9, comme la minimisation de la distance métrique Euclidienne carrée à un vecteur cible  $v$  sur un ensemble de recherche discret fini M-dimensionné :

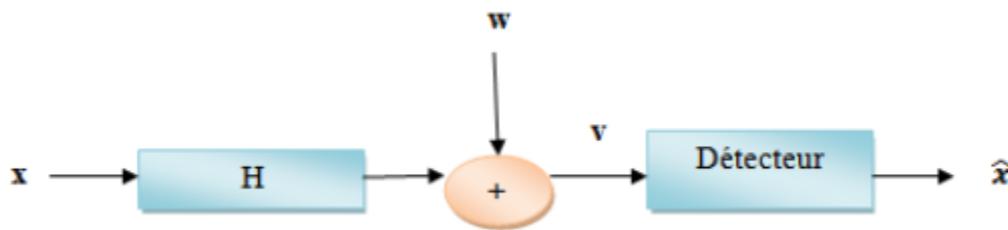


Figure 2.9 : Détection par Maximum de Vraisemblance.

En supposant un bruit gaussien et un état de canal parfaitement connu côté récepteur, le récepteur ML donne les symboles estimés  $\hat{x}$  par la formule suivante :

$$\hat{x} = \underset{x}{\operatorname{arg\,min}} \|y - H_x\|^2 \quad (2.16)$$

La recherche de la distance minimale s'effectue sur tous les mots de code  $x$  possibles. Il est important de noter que, si on note  $M$  la taille de la constellation, le récepteur doit calculer

les distances pour un ensemble de vecteurs possibles de taille  $M$ , et le temps de calcul devient vite prohibitif pour les constellations de grande taille, même pour un faible nombre d'antennes émettrices. [39]

### 2.8.4 L'égaliseur à Annulations Successives d'Interférences Ordonnées (OSIC)

Les techniques de détection précédemment présentées ne sont pas toujours satisfaisantes : la détection ML est optimale, mais très complexe, la détection ZF augmente le niveau de bruit et la détection MMSE ne supprime pas toutes les interférences. Cependant d'autres techniques dites non linéaires qui reposent sur le principe de détection ZF ou MMSE et d'annulation successive (SIC) ou parallèle d'interférences (PIC) existent. Par exemple, C'est dans ce contexte que les laboratoires Bell ont développé l'algorithme Vertical-Bell Laboratories Layered Space-Time (V-BLAST) [40-41]. Les symboles des antennes sont détectés successivement par une technique ZF ou MMSE puis les interférences sont supprimées en utilisant les symboles des antennes déjà détectés.

Son principe est de démoduler le symbole le plus favorisé (possédant le meilleur TEB suivant le critère considéré) en premier. Sa contribution est ensuite estimée puis retranchée du vecteur  $y$ , les RSB des symboles restants sont alors améliorés. Cette étape est répétée jusqu'au dernier symbole, le moins favorisé. Ce récepteur est aussi noté dans la littérature OSIC (Ordered Successive Interference Cancellations).

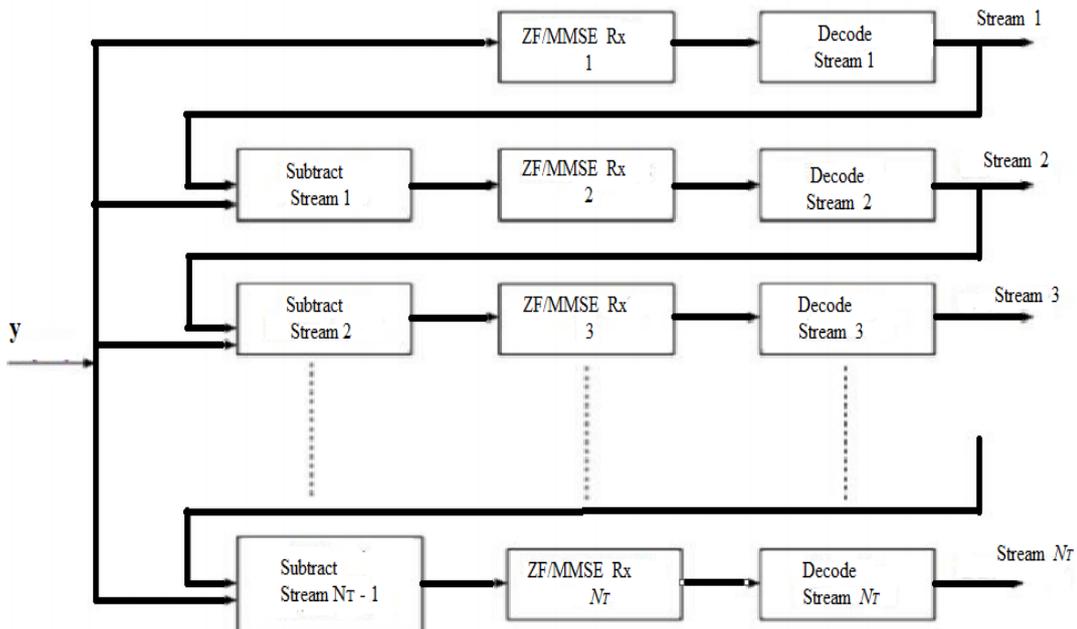


Figure 2.10 : Egaliseur V-BLAST

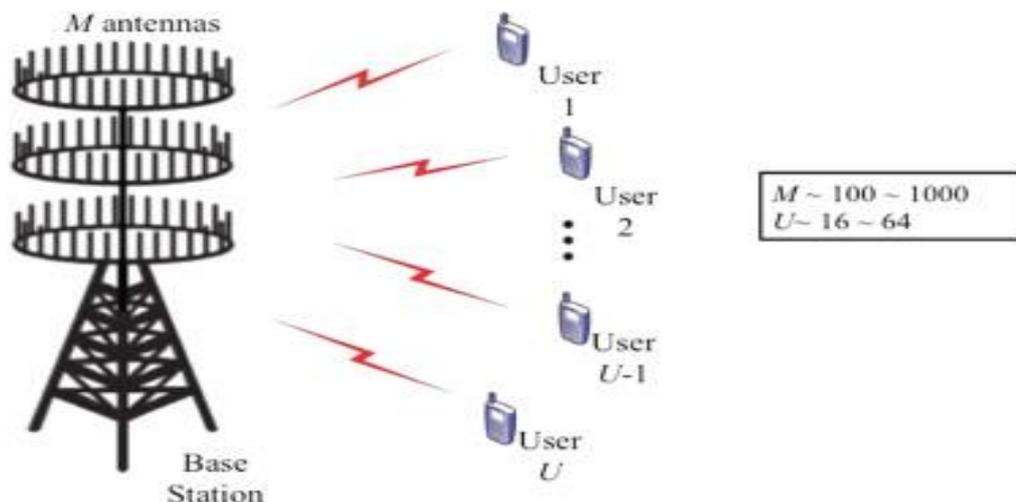
## **2.9 Les avantages de la technologie MIMO**

La technique MIMO présente multiples avantages, nous citons :

- Exploiter les trajets multiples en bénéficiant des avantages de décoloration aléatoire, tel qu'il est connu que la déficience principale à la performance d'un système de communication sans fil s'estompe en raison de trajets multiples et des interférences.
- Augmenter le débit de données du système pour la même puissance rayonnée totale et la même largeur de bande de canal.
- Parvenir à très haute efficacité spectrale et c'est une solution parfaite pour la disponibilité de la bande passante limitée.
- Sauver la consommation électrique du système, car elle augmente la capacité du système et de fiabilité sans consommer un pouvoir excessif.
- Accroître la capacité du système, donc il peut prendre en charge un nombre beaucoup d'utilisateurs.
- Augmenter le système dans l'ensemble comme il peut soutenir des débits élevés.
- Augmenter la qualité de service et les revenus de manière significative.

## **2.10 La technologie Massive MIMO**

Les réseaux MIMO standard utilisent généralement deux ou quatre antennes pour transmettre les données et le même nombre pour les recevoir. La technique Massive MIMO, en revanche, est une technologie multi-utilisateur MIMO qui peut fournir un service uniformément bon aux terminaux sans fil dans les environnements à haute mobilité. Le concept clé est d'équiper les stations de base avec un réseau de nombreuses antennes  $M$ , qui sont utilisées pour servir plusieurs terminaux (multi-user  $U$ ) simultanément. Le mot « massif » fait référence au nombre d'antennes et non à la taille physique, est un système MIMO avec un nombre d'antennes particulièrement élevé. Massive MIMO augmente le nombre d'antennes d'émission (des dizaines ou plus de 100 éléments) sur une station de base comme illustré à la Figure 2.11.



**Figure 2.11** : Une illustration architecture de massive MIMO

Le système Massive MIMO peut être résumé selon un principe : le multiplexage spatial MIMO consiste à utiliser simultanément les mêmes fréquences radioélectriques pour transmettre des signaux différents. Cela signifie que plusieurs antennes d'émission d'une station de base peuvent émettre des signaux différents et que plusieurs antennes de réception d'un appareil peuvent les recevoir et les diviser simultanément.

Le Massive MIMO propose deux innovations majeures :

### 2.10.1 Beamforming (Formation de faisceau)

Est un système de signalisation du trafic pour stations de base cellulaires qui identifie la voie de transmission de données la plus efficace pour un utilisateur particulier et réduit les interférences pour les utilisateurs à proximité. Aux stations de base MMIMO, des algorithmes de traitement du signal tracent le meilleur itinéraire de transmission par voie aérienne vers chaque utilisateur. Il est ainsi possible de créer des lobes constructifs/destructifs et optimiser une transmission entre l'émetteur et la cible. Les techniques de Beamforming permettent à la fois d'étendre une couverture radio (d'une station de base ou d'un point d'accès par exemple) et de limiter les interférences entre utilisateurs et la pollution électromagnétique environnante (en ciblant le récepteur visé). [42]

En résumé, pensez à la technologie MMIMO en tant que structure 3D massive a été introduite comme l'une des technologies habilitantes pour les systèmes cellulaires mobiles de

cinquième génération (5G) et augmentant les capacités de couverture horizontale et verticale.

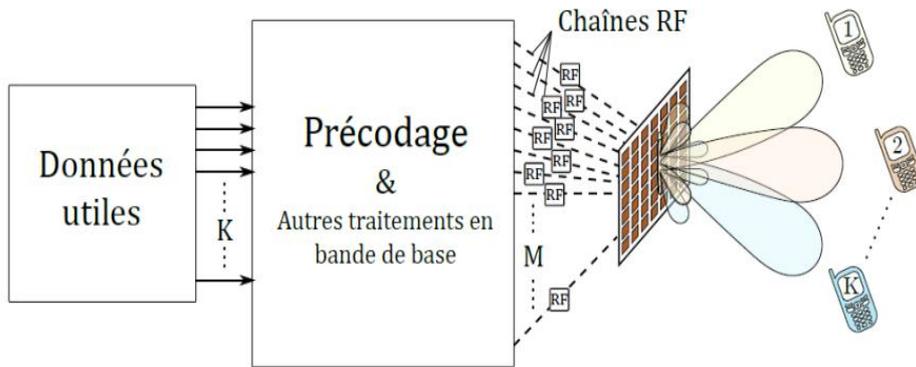


Figure 2.12 : Système MMIMO en transmission multi-utilisateurs [43]

### 2.10.2 Multi-User MIMO (MU-MIMO)

Ce système augmente encore la capacité totale par station de base en permettant la communication avec plusieurs périphériques utilisant les mêmes ressources, créant ainsi un côté périphérique pratiquement unifié. L'utilisation simultanée des antennes de plusieurs périphériques permet de créer des canaux virtuels MIMO à grande échelle. La combinaison de ces deux innovations permet d'augmenter la vitesse de transmission sans fil en augmentant le nombre d'antennes de la station de base sans consommer plus de bande passante ni augmenter les valeurs de modulation. [44]

## 2.11 Caractéristiques de Massive MIMO

Le système MMIMO est une forme de structure MU-MIMO dans laquelle la variété d'antennes de la station de base (BS) et le nombre de terminal utilisateur (UT) sont énormes. Dans le MMIMO, des milliers d'antennes BS desservent simultanément des dizaines, voire des centaines d'utilisateurs, avec les mêmes ressources de fréquence. Certains points essentiels du MMIMO sont :

### 2.11.1 L'évolutivité

La station de base apprend les canaux via un apprentissage de liaison montante, avec opération TDD. Le temps requis pour l'estimation du canal est indépendant du nombre d'antennes BS. Par conséquent, la large gamme d'antennes BS peut être aussi large que souhaité sans extension de la surcharge d'estimation du canal. De plus, le traitement du signal à chaque UT est essentiel et ne dépend pas de l'existence d'autres UT, le traitement du signal par

démultiplexage est effectué au niveau des UT. L'ajout ou la perte de certains UT du service n'a plus d'incidence sur les autres activités des UTs.

### 2.11.2 Massive MIMO préfère Time-Division Duplex (TDD) Schème

En mode Frequency Division Duplex (FDD), l'estimation du canal repose sur le nombre  $M$  d'antennes des stations de base (BS). Par contre, en mode TDD, le temps d'estimation du canal est non biaisé de  $M$ . Dans Massive MIMO,  $M$  est grande, et par conséquent, le fonctionnement TDD est préférable. Par exemple, supposons que l'intervalle de cohérence soit  $T=200$  symboles (correspondant à un temps de cohérence de  $1\text{ ms}$  et à une largeur de bande de cohérence de  $200\text{ kHz}$ ). Ensuite, dans les systèmes FDD, la quantité d'antennes BS et la quantité d'UT sont limitées par  $M + K < 200$ , tandis que dans les systèmes TDD, la contrainte sur  $M$  et  $K$  est  $2K < 200$ . On peut voir sur la figure 2.11 que la zone FDD est beaucoup plus petite que la région TDD. Avec TDD, l'ajout d'antennes supplémentaires n'affecte plus les sources nécessaires à l'acquisition du canal.

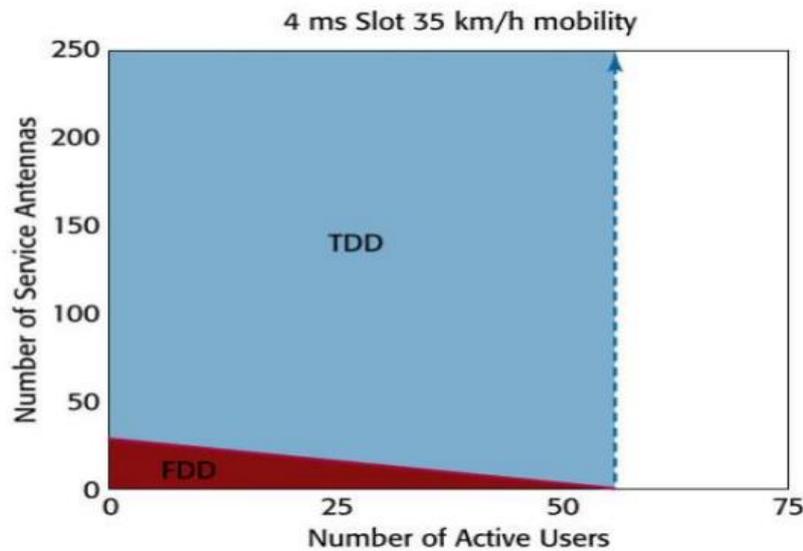


Figure 2.13 : La contrainte de  $M$  et  $K$  sur TDD et FDD pour un système MIMO massive [45]

La Figure 2.13 montre le gain écrasant de TDD sur FDD pour les UT. L'axe vertical correspond au nombre d'antennes BS et l'axe horizontal à la quantité d'UT. L'emplacement bleu clair indique les dimensions de l'équipement des utilisateurs accessibles avec TDD par rapport à la zone rouge beaucoup plus petite pour FDD.

### 2.11.3 Massive MIMO offre une propagation favorable

La propagation favorable, décrite comme une orthogonalité mutuelle entre les canaux vecteurs aux terminaux, est l'un des facteurs clés du canal radio utilisé dans Massive MIMO. Cependant, il y a eu peu de travail sur cette question en détail. Au fur et à mesure que le nombre d'antennes BS utilisées augmente, Massive MIMO tend à avoir une propagation favorable. Cette réalité tient à la réglementation de grands nombres. [46]

### 2.12 Modèle du système MIMO massifs

Dans les systèmes MIMO massifs, un grand nombre d'antennes sont équipées en station de base. Le modèle de système est illustré à la figure 2.14. Le côté gauche présente le processus de liaison montante, tandis que le côté droit est un processus de liaison descendante. On peut voir sur cette image que, lorsque les utilisateurs tentent de communiquer avec la station de base, leur flux de données doit être pré-codé d'abord en fonction des informations d'état de canal obtenues, qui sont estimées par l'envoi de la séquence pilote.

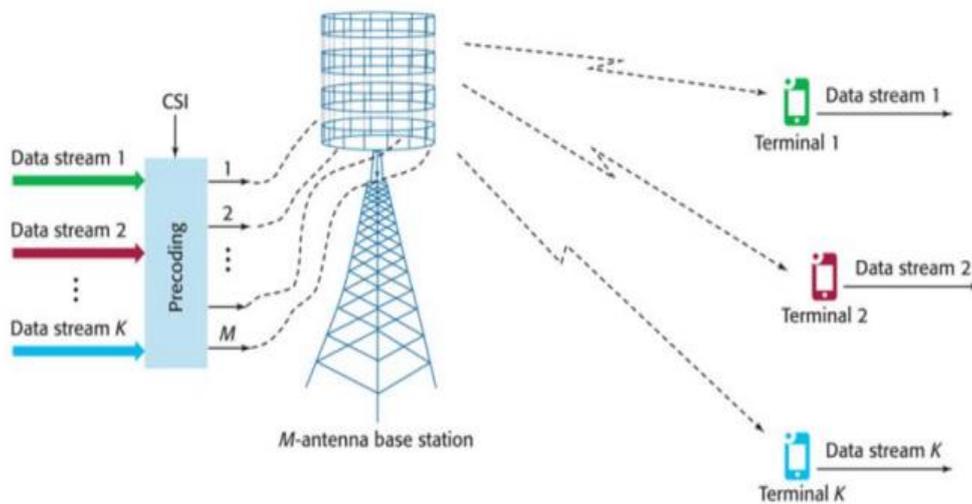


Figure 2.14 : Modèle du système MIMO massif

Sur la base du modèle de système, nous pouvons facilement obtenir un modèle mathématique pour les systèmes MIMO massifs :

$$\bar{y} = \mathbf{W}\mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{W}\mathbf{H}\mathbf{n} \quad (2.17)$$

Où :

$\mathbf{x}$  : est le signal transmis,  $\bar{y}$  est le signal reçu,  $\mathbf{W}$  est la matrice de pré-codage.

$\mathbf{H}$  est une matrice de canaux,  $\mathbf{n}$  est un vecteur de bruit. [47]

## **2.13 Conclusion**

Dans cette partie, nous avons présenté les systèmes MIMO et le principe de la technologie MIMO, en nous concentrant sur différents types de codage et différents types d'antennes MIMO. Cette technologie MIMO est basée sur l'utilisation combinée de réseaux d'antennes à l'émission et à la réception, elle améliore la vitesse de la liaison sans fil sans augmenter la force de transmission et la bande de fréquences assignée. Les systèmes MIMO peuvent être utilisés dans ce cas pour améliorer la vitesse de transmission et ainsi permettre au réseau de desservir plus de clients tout en respectant la qualité de service requise par les applications clients. Nous avons examiné divers systèmes multi-antennes SISO, SIMO, MISO et MIMO et donné les capacités correspondantes. Nous avons également fourni un aperçu de la technologie MIMO et de différents types des techniques de pré-codage linéaire.

Cette technologie est devenue essentielle pour les systèmes de communication WLAN, LTE et 5G. Elle a la capacité d'augmenter le débit du canal, l'efficacité spectrale et la durabilité contre la décoloration et les interférences du signal. Contrairement à SISO, l'utilisation de la technologie MIMO peut augmenter considérablement la capacité de liaison des systèmes WLAN, LTE et 5G. [43]

## Chapitre 3

### Etude des performances d'un système MIMO

#### Simulation et résultats

##### 3.1 Introduction

Avant de concevoir des systèmes de communication, il est nécessaire d'évaluer leurs performances. Cependant, le but de ce travail est d'arriver à une implémentation de simulation qui aborde les performances des systèmes MIMO et de vérifier qu'ils répondent aux objectifs spécifiques, Nous partons différentes capacités que nous verrons dans la première partie et révélons les résultats de la simulation graphique obtenue par Matlab.

Dans le premier cas, nous étudierons la relation entre l'amplitude du canal et le rapport signal sur bruit (SNR) selon la théorie de Shannon sur la capacité du canal, et utiliser différents nombres d'antennes  $1 \times 1$ ,  $2 \times 2$ , ... et  $5 \times 5$ .

Dans la deuxième partie, nous discutons les résultats que nous obtenons pour différents types d'algorithmes de détection linéaire tels que l'effet zéro (ZF), l'erreur quadratique moyenne minimale (MMSE), la détection non linéaire telle que l'annulation d'interférence en cascade sans effet (ZF-SIC) et L'égaliseur minimisant l'erreur quadratique moyenne (MMSE-SIC) et plafond de potentiel maximal (ML) dans un canal de type Rayleigh.

##### 3.2 Le langage utilisé (Matlab)

Choisir le bon environnement de programmation est très important pour étudier des projets. Cela se fait en fonction de plusieurs facteurs : résistance de l'assemblage, facilité d'utilisation et disponibilité de nombreuses fonctions de communication avec d'autres environnements, etc.

Afin de réaliser les différentes simulations de notre système, nous avons utilisé les outils logiciels MATLAB®. Ce dernier est un langage de calcul scientifique de haut niveau et un environnement interactif de développement d'algorithmes, de visualisation et d'analyse de données, voire de calcul numérique (MATLAB signifie MATrix LABoratory).

MATLAB permet de résoudre les problèmes scientifiques et techniques. C'est un langage basé sur les matrices, il allie mathématique, modélisation graphique, programmation et dispose d'une large bibliothèque de fonctions intégrées et pré-écrites avec des notations simples et puissantes pour de nombreuses tâches de calculs communes par rapport aux autres simulateurs.

Ces fonctions peuvent être construites dans tous les langages de programmation, MATLAB permet de les regrouper dans un seul endroit

Avec MATLAB, nous pouvons résoudre les problèmes de mathématiques scientifiques plus rapidement que les langages de programmation traditionnels, car il n'est pas nécessaire d'effectuer des tâches de programmation de bas niveau, telles que déclarer des variables, spécifier des types de données et allouer de la mémoire.

### **3.3 Capacité des systèmes MIMO**

#### **3.3.1 Comparaison entre capacité MIMO et Shannon**

La capacité des systèmes MIMO est un sujet d'actualité dans la littérature, dont nous ne présentons ici que le minimum pour montrer l'intérêt des transmissions MIMO. Afin de pouvoir comparer les différentes capacités que nous allons voir.

La limite physique imposée par le canal à la quantité d'informations envoyées nous encourage à trouver une solution pour améliorer la productivité, tout en gardant la complexité du matériel raisonnable. L'augmentation de la force du signal transmis augmente l'augmentation de logarithmique de l'efficacité spectrale. Par exemple, si vous souhaitez augmenter la puissance, vous devez multiplier la puissance de l'émetteur par une grande quantité, ce qui n'est pas toujours possible.

Certaines techniques ont été utilisées pour améliorer qualitativement ou quantitativement l'information transmise, comme la technique de diversité spatiale en émission (MIMO) ou la technique de diversité spatiale en réception.

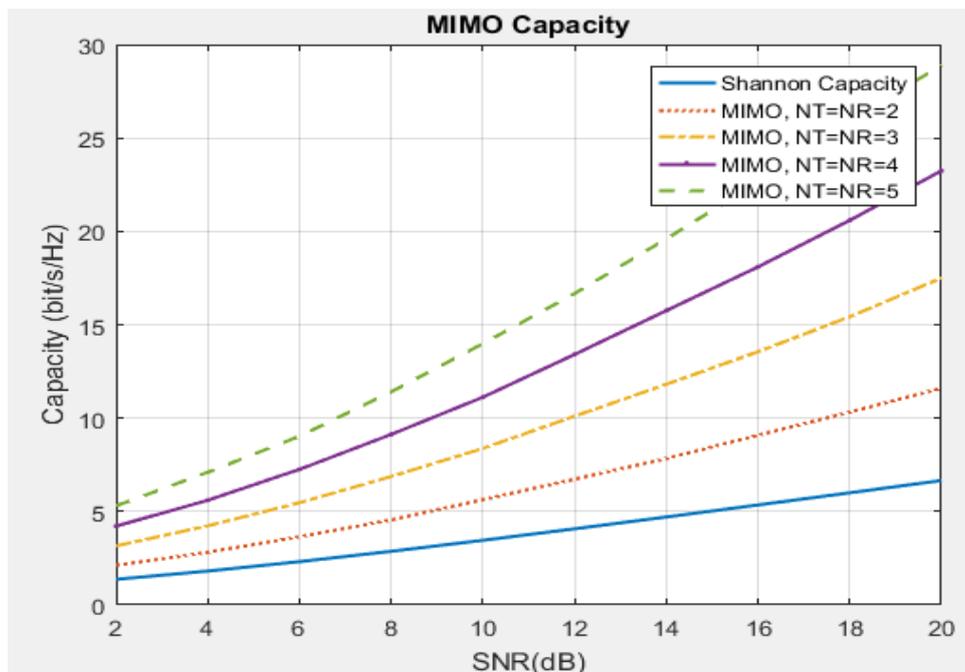


Figure 3.1 : Comparaison entre les capacités des canaux SISO et MIMO

La figure 3.1 présente la variation de capacité de canal en fonction du rapport signal sur bruit pour des systèmes dotés par des antennes Shannon (1x1) et MIMO, (2x2), (3x3), (4x4) et (5x5) pour différent matrice d'antennes MIMO, avec une estimation de canal de Rayleigh.

- Dans le cas de capacité théorique de Shannon, la capacité varie de 1.75 à 6.25 Bit/s/Hz environ. Elle augmente d'une manière considérable avec le SNR, mais elle reste faible ce qui illustre les limitations de la transmission.
- Dans le cas MIMO (Nt=Nr=2) la capacité s'augmente de 5.25 Bit/s/Hz par rapport à la capacité de Shannon. La capacité MIMO augmente plus rapidement, pour finir avec un gain presque 50% à 10 dB du SNR.
- Exactement les mêmes commentaires peuvent être effectués pour les systèmes MIMO à (Nt=Nr= 3), (Nt=Nr=4) et (Nt=Nr=5). Nous pouvons aussi vérifier que la capacité du système MIMO à 4 antennes est presque le double de celle à 2 antennes.

Capacité \ SNR	SISO avec (1x1)	MIMO avec (2x2)	MIMO avec (3x3)	MIMO avec (5x5)
SNR = 4 dB	1.81	2.81	4.25	8.41
SNR = 8 dB	2.87	4.57	6.89	13.64
SNR = 16 dB	5.35	9.07	13.58	27.22

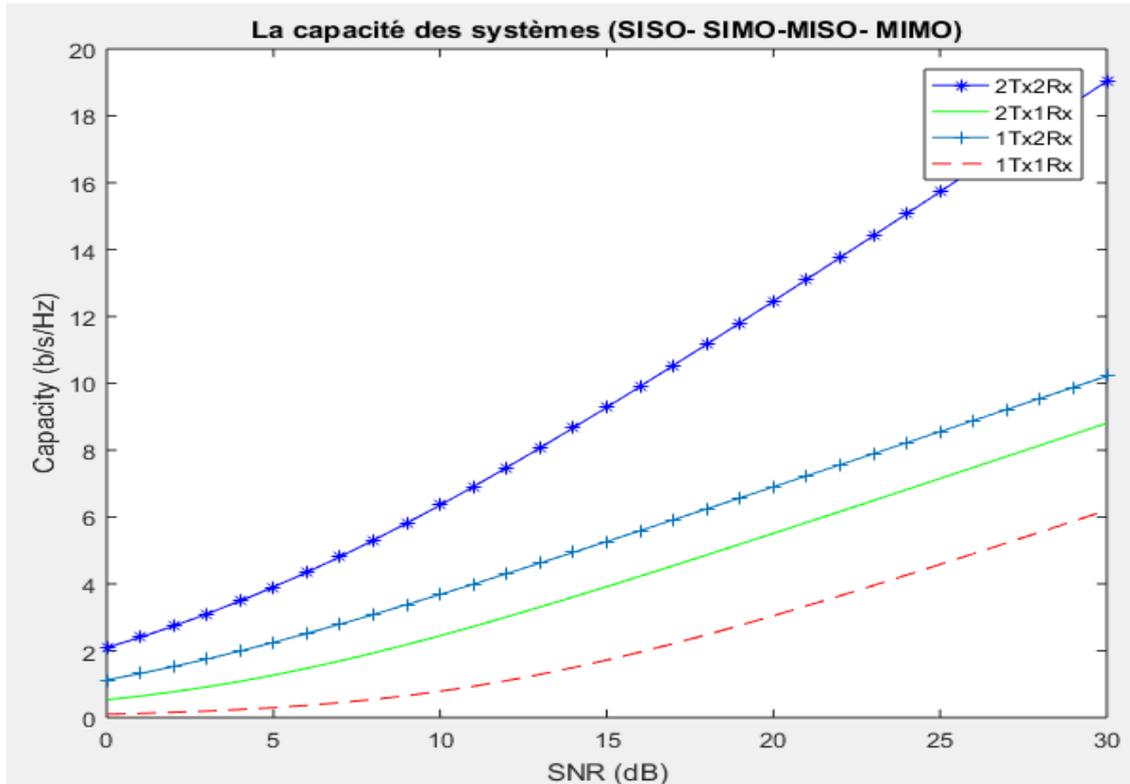
Tableau. 3.1. Capacités MIMO en fonction du SNR.

Le tableau 3.1 montre la comparaison de la capacité du système entre plusieurs implantations d'antennes MIMO. Le résultat confirme que l'augmentation du nombre d'antenne dans le système donne une meilleure capacité en améliorant le rapport SNR.

### 3.4. La capacité des systèmes MIMO (SISO- SIMO- MISO-MIMO)

Pour illustrer l'augmentation de capacité en fonction du SNR pour tous les systèmes MIMO, nous donnons ce qui suit :

#### 3.4.1. Les systèmes MIMO avec ( $N_t = 2$ et $R_t = 2$ )



**Figure 3.2:** Capacités des systèmes MIMO(2x2), SIMO(1x2), MISO(2x1) et SISO(1x1)

La figure 3.2 représente l'espérance de la capacité en fonction du SNR pour plusieurs valeurs de  $N_t$  et  $N_r$ . Un programme, effectué suivant la loi définie a été utilisé pour tracer ces courbes.

Dans le cas SISO ( $N_t = N_r = 1$ ) la capacité varie de 0.75 à 8,5 bps/Hz environ. Elle reste faible et croît lentement avec le SNR, ce qui illustre bien les limitations des transmissions SISO. Malgré les techniques actuelles, qui permettent de tirer le maximum d'un canal SISO, sa capacité a une borne qui ne peut être dépassée et un système multi-antennes, même sous-exploité, donnera de meilleures performances.

Les deux exemples SIMO ( $N_t = 1$  et  $N_r = 2$ ) montrent les bornes supérieures des traitements sans multiplexage spatial. Le passage à deux antennes en réception permet de gagner 1.56 bps/Hz par rapport au SISO, ce qui est n'est pas très important, en particulier à fort SNR.

### 3.4.2. Les systèmes MIMO avec ( $N_t = 4$ et $N_r = 4$ )

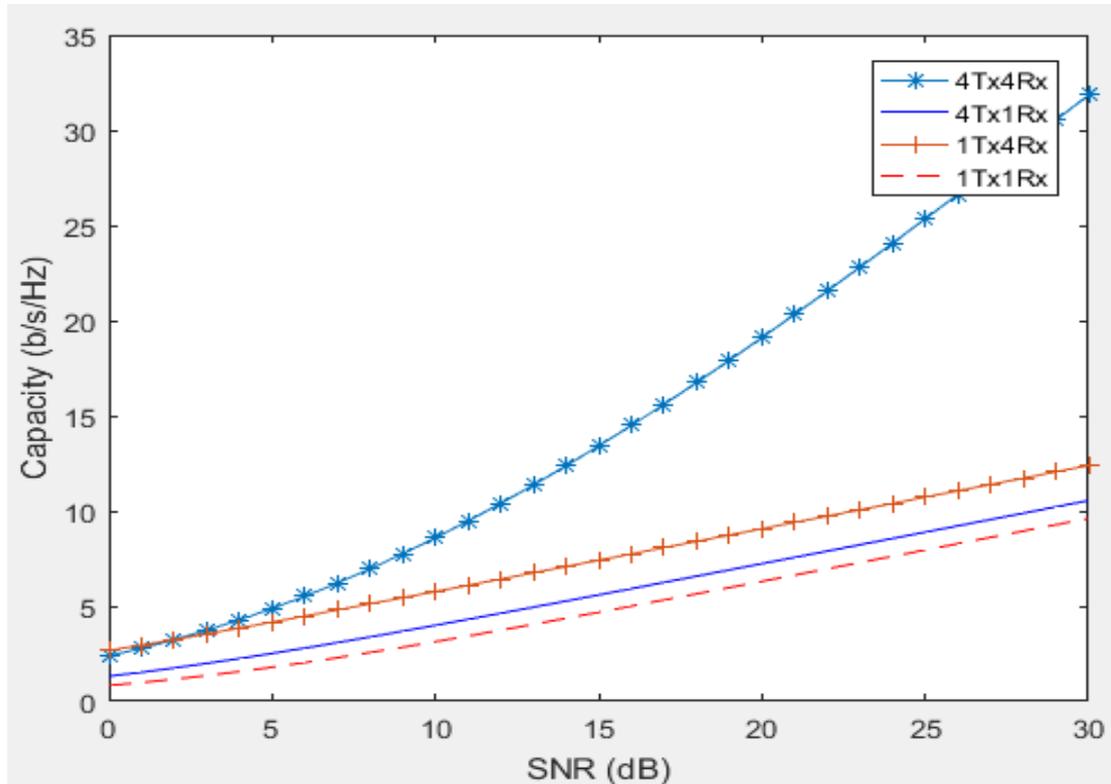
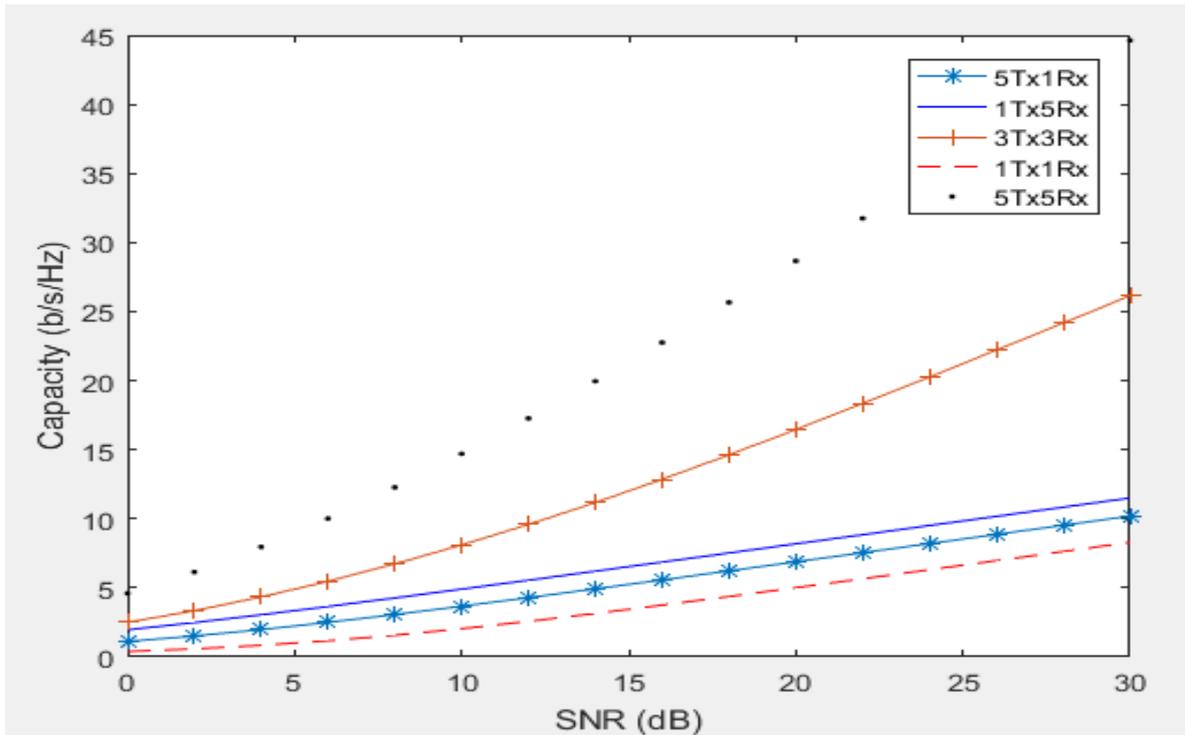


Figure 3.3 : Capacités des systèmes MIMO (4×4), SIMO (1×4), MISO (4×1) et SISO (1×1)

Dans la figure 3.3 nous constatons que la capacité du canal augmente avec l'augmentation du SNR. Pour la technique SISO la capacité du canal croît lentement avec le SNR, ce qui montre les limitations des transmissions SISO. Même constatation pour le cas SIMO où quatre antennes en émission et une antenne à la réception sont utilisées mais cette fois avec une légère augmentation de la capacité (environ 3 bps/Hz pour SNR=25 dB). Pour le cas MIMO, avec quatre antennes en émission et également à la réception, la capacité du canal augmente plus rapidement avec le SNR pour finir avec une valeur supérieure à 20 bps/Hz pour SNR=25 dB.

3.4.3. Les systèmes MIMO avec ( $N_t = 5$  et  $R_t = 5$ )



**Figure 3.4 :** Capacités des systèmes MIMO (5×5), SIMO (1×5), MISO (5×1) et SISO (1×1)

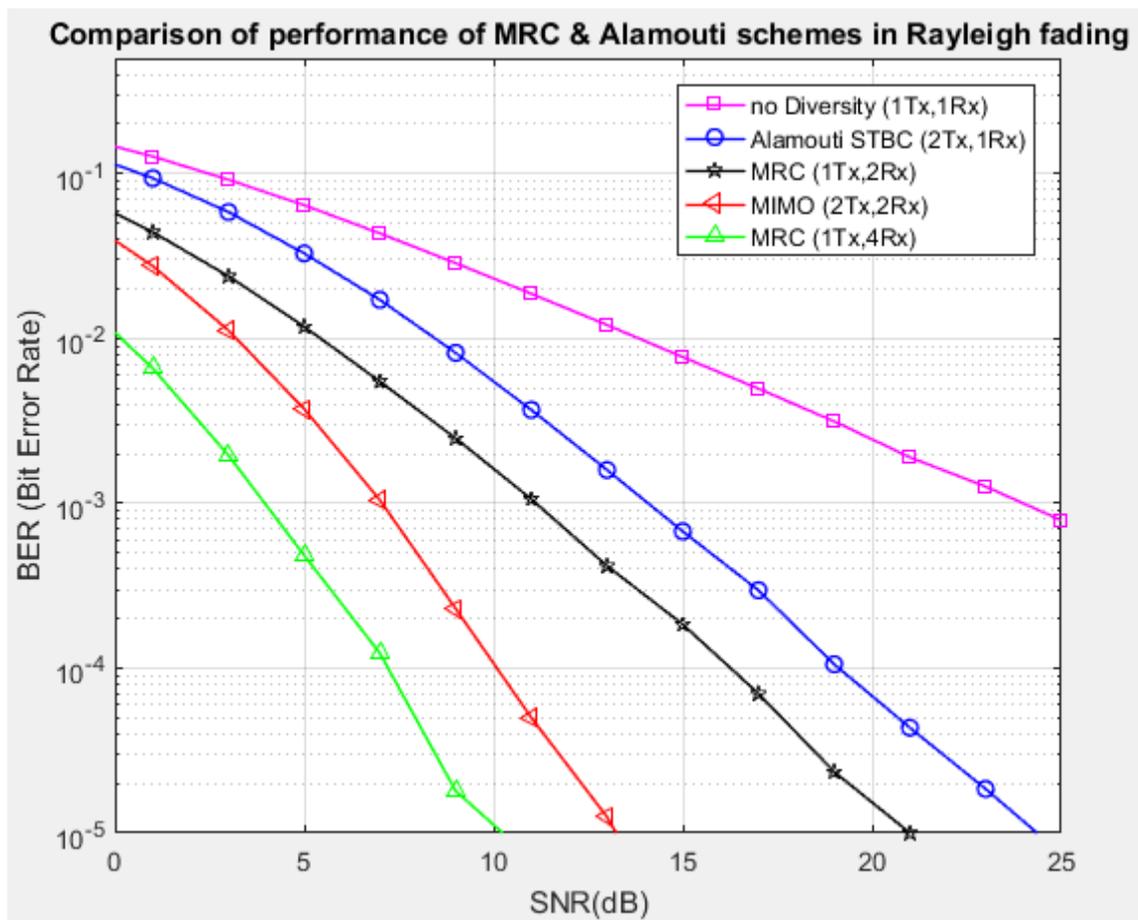
Toutes les figures (3.2), (3.4) et (3.4) montrent que la capacité du système SIMO augmente plus rapidement que dans le cas du SISO. Cependant, il reste faible par rapport au canal MIMO, car la dimension spatiale du système n'est que partiellement exploitée.

L'avantage en capacité des systèmes MIMO est principalement dû à l'exploitation des trajets multiples. Tout d'abord ils permettent au récepteur de différencier les différentes antennes d'émission, et donc d'émettre plusieurs symboles simultanément. Ensuite, chaque trajet est une réplique du signal émis, et est donc porteur d'information utile. Nous pouvons aussi dire que chaque trajet est l'équivalent du signal direct émis par une antenne virtuelle, ce qui augmente virtuellement le nombre d'antennes émettrices.

### 3.5 Comparaison des performances des schémas MRC et Alamouti (STBC)

Dans cette section, l'analyse du taux d'erreur sur les bits des performances du système MIMO de BPSK pour la diversité de transmission (Alamouti STBC) et la diversité de réception (MRC) est présentée dans le canal à évanouissements de Rayleigh.

La figure 1 montre les valeurs du taux d'erreur sur les bits en fonction de la variable SNR (dB) pour les schémas MRC et Alamouti sur le canal à évanouissements de Rayleigh en utilisant BPSK.



**Figure 3.5:** BER pour divers schémas de diversité d'émission et de réception sur le canal à évanouissements de Rayleigh à l'aide de BPSK.

La figure 3.5 montre les valeurs du taux d'erreur sur les bits en fonction de la variable SNR (dB) pour les schémas MRC et Alamouti sur le canal à évanouissements de Rayleigh en utilisant BPSK. En cela, les performances du 1x4 MRC sont 2 dB supérieures à celles du 2x2 Alamouti STBC. De plus, les performances du 2x1 Alamouti STBC sont inférieures de 2 dB à celles du 1X2 MRC.

### 3.6 Algorithmes de détection dans le récepteur MIMO

Les algorithmes de détection dans les systèmes MIMO peuvent être largement divisés en deux catégories. La première comprend les *détecteurs linéaires* tels que le forçage nul (ZF) et l'erreur quadratique moyenne minimale (MMSE). La deuxième catégorie comprend les *détecteurs non linéaires* tels que l'annulation des interférences successives (SIC) et le maximum de vraisemblance (ML).

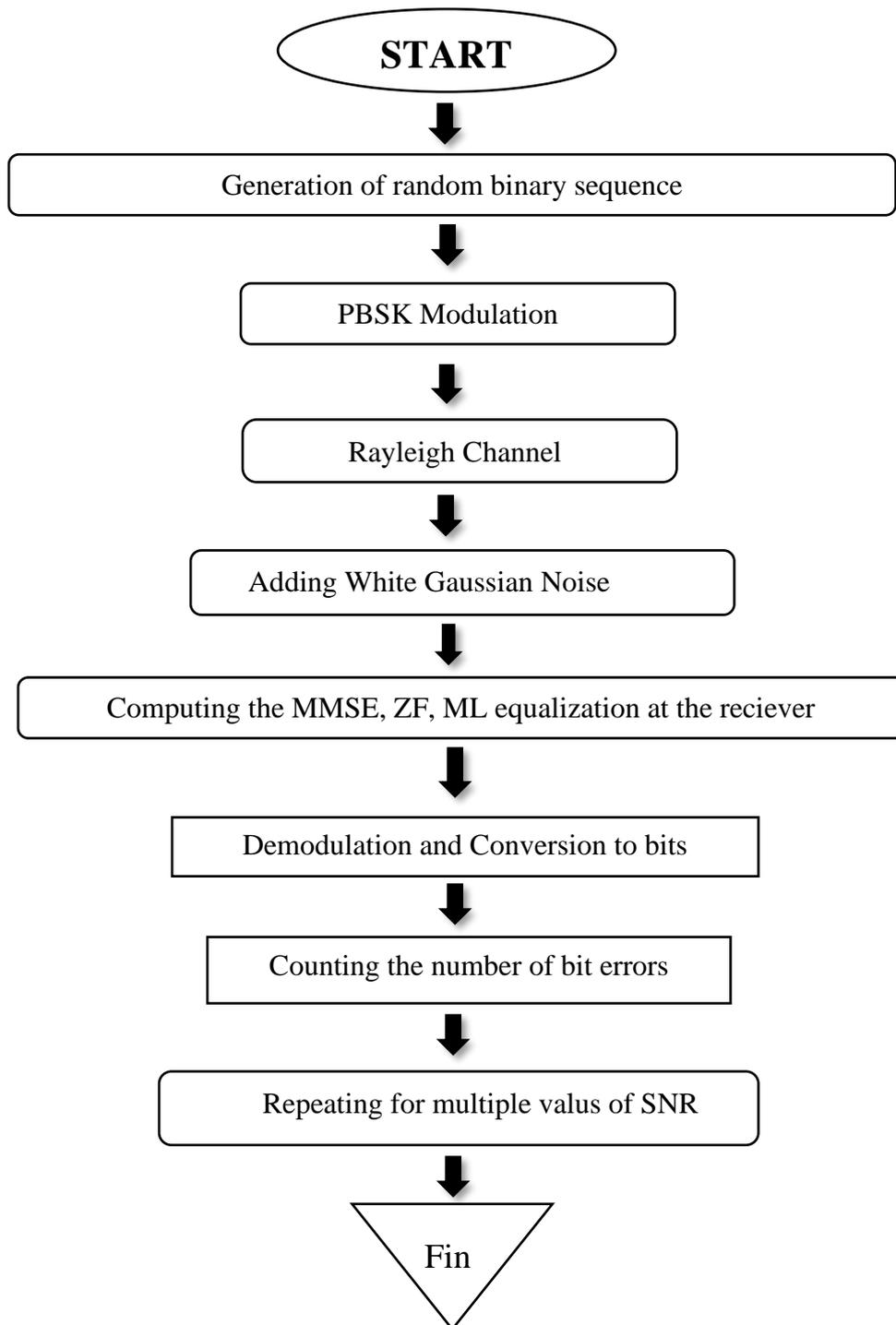
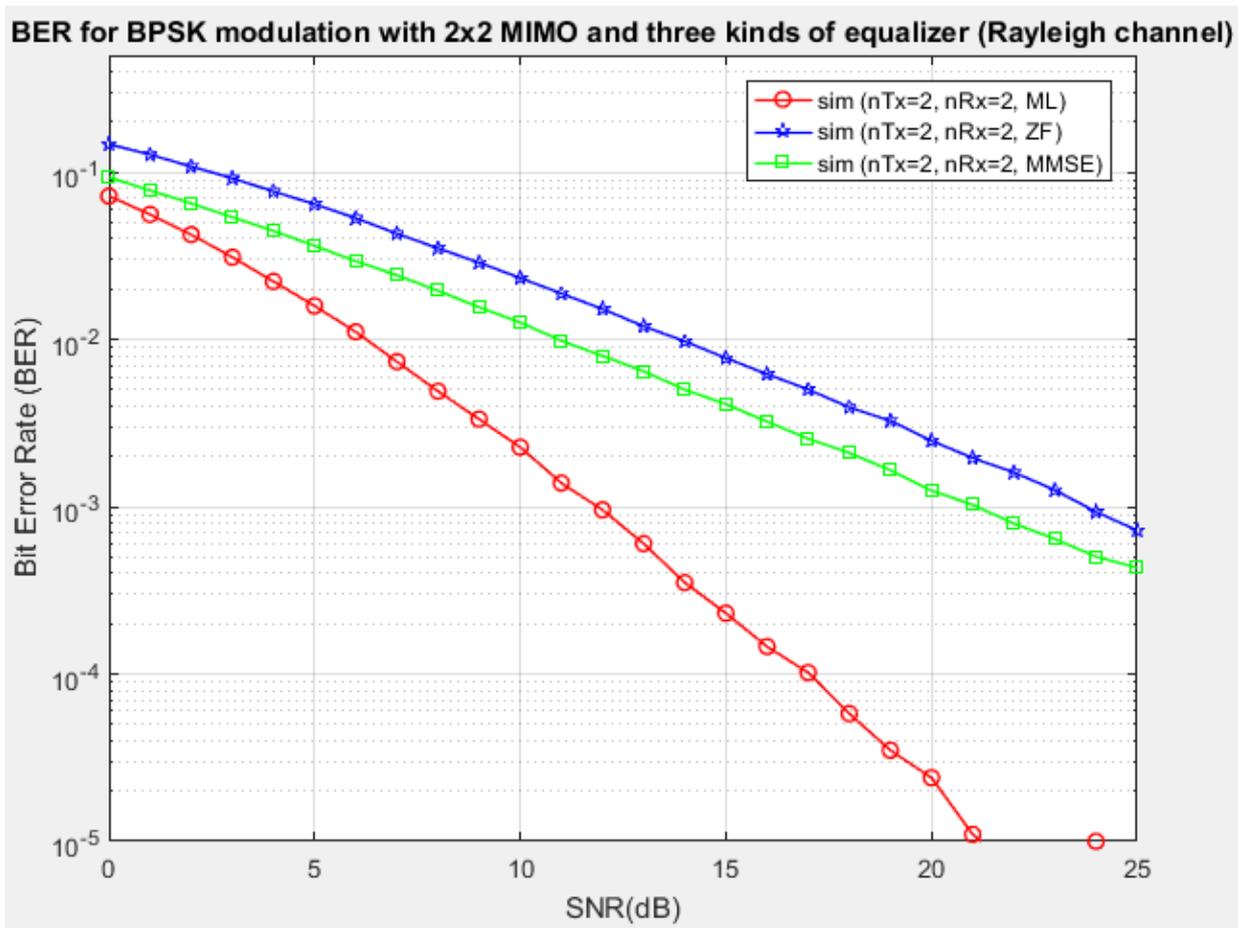


Figure 3.6 : Organigramme de calcul

### 3.6.1 MIMO avec l'égaliseur (ZF, MMSE, ML)

On étudie l'évaluation du BER en fonction du SNR avec les types d'égaliseurs et le nombre d'antenne. On suppose que le canal soit de type *multiple trajet* (canal de Rayleigh) pour comparer la caractéristique BER en fonction du SNR pour les égaliseurs MMSE, ZF et ML. Nous utilisons dans la simulation, la modulation BPSK pour le système 2x2 MIMO et le résultat de cette comparaison est illustré par la figure 3.5 :



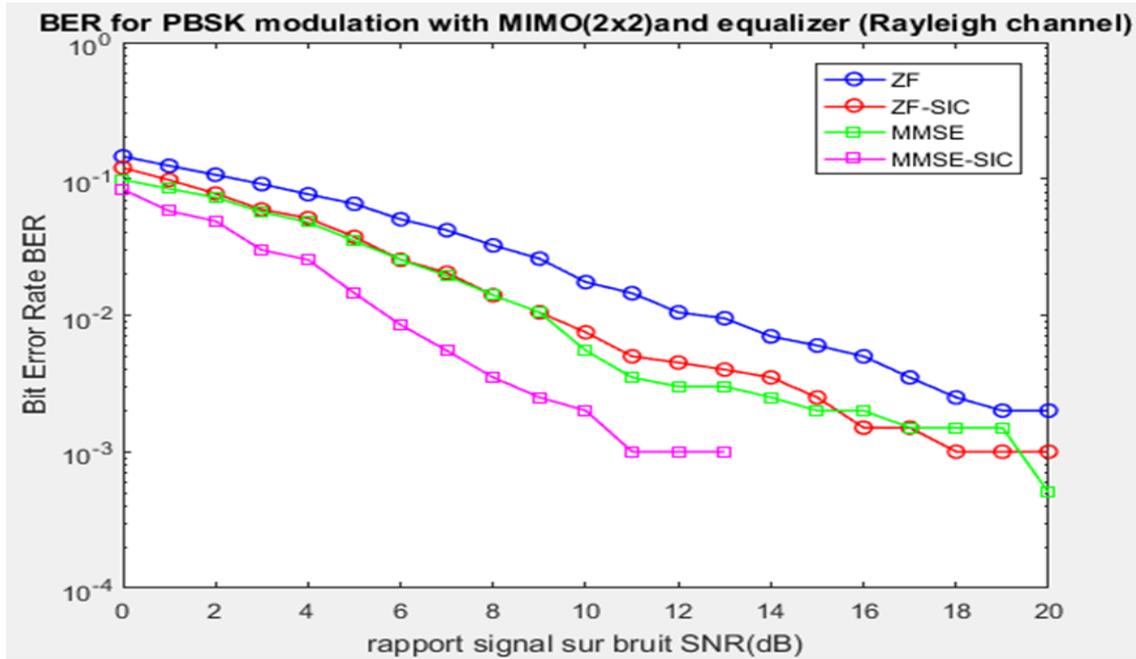
**Figure 3.7 :** Le BER pour le système MIMO avec l'égaliseur ZF, ML et MMSE (canal de Raleigh).

Sur la figure 3.5, le taux d'erreur sur les bits (BER) par rapport aux performances du rapport signal sur bruit (SNR) des détecteurs des symboles dans les systèmes 2x2 est montré. Comme on peut le voir, le ML a de meilleures performances que les algorithmes ZF et MMSE.

### 3.6.2 Comparaison entre détection linéaire et non linéaire

Dans cette simulation, deux types de détecteurs linéaires tels que MMSE et ZF sont étudiés et comparés à des types de détecteurs non linéaires tels que ZF-SIC appelé zéro forcer successives interférence cancellations et (MMSE-SIC) appelé Minimum Mean Square Error successives interférence, à travers deux types de simulations.

Dans la première méthode, la simulation a été effectuée avec MIMO-PSK (2x2) et le taux d'erreur binaire (BER) a été mesuré avec l'augmentation du rapport signal sur bruit (SNR).



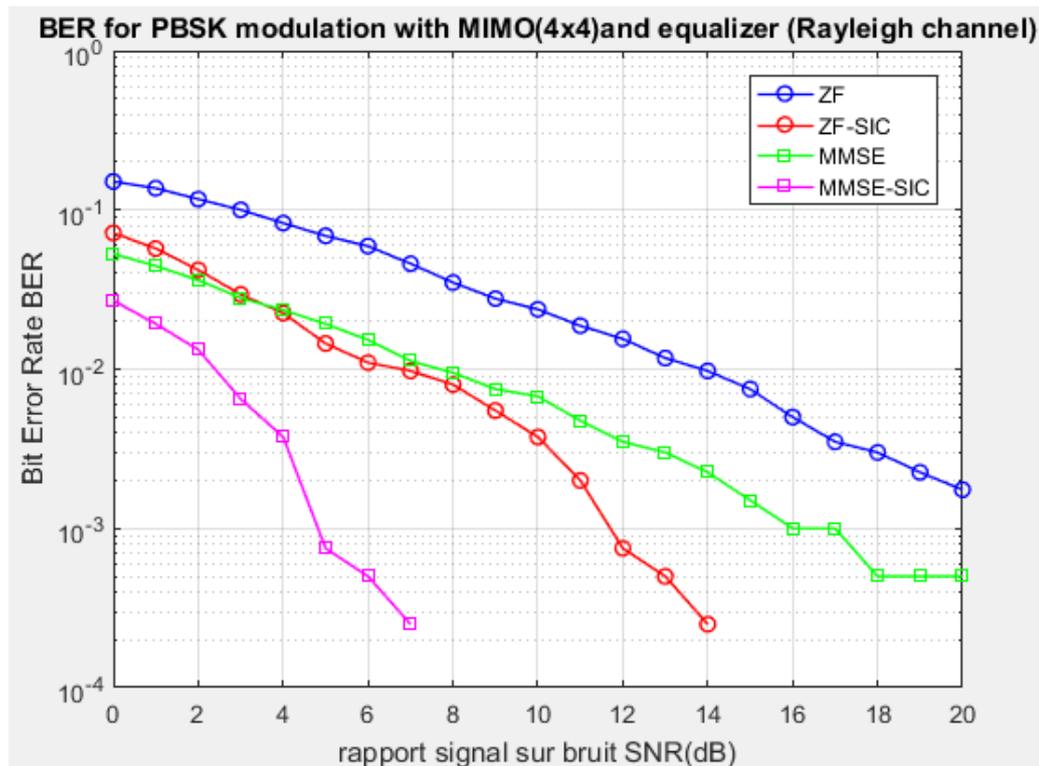
**Figure 3.8 :** Le BER pour le système MIMO (2x2) avec l'égaliseur (ZF, ZF-SIC, MMSE, MMSE-SIC) pour un canal Raleigh.

Les résultats de la simulation ont montré qu'en combinant SIC et MMSE ou SIC avec ZF, il offre de meilleures caractéristiques de performance pour le BER par rapport au récepteur normal constitué respectivement de MMSE ou ZF. En conséquence, le récepteur basé sur MMSE-SIC offre de meilleures performances par rapport au récepteur ZF-SIC, de plus, comme on peut le voir sur la figure 3.6, les performances du ZF-SIC et du MMSE sont presque identiques.

TEB SNR (dB)	Détecteurs linéaires		Détecteurs non linéaires	
	ZF	MMSE	ZF SIC	MMSE SIC
SNR = 6 dB	0.048	0.031	0.028	0.0135
SNR = 12 dB	0.013	0.0075	0.007	0.0015

**Tableau. 3.2 :** BER en fonction de SNR

Dans la deuxième méthode, la simulation a été réalisée avec MIMO-PSK (4x4) et le taux d'erreur binaire (BER) a été mesuré pour augmenter le rapport signal sur bruit (SNR).



**Figure 3.9 :** Le BER pour le système MIMO (4x4) avec l'égaliseur (ZF, ZF-SIC, MMSE, MMSE-SIC) pour un canal Raleigh.

Les résultats de la simulation représentent mieux les récepteurs ZF-SIC et MMSE-SIC que ZF et MMSE. On observe la même chose lorsque le nombre d'antennes de réception et d'émission passe à 4. La figure 3.7 montre que lorsque le nombre d'émetteurs et de récepteurs augmente de 2 à 4, on voit que ZF-SIC et MMSE-SIC ont de meilleures caractéristiques BER. Par conséquent, à partir des résultats de la simulation, il a été conclu que les performances de ZF-SIC et MMSE-SIC sont meilleures que celles de ZF et MMSE normales.

TEB SNR (dB)	DéTECTEURS linéaires		DéTECTEURS non linéaires	
	ZF	MMSE	ZF SIC	MMSE SIC
SNR = 2 dB	0.117	0.03625	0.042	0.01325
SNR = 6 dB	0.059	0.015	0.011	0.0005
SNR = 12 dB	0.015	0.0035	0.00075	//

**Tableau. 3.3 :** Le BER en fonction de SNR

### **3.7 Conclusion**

Dans ce dernier chapitre, Nous nous sommes penchés sur les caractéristiques principales de ces systèmes MIMO. Nous avons expliqué la raison de leur succès en montrant que la capacité pouvait croître linéairement avec le nombre d'antennes émettrices  $N_t$ . Nous avons présenté les différentes simulations des systèmes MIMO qui permettent d'augmenter la capacité des systèmes de communication sans fil, en utilisant plusieurs antennes à l'émission et à la réception.

Nous avons tenté de donner une vue d'ensemble du champ d'antenne MIMO, en nous concentrant principalement sur les différents types de codage. Les antennes de réception reçoivent un mélange de signaux de toutes les antennes d'émission. Nous avons donc introduit plusieurs algorithmes, linéaires (ZF et MMSE) ou non linéaires (SIC et ML), qui permettent de séparer les signaux et de retrouver les informations brutes. Afin d'augmenter encore le débit binaire et d'obtenir la meilleure qualité de signal à la réception.

Nous avons vu que le récepteur le plus simple, le forçage à zéro (ZF), est sensible au bruit et que la minimisation de l'erreur quadratique moyenne (MMSE) n'enlève pas toute l'IES.

Le détecteur ML est optimal dans le sens de la probabilité d'erreur minimale lorsque tous les vecteurs de données transmis sont également probables. Le récepteur ML atteint les meilleures performances du système (diversité maximale et le plus bas BER), et à partir de la simulation, nous avons observé que la probabilité maximale (ML) a les meilleures performances que les autres détecteurs et le Zero Forcing (ZF) a les pires performances.

## **Conclusion Générale**

Ces dernières années, les travaux de recherche dans le domaine des télécommunications sans fils ont amenés de nouvelles solutions pour améliorer le débit ou/et la qualité de transmission. Une des techniques qui peut répondre à ces problématiques est connue sous le nom de systèmes MIMO. Le travail de ce mémoire a été initié dans ce contexte et a porté sur l'étude des performances des systèmes MIMO et Algorithmes de réception associés aux systèmes MIMO.

Nous avons commencé par étudier les caractéristiques principales de ces systèmes MIMO. Nous avons essayé dans cette partie de proposer une vue d'ensemble du domaine, En particulier nous avons expliqué la raison de leur succès en montrant que la capacité pouvait croître linéairement avec le nombre d'antennes émettrices  $N_t$ . La comparaison entre le système MIMO et les autres systèmes SISO et SIMO démontre qu'il n'y a aucun doute quant à l'intérêt de la technologie MIMO en termes de capacité.

Les systèmes qui utilisent d'énormes réseaux d'antennes pour desservir plusieurs utilisateurs sont appelés systèmes de communication de massive MIMO. Il est capable de lutter contre l'atténuation du signal millimétrique, de fournir une connectivité sans fil et de supprimer les interférences dans les réseaux multicouches et plus denses.

Les algorithmes MIMO implémentés ont été choisis en fonction de leur simplicité. Ces algorithmes reposent à l'émission, sur le multiplexage spatial (SM) ou sur le codage spatio-temporel en bloc. Dans ce stade, nous avons donné sur les performances des codes spatio-temporel (STBC) qui introduit par Alamouti en 1998, puis généralisé par la suite par Tarokh. La première exploite toute la diversité spatio-temporelle pour accroître le gain tandis que la deuxième vient compléter la première par son rapport en gain de codage.

Les résultats de la simulation ont montré que les technologies MIMO peuvent soit augmenter la capacité ou l'efficacité spectrale, soit améliorer la robustesse des systèmes sans fil. Une comparaison des deux méthodes montre qu'un système basé sur un détecteur MMSE SIC et ZF SIC est meilleur que MMSE et ZF et donne de meilleures performances de taux d'erreur sur les bits (BER) pour les données transmises avec une efficacité de bande passante fixe. En revanche, les systèmes V-BLAST restent le meilleur choix pour augmenter l'efficacité spectrale ou le débit des systèmes sans fil.

## Bibliographie

- [1] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*, 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley, 2005.
- [2] M. Huchard, C. Delaveaud, et S. Tedjini, « Miniature antenna for circularly polarized quasi isotropic coverage », *Eucap 2007*, 11-16 Nov. 2007, Edinburg, Ecosse.
- [3] : Ludovic COLLIN. « Optimisation de systèmes multi antennes basée sur la distance minimale », l'Université de Bretagne Occidentale, 17 décembre 2002.
- [4] I. E. Telatar - Capacity of multi-antenna Gaussian channels – *European Transactions on Télécommunications* - 10(6) :585–595 -1999.
- [5] G. J. Foschini and M. J. Gans - On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas. *Wireless Personal Communications* - 6(3) :311–335 - march 1998.
- [6] D. Gesbert and J. Akhtar - Breaking the barriers of Shannon's capacity: An overview of MIMO wireless system - *Teletronikk Telenor Journal* - January 2002.
- [7] A. Wittneben, « A new bandwidth efficient transmit antenna modulation diversity scheme for linear digital modulation, » *IEEE Inter. Conf. On Commun*, vol. 3, pp. 1630–1634, May 1993.
- [8] N. Seshadri and J. Winters, « Two signalling schemes for improving the error performance of frequency-division-duplex (fdd) transmission systems using transmitter antenna diversity, » *IEEE Vehicular Technology Conference*, pp. 508–511, May 1993.
- [9] A. Chebihi, « Conception de systèmes multi-antennaires pour la diversité et le MIMO en téléphonie mobile », Université Nice Sophia Antipolis, 2011.
- [10] Basel RIHAWI. « Analyse et réduction du Power Ratio des systèmes de radiocommunications multi antennes », Université de Renne I, 20 Mars 2008.
- [11] R. G. Vaughan. Polarization diversity in mobile communications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 39 :177–186, August 1990.
- [12] B. Vrigneau, *Systèmes MIMO précoces optimisant la distance minimale : étude des performances et extension du nombre de voies*, l'Université de Bretagne Occidentale, 2006.

- [13] B. Vrigneau, « Systèmes MIMO précodés optimisant la distance minimale : étude des performances et extension du nombre de voies », PhD Thesis, Université de Bretagne occidentale-Brest, 2006.
- [14] T. M. Duman et A. Ghrayeb, Coding for MIMO Communication Systems. Wiley-Blackwell (an imprint of John Wiley & Sons Ltd), 2007.
- [15] K.-L. Du et M. N. S. Swamy, Wireless Communication Systems: From RF Subsystems to 4G Enabling Technologies. Cambridge University Press, 2010.
- [16] O. BERDER. Optimisation et stratégies d'allocation de puissance des systèmes de transmission multi-antennes. Thèse de doctorat en électronique, Université de BRETAGNE OCCIDENTALE, France, 2002.
- [17] T. W. C. Brown, « Antenna Diversity for Mobile Terminals », Phd Thesis, University of Surrey, Guildford, centre for Communication Systems Research, School of Electronics and Physical Sciences, 2002.
- [18] A. Diallo, « Systèmes multi-antennes pour diversité et MIMO », PhD Thesis, Université Nice Sophia Antipolis, 2007.
- [19] T. W. C. Brown, S. R. Saunders, et B. G. Evans, « Analysis of mobile terminal diversity antennas », IEE Proceedings - Microwaves, Antennas and Propagation, vol. 152, no 1, p. 1, 2005.
- [20] S. R. Saunders et A. Aragón-Zavala, Antennas and propagation for wireless communication systems, 2. ed. Chichester: Wiley, 2007.
- [21] R. Addaci, Conception d'éléments rayonnants pour systèmes d'interrogation multi-antennaires en environnements de propagation difficiles et fortement bruités », Thèse de doctorat, École doctorale Sciences et technologies de l'information et de la communication, 2011.
- [22] T. Lee, Z. Lee, « A BeamSpace Diversity Combiner for Sector Division Multiple Access Communications », IEEE Antennas and Propagations Society Symposium Digest, Atlanta, pp. 372-375, June 1998.

- [23] Schwartz M., Bennet W.R., Stein S., « Communication Systems and techniques », Vol. 4, McGraw-Hill Book Company, US 1966.
- [24] D. karakolah. Conception de prototypage d'un récepteur itératif pour les systèmes de transmission MIMO avec pré-codage linéaire. Thèse de doctorat, université Bretagne-sud, France, 2009.
- [25] <http://fr.wikipedia.org/wiki/OFDM>
- [26] [www.afjv.fr/press0512/051219\\_standards\\_sans\\_fil\\_wifi.htm](http://www.afjv.fr/press0512/051219_standards_sans_fil_wifi.htm)
- [27] Collin L., "Optimisation de systèmes multi-antennes basée sur la distance minimale", thèse de doctorat, 17 décembre 2002
- [28] Plicanic V., "Antenna Diversity Studies and Evaluation" Master of science Thesis, Lund University Sweden May 2004, <http://www.es.lth.se/teorel/Publications/TEAT-5000-series/TEAT-5064.pdf>.
- [29] : Ludovic COLLIN « Optimisation de systèmes multi antennes basée sur la distance minimale », l'Université de Bretagne Occidentale, 17 décembre 2002
- [30] : Pierre GRUYER, Simon PAILLARD, « Modélisation d'un modulateur et démodulateur OFDM », Université de Bretagne 12 décembre 2005.
- [31] Mr. BAKHIR HADJALI, « Exploitation de localisation des techniques MIMO-OFDM pour la transmission des réseaux locaux sans fil », Mémoire pour l'obtention du Diplôme de magister en télécommunications, université Abou Bekr Belkaid en 2012.
- [32] « MIMO - Wikipedia, the free encyclopedia » <http://en.wikipedia.org/wiki/mimo>
- [33] ZERROUKI Hadj « Application de la technologie MIMO dans les réseaux Wi-Fi » Thèse de Magister en Télécommunications, Université de Tlemcen, juin 2006
- [34] « WiMAX\_MIMO » [www.worldlingo.com/ma/enwiki/fr/WiMAX\\_MIMO](http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/fr/WiMAX_MIMO).
- [35] Mehassouel, M. Application De La Technologie Mimo A La 4g Du Mobile. Thèse Magistère, Université de SETIF1, Décembre 2014.
- [36] E. Larsson and P. Stoica, "Space-Time Block Coding in Wireless Communications". Cambridge University Press, 2003.

- [37] LARSSON, Erik G. et STOICA, Petre. Space-time block coding for wireless communications. Cambridge University Press, 2008.
- [38] GOLDEN, G. D., FOSCHINI, G. J., WOLNIANSKI, P. W., et al. V-BLAST: A high capacity space-time architecture for the rich-scattering wireless Channel. Bell Laboratoires, IsarT-98, 1998, vol. 150.
- [39] GOLDEN, G. D., FOSCHINI, C. J., VALENZUELA, Reinaldo A., et al. Detection algorithm and initial laboratory results using V-BLAST space-time communication architecture. Electronics letters, 1999, vol. 35, no 1, p. 14-16.
- [40] STOJNIC, Mihailo, VIKALO, Haris, et HASSIBI, Babak. Further results on speeding up the sphere decoder. In: Acoustics, Speech and Signal Processing, 2006. ICASSP 2006 Proceedings. 2006 IEEE International Conference on. IEEE, 2006. p. IV-IV.
- [41] REZKI, Zouheir. Étude et optimisation des algorithmes de traitement de signal requis pour un système de communication MIMO. 2003. Thèse de doctorat. École de technologie supérieure.
- [42] Rozé, Antoine. Massive MIMO, une approche angulaire pour les futurs systèmes multi-utilisateurs aux longueurs d'onde millimétriques. Diss. INSA de Rennes, 2016.
- [43] J. Paulraj et al. "An Overview of MIMO Communications-A Key to Gigabit Wireless", Proceedings of the IEEE, Vol. 92, No. 2, February 2004.
- [44] The Role of Massive MIMO in 5G. Michael Wang. Oct 23, 2018 [Enligne]. <https://medium.com/@miccowang/the-role-of-massive-mimo-in-5g-c362e790ef61> [consulté le 03 Avril 2019].
- [45] T. L. Marzetta, "Massive MIMO: An Introduction," Bell Labs Tech. J., vol. 20, pp. 11–22, 2015.
- [46] Abboud, Ahmad. Interference mitigation in 5G mobile networks: Uplink pilot contamination in TDD massive MIMO scheme. Diss. Limoges, 2017.
- [47] Sun, Diwei. (Thèse doctorat 2017). Spectral Efficiency and Energy Efficiency in Massive MIMO Systems.
- [41] Fu, Hua. Spectral resource optimization for MU-MIMO systems with partial frequency bandwidth overlay. Diss. INSA de Rennes, 2015.

[42] Luo, Fa-Long, and Charlie Zhang, eds. Signal processing for 5G: algorithms and implementations. John Wiley & Sons, 2016.

[43] Jaouadi, Randa. Compromis efficacité énergétique et efficacité spectrale pour les objets communicants autonomes. Diss. Nantes, 2017.

