



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

\*\*\*\*\*

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

\*\*\*\*\*

MENTION : ELECTRONIQUE

\*\*\*\*\*



---

Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Master à Visée de Recherche

Parcours: SYSTEMES ET DISPOSITIFS ELECTRONIQUES

## **ETUDE DE PERFORMANCE DE CANAL DU RESEAU LTE SOUS OFDM-MIMO**

Présenté par : RASAMIMANANA Tahina Fabrice

Soutenu le : 25 juin 2016

Numero d'ordre :

Année universitaire : 2013 – 2014



# **ETUDE DE PERFORMANCE DE CANAL DU RESEAU LTE SOUS OFDM-MIMO**

---

**Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Master à Visée de Recherche**

Mention : ELECTRONIQUE

Parcours: SYSTEMES ET DISPOSITIFS ELECTRONIQUES

Présenté par : RASAMIMANANA Tahina Fabrice

Devant le jury composé de:

- Monsieur RASTEFANO Elisée, Président
- Monsieur RATSIMBA Mamy N., Examineur
- Monsieur RANDRIAMAROSON Rivo M., Examineur
- Monsieur HERINANTENAINA Edmond Fils, Examineur
- Madame RABEHERIMANANA Lyliane, Rapporteur

**Soutenu le** : 25 juin 2016

**Année universitaire** : 2013 – 2014

## REMERCIEMENTS

*J'aimerais en premier lieu remercier Dieu qui m'a donné la volonté, la force et le courage pour la réalisation de ce travail,*

*Mes vifs et sincères remerciements vont à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire et plus particulièrement à :*

*Monsieur RASTEFANO Elisée, de présider le jury de ce mémoire ;*

*Monsieur RATSIMBA Mamy N., Monsieur RANDRIAMAROSON Rivo M., et Monsieur HERINANTENAINA Edmond Fils, d'en être les examinateurs ;*

*Monsieur ANDRIANAHARISON Yvon, Professeur Titulaire, Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo ainsi que tout le corps enseignant et le personnel administratif de l'établissement.*

*Et particulièrement à Madame RABEHERIMANANA Lyliane pour m'avoir encadré dans ce travail ;*

*Ma famille et mes amis.*

## **RESUME**

Le monde de la technologie ne cesse d'évoluer dans une recherche constante d'amélioration. Tel est le cas de la communication sans fil qui, après près d'une quarantaine d'année d'évolution, a conduit à l'adoption de la technologie LTE dont la rapidité de transmission de message et l'efficacité en sont les deux grands objectifs. La combinaison du système MIMO qui augmente la taille du canal de transmission et de l'OFDM pour le traitement du signal avec une grande largeur de bande constitue une des meilleurs systèmes pour atteindre ce niveau de performances. Toutefois, l'évolution étant toujours de mise, les technologies LTE Avancée et 5G sont déjà présents sur le marché des pays leaders en communication malgré le fait que LTE commence à peine à être mis en place à Madagascar.

**Mots clés** : Débit, canal, MIMO, OFDM

## TABLE DES MATIERES`

TABLE DES MATIERES` .....	iii
NOTATIONS .....	vi
ABREVIATIONS .....	vii
LISTE DES TABLEAUX .....	xii
LISTE DES FIGURES .....	xiii
INTRODUCTION GENERALE ET PRESENTATION DU PROBLEME .....	1
Chapitre 1 : HISTORIQUE ET LES FONDAMENTAUX DU LTE .....	2
1.1.Evolution de la téléphonie.....	2
1.1.1. Les débuts de la téléphonie .....	2
1.1.2. Le réseau GSM ou 2G .....	2
1.1.3. Réseau UMTS ou 3G .....	3
1.2.Le réseau LTE.....	4
1.2.1. L'architecture du réseau LTE.....	4
<i>a. Interface radio ou E-UTRAN</i> .....	5
<i>b. Cœur du réseau ou EPC</i> .....	7
1.2.2. Caractéristiques du LTE.....	7
Chapitre 2 : NOTION DE BASE SUR LE CANAL DE TRANSMISSION .....	11
2.1.Bases de la transmission de signal .....	11
2.1.1. Le Canal Radio Mobile .....	12
2.1.2. Perturbations liées au canal de transmission .....	12
2.1.3. Perturbations liées à la propagation des ondes radio .....	14
<i>a. Les mécanismes de propagation</i> .....	14
<i>b. La propagation multi-trajets</i> .....	15
2.1.4. La variabilité temporelle .....	15
2.1.5. Les types de canaux de propagations .....	15
2.1.6. La sélectivité d'un canal en fréquence .....	15
<i>a. Canal sélectif en fréquence</i> .....	15
<i>b. Canal non sélectif en fréquence</i> .....	15
2.1.7. La diversité.....	15
<i>a. Diversité temporelle</i> .....	16
<i>b. Diversité fréquentielle</i> .....	16
<i>c. Diversité spatiale ou diversité d'antennes</i> .....	16
2.2.Aperçu sur l'OFDM.....	17

2.2.1. La transmission multi-porteuse ou le MCM.....	17
2.2.2. Le Cyclic Prefix (CP).....	19
2.2.3. Diagramme de l'émission et de la réception OFDM.....	20
<i>a. Diagramme de l'émission OFDM</i> .....	20
<i>b. Diagramme de la réception OFDM</i> .....	21
2.2.4. La condition d'orthogonalité.....	21
2.2.5. OFDMA et le SC-FDMA.....	22
<i>a. OFDMA</i> .....	22
<i>b. SC-FDMA</i> .....	23
2.3. Aperçu sur le MIMO.....	23
2.3.1. Diagramme de représentation du système MIMO.....	23
2.3.2. Le code espace-temps en blocs STBC : le code ALamouti.....	25
2.3.3. La capacité du système MIMO.....	28
Chapitre 3: SYSTEME DE TRANSMISSION OFDM-MIMO.....	30
3.1. Le parcours suivi par le message dans le système MIMO-OFDM.....	31
3.2. Capacité du système MIMO-OFDM.....	32
3.3. Simulation d'un système MIMO- OFDM.....	32
3.3.1. Capacité du canal MIMO.....	32
3.3.2. Capacité du canal sous OFDM-MIMO.....	34
<i>a. Interface du logiciel de simulation</i> .....	34
<i>b. Les paramètres utilisés</i> .....	36
3.3.3. MIMO- OFDM sur une largeur de bande.....	37
<i>a. MIMO symétriques 2x2 et 4x4 avec OFDM</i> .....	37
<i>b. Canal OFDM-MIMO asymétriques 2x4 et 4x2</i> .....	38
<i>c. MIMO symétriques et asymétriques avec OFDM</i> .....	38
<i>d. Spectre du signal pour OFDM 1.4Mhz</i> .....	39
3.3.4. Canal OFDM-MIMO sur différents largeur de bande.....	40
<i>a. MIMO 4x4 sur différentes bandes de fréquence</i> .....	40
<i>b. Spectre du signal OFDM</i> .....	41
3.3.5. Conclusion.....	42
3.4. Etude de performance.....	42
CONCLUSION GENERALE.....	44
ANNEXE 1: CODAGE SPATIO-TEMPOREL.....	47
ANNEXE 2 : QPSK, 4QAM, 16QAM.....	50

ANNEXE 3 : EXTRAIT DE CODE SOURCE.....	53
ANNEXE 4 : TABLEAU DE DONNEES POUR LTE.....	59
REFERENCE.....	64

## NOTATIONS

### 1. Minuscules latines

k Nombre reel

l Nombre reel

y signal de sortie

h coefficient du canal

x le signal d'entre

### 2. Majuscules latines

T Temps

B bande de frequence

N nombre de sous porteuse

H matrice du canal  $N_t \times N_r$

C capacité theorique

$N_t$  Nombre d'antenne au niveau de l'émetteur

$N_r$  Nombre d'antenne au niveau récepteur

$T_U$  Durée symbole

$T_s$  temps de symbole

$B_s$  bande de Spectre

$T_d$  Temps de propagation normal

$T_c$  Temps du canal

$F_o$  Fréquence porteuse

### 3. Minuscules grecques

$\sigma_i$  Gain du  $i^{eme}$  canal

$\Delta$  Période d'observation (temps de garde)

#### 4. Majuscules grecques

$\Sigma$  somme

#### 5. Notations spéciales

$y(t)$  signal à la sortie

$x(t)$  signal instantané

$w(t)$  bruit

$X_k$  Coefficient de Fourier

$X_l$  Symbole de la  $l^{ieme}$  sous porteuse

$y(n)$  signal/symbol transmis à n canal

$h_{ij}$  Coefficients du canal

$P_i$  Puissance du  $i^{eme}$  symbole émis

$C_p$  Capacité du canal du sous porteuse p

$\rho_p$  Signal sur bruit de la sous-porteuse p

#### ABREVIATIONS

3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	Quatrième génération
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AMPS	Advanced Mobile Phone System
ARIB	Association of Radio Industries and Businesses
ASN.1	Abstract Syntax Notation One
ATIS	Alliance for Telecommunications Industry Solutions
ATM	Asynchronous Transfer Mode
AuC	Authentication Center
BBGA	Bruit Blanc Gaussien Additif

BER	Bit Error Rate
BPSK	Binary Phase Shift keying
BSC	Base Station Controller
BSC	Base Station Controller
BSS	Base Station Sub-system
BTS	Base Station
BTS	Base Transceiver Station
CAPEX	CAPital EXpenditure
CCSA	China Communications Standards Association
CDMA	Code Division Multiple Access
CP	Cyclic Prefix
CS	Circuit Switched (or Cyclic Shift)
CSI	Channel-State Information
DL	Down Link
DMUX	DeMultiplexer or DeMultiplexing
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
EIR	Equipment Identity Register
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
ETACS	Extended Total Access Communication System
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EUTRAN	Evolved-Universal Terrestrial Radio access network
E-UTRAN	Evolved-Universal Terrestrial Radio access network
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FFT	Fast Fourier Transform
FSC	Fournisseurs de Services de Communications

GGSN	Gateway GPRS Support Node
GPRS	Global Packet Radio Services
GSM	Global System for Mobile communications
HLR	Home location Register
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Acces
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform
IEC	International Electrotechnical Commission
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IMT	International Mobile Telecommunications
IP	Internet Protocol
ISO	International Organization for Standardization
l'IES	Interférence Entre Symboles
LTE	Long Term Evolution
LTSI	LTE/SAE Trial Initiative
MBMS	Multimedia Broadcast Multicast System
Mbps	Mégabit par seconde
MC-CDMA	Code Division Multiple Access
MCM	Multiple Carrier Modulated
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MISO	Multiple Input Single Output
MMS	Multimedia Messaging Service
MRC	Maximum Ratio Combining
MS	Mobile Station
MSC	Mobile Switching Center
MUX	Multiplexer or Multiplexing
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OMC	Operations and maintenance
OPEX	OPerational EXpenditure
OSTBC	Orthogonal Space Time Block Code
PAPR	Peak to Average Power ratio
PS	Packet Switched
PSTN	Public Switched Telephone Network
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
RAN	Radio Access Networks
RIF	Réponse Impulsionnelle Finie
RNC	Radio Network Controller
SC-FDMA	Single Carrier- Frequency Division Multiple Access
SGSN	Serving GPRS Support Node
SIMO	Single Input Multiple Output
SISO	Single Input Single Output
SMS	Short Message Service
SNR	Signal to Noise Ratio
SON	Self Optimized Networks
STBC	Space Time Block Code
TACS	Total Access Communication System
TDD	Time-Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TRX	Transceiver
TSG	Technical Specification Groups
TTA	Telecommunications Technology Association
TTC	Telecommunication Technology Committee

UE	User Equipment
UIT	Union Internationale des Télécommunications
UIT-D	Développement
UIT-R	International Telecommunications Union-Radiocommunications Sector
UIT-R	Secteur des Radiocommunications de l'Union Internationale des Télécommunications
UL	Up Link
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
USSD	Unstructured Supplementary Service Data
UTRA	Universal Terrestrial Radio Access
VLR	Visitor Location Register
WAP	Wireless Application Protocol
WCDMA	Wideband Code-Division Multiple Access
WiFi	Wireless Fidelity
WiMAX.	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Local Area Network

## LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1. 1</i> : Exigences pour l'obtention du débit maximal .....	7
<i>Tableau 1. 2</i> : Comparaison des caractéristiques des systèmes entre les générations.....	8
<i>Tableau 2. 1</i> : Types d'évanouissement et effets sur le signal .....	13
<i>Tableau 2. 2</i> : Mécanismes de propagation et leurs effets .....	14
<i>Tableau 2. 3</i> : Paramètres de l'OFDM .....	22
<i>Tableau 3. 1</i> : Paramètres de simulation .....	36
<i>Tableau 3. 2</i> : Variation la ressources en fonction de la largeur de bande.....	40

## LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1. 1</i> : Architecture du réseau GSM .....	3
<i>Figure 1. 2</i> : Architecture du réseau 3G.....	4
<i>Figure 1. 3</i> : Architecture du réseau LTE.....	5
<i>Figure 1. 4</i> : Architecture de l’interface radio ou E-UTRAN .....	5
<i>Figure 1. 5</i> : Composition de l’interface radio ou E-UTRAN .....	6
<i>Figure 1. 6</i> : Evolution de la téléphonie mobile.....	9
<i>Figure 1. 7</i> : L’évolution de la génération de la communication mobile.....	10
<i>Figure 2. 1</i> : Représentation d’un système de communication simple .....	11
<i>Figure 2. 2</i> : Répartition de la largeur de bande en sous -porteuse.....	18
<i>Figure 2. 3</i> : Transmission de symboles dans les deux systèmes.....	18
<i>Figure 2. 4</i> : Types de préfixe cyclique .....	19
<i>Figure 2. 5</i> : Principe d’acheminement du signal dans l’émetteur.....	20
<i>Figure 2. 6</i> : Principe d’acheminement du signal dans le récepteur .....	21
<i>Figure 2. 7</i> : Différence entre OFDM et OFDMA.....	22
<i>Figure 2. 8</i> : Canal MIMO $N_t \times N_r$ .....	23
<i>Figure 2. 9</i> : Canal MIMO avec entrée et sortie .....	24
<i>Figure 3. 1</i> : Modèle du système MIMO –OFDM.....	30
<i>Figure 3. 2</i> : La capacité du système MIMO.....	33
<i>Figure 3. 3</i> : Page d’accueil du logiciel de simulation.....	34
<i>Figure 3. 4</i> : Page de travail.....	35
<i>Figure 3. 5</i> : Interface de choix des paramètres de simulation.....	35
<i>Figure 3. 6</i> : MIMO symétrique 2x2 et 4x4 sur OFDM 1.4Mhz .....	37
<i>Figure 3. 7</i> : MIMO asymétrique 2x4 et 4x2 sur OFDM 1.4Mhz .....	38
<i>Figure 3. 8</i> : MIMO symétrique et asymétrique sur OFDM 1.5Mhz.....	39
<i>Figure 3. 9</i> : Spectre du signal OFDM dans le canal .....	39
<i>Figure 3. 10</i> : MIMO 4x4 sur OFDM a différentes largeurs de bande .....	40
<i>Figure 3. 11</i> : Forme du signal dans OFDM-MIMO sous 1.4Mhz.....	41
<i>Figure 3. 12</i> : Forme du signal dans OFDM-MIMO sous 10Mhz.....	41
<i>Figure 3. 13</i> : Forme du signal dans OFDM-MIMO sous 20Mhz.....	42
<i>Figure 3. 14</i> : Performance du canal MIMO.....	43

## **INTRODUCTION GENERALE ET PRESENTATION DU PROBLEME**

A l'heure où le monde devient de plus en plus "connecté" et où la communication mobile joue un rôle prépondérant dans la productivité humaine, l'évolution de la téléphonie mobile vient en réponse aux exigences grandissantes des consommateurs qui se résument très concrètement à : un accès illimité, une large couverture, un très haut débit et un coût abordable.

La Long Term Evolution ou LTE est la résultante actuelle de cette évolution. Le rapport 2016 du Global Mobile Suppliers Association sur l'évolution vers le LTE, focalisé sur le statut du marché du LTE à travers le monde, met en évidence les principaux faits et tendances de l'industrie mondiale des technologies hertziennes à travers le développement des réseaux LTE, LTE-Advanced et LTE-Advanced Pro dans plus de 150 pays.

La technologie LTE ouvre de nouvelles perspectives pour les opérateurs en téléphonie mobile. Cela se répercute au niveau de l'architecture des réseaux qui se simplifie tout en cherchant à amplifier et améliorer les performances afin de garantir une bonne qualité du signal, une plus longue portée et à un débit toujours plus élevé.

Le présent mémoire intitulé " ETUDE DE PERFORMANCE DE CANAL DU RESEAU LTE SOUS OFDM-MIMO" comment la technologie de multiplexage du système antenneur sur un système de communication sans fil de type Orthogonal Frequency Division Multiplexing ou OFDM, contribue à la performance des réseaux sans fil de la quatrième génération.

L'historique et les fondamentaux du LTE seront exposés dans le premier chapitre, le second chapitre traitera les systèmes de communication OFDM et MIMO. Et le dernier chapitre portera sur la performance du système de transmission MIMO associé à une modulation OFDM.

## Chapitre 1 : **HISTORIQUE ET LES FONDAMENTAUX DU LTE**

A partir du basculement au réseau d'accès mobile dans sa quatrième génération, on assiste à une accélération sans précédente de l'évolution de la technologie mobile sur une dizaine d'années seulement en comparaison au long cheminement de la téléphonie depuis son invention, il y a de cela 140 ans. Ce chapitre expose dans un premier temps ce cheminement de la téléphonie partant de la technologie initiale aux différentes successions de la technologie mobile de la première à sa quatrième génération. Par la suite, il se focalisera sur les fondamentaux du LTE à savoir ses caractéristiques, ses exigences ainsi que l'architecture réseau correspondant.

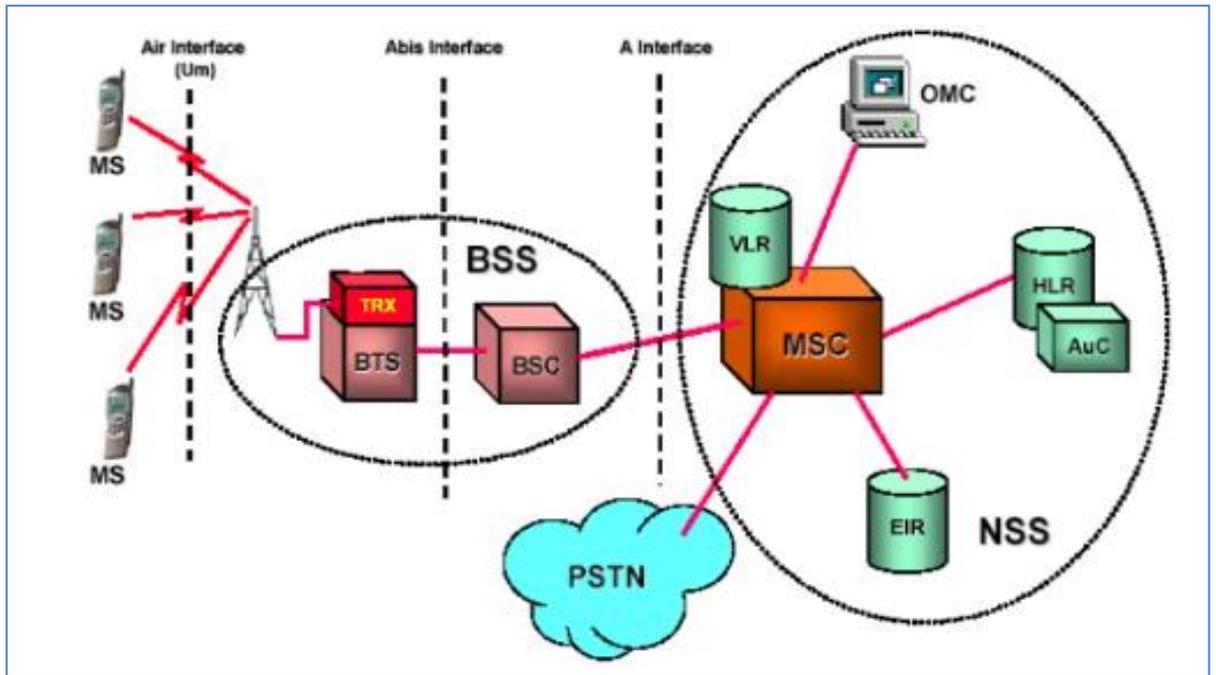
### **1.1. Evolution de la téléphonie**

#### **1.1.1. Les débuts de la téléphonie**

Le brevet pour l'invention du téléphone a été déposé en 1876, le même jour et indépendamment, par Alexander Graham Bell et Elisha Gray [1]. Il a permis de rendre la parole transmissible grâce à un câble électrique. La technologie sans fil est apparue vers les années 80 avec une portée limitée à une centaine de mètres.

#### **1.1.2. Le réseau GSM ou 2G**

Les premiers réseaux mobiles 2G, communément appelés réseaux GSM, ont été utilisés à partir de 1992 [2] en utilisant les bandes de fréquences 850 MHz et 1900 MHz. Ils présentent un taux de transfert de 9,6 kbit/s qui globalement fut non satisfaisant car étant assez limitatif. Appelé aussi 2.5G, le GPRS est apparu en 2000 [1], afin d'améliorer l'accès à Internet depuis le terminal avec un taux de transfert variant entre 21,4 et 171,2 kbit/s. Le débit de transmission est plus rapide, avoisinant en moyenne 48 kbit/s. La technologie radio EDGE ou 2.75 G, permet d'atteindre une moyenne de 171kbit/s. En résumé, le réseau mobile 2G et ses formes évolutives 2.5 G et 2.75 G utilisent la technologie radio GSM pour la téléphonie (appels vocaux et SMS) et la technologie GPRS/EDGE pour le transfert des données [3]. Comme illustré à la figure 1.1.

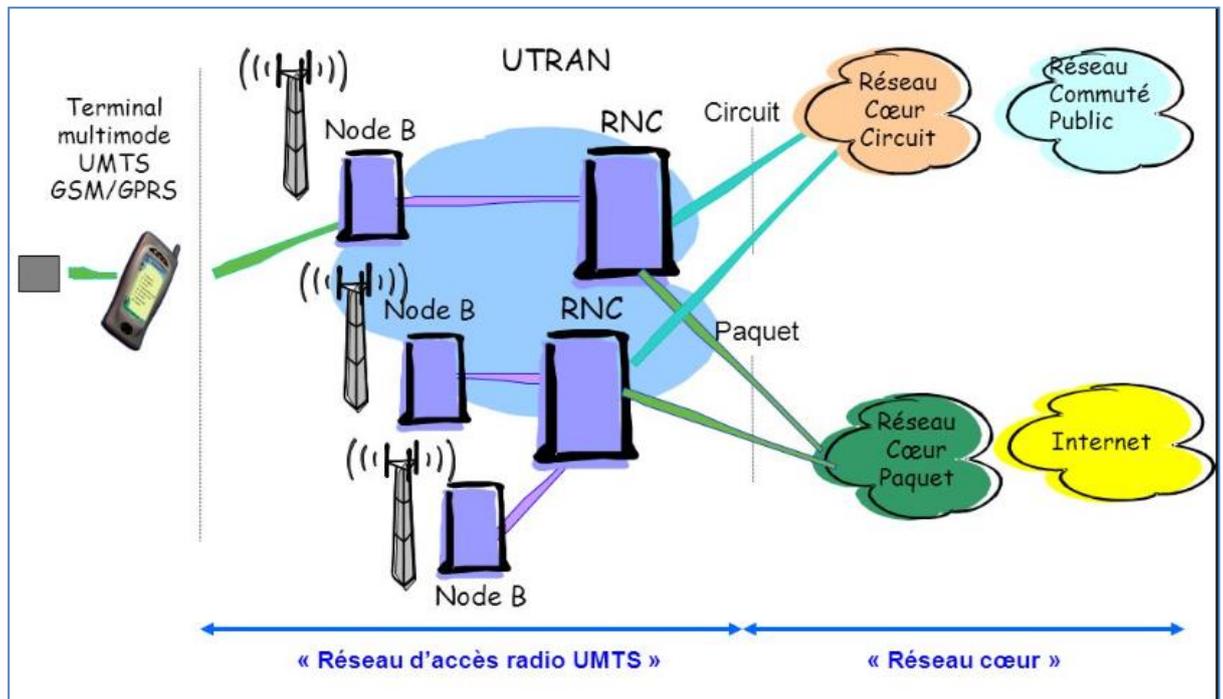


*Figure 1. 1: Architecture du réseau GSM*

### 1.1.3. Réseau UMTS ou 3G

Avec le réseau d'accès 3G appelé aussi UMTS le débit maximum est passé à 384 Kbit/s sur une fréquence de 900 Mhz et 2100 Mhz. En 2007, une mise à jour a permis de mettre sur le marché le réseau d'accès 3G+ ou HSPA avec un débit atteignant jusqu'à 14,4 Mbit/s. Une autre mise à jour, HSPA+ permet d'atteindre un débit de 28 Mbit/s et exploite la largeur de bande 5 MHz.

Trois principales limites ont été ainsi identifiées pour les réseaux 3G : les débits sont largement inférieurs à ceux nécessaires aux technologies de pointe, le temps de latence est faible  $\geq 30$  ms, complexité des terminaux. [4]



*Figure 1.2 : Architecture du réseau 3G*

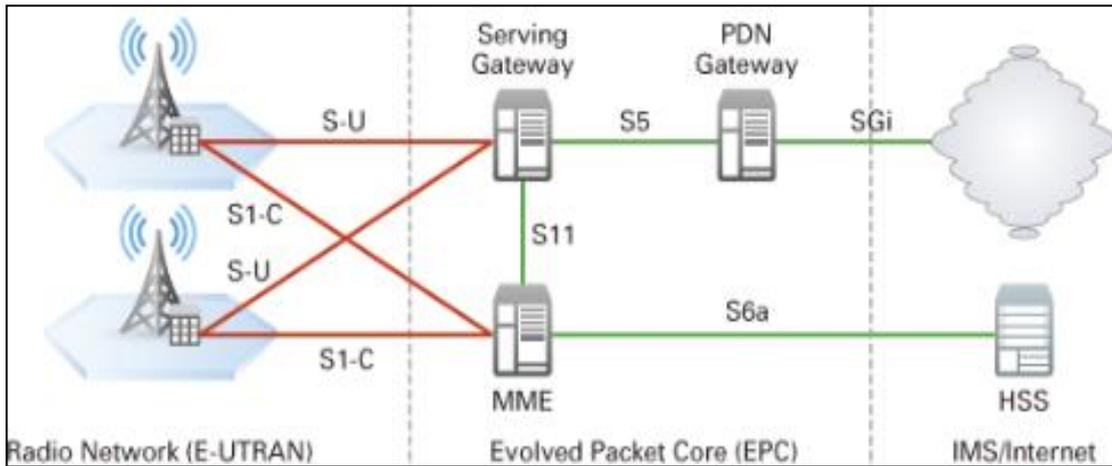
## 1.2. Le réseau LTE

Développé par l'organisme 3GPP, la nouvelle norme de radiocommunication LTE une évolution des technologies IMT (UMTS, HSPA, HSPA+) vient résoudre l'ensemble des limites évoquées.

La norme LTE est une évolution des normes de téléphonie mobile précédemment décrites. Elle a été développée afin de toujours parfaire l'expérience mobile des consommateurs. La grande révolution apportée par le réseau mobile 4G, utilisé à partir de 2008 et déployé en 2010, [5] vient du fait que toute donnée échangée et tout service offert notamment ceux liés à la téléphonie vocale et SMS se fait par paquets IP. Il s'agit d'un système en constante évolution d'une technologie globale avec les variantes FDD (Frequency Division Duplexing), utilisant de bandes de fréquences distinctes pour l'émission (upload) et la réception (download) des données, et TDD (Time-Division Duplex) qui en utilise une seule pour l'émission ou la réception des données.

### 1.2.1. L'architecture du réseau LTE

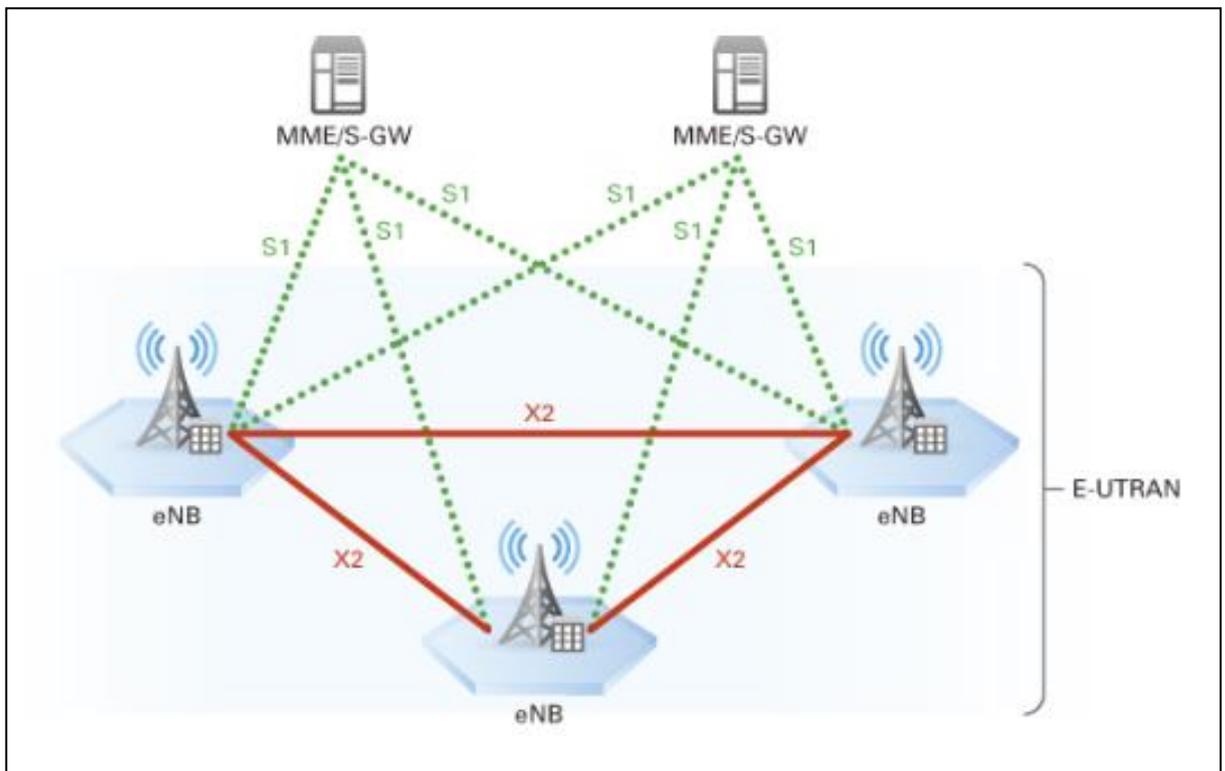
L'architecture est simple avec 2 nœuds uniquement. Les interfaces sont basées sur IP que ce soit pour le plan d'utilisateur ou pour le plan de contrôle. la technologie LTE n'utilise ainsi uniquement que le domaine PS optimisé. [6]



*Figure 1.3 : Architecture du réseau LTE*

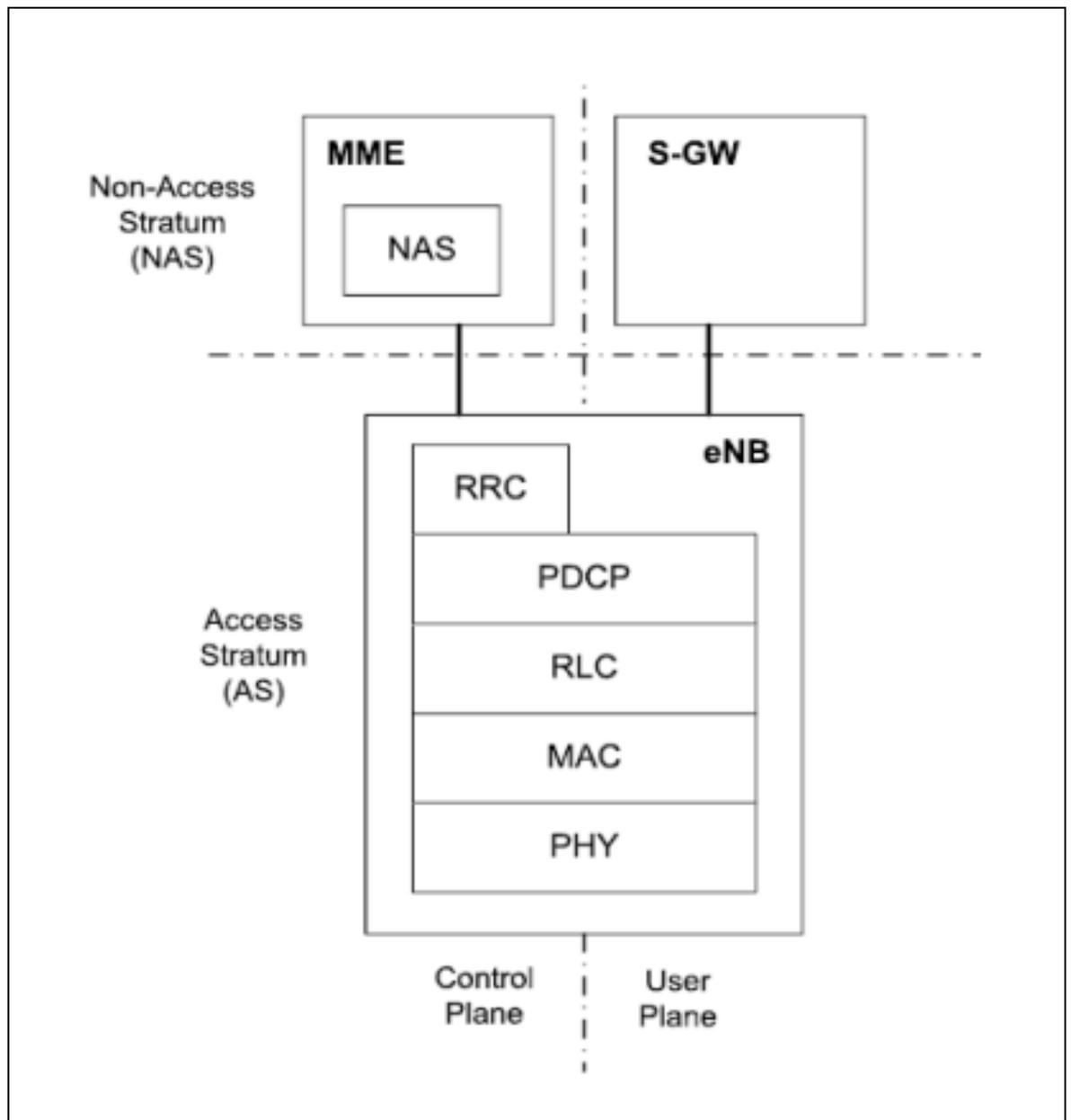
*a. Interface radio ou E-UTRAN*

Le réseau d'accès est constitué d'une seule entité E-Node B responsable de la transmission et de la réception radio avec le terminal. L'interface radio permet la manipulation de la retransmission, la flexibilité du spectre, les modes FDD et TDD, la transmission multi-antenne et la programmation en fréquence.



*Figure 1.4 : Architecture de l'interface radio ou E-UTRAN*

Il est composé du RRC (Radio Resource Control) qui assure une qualité de service en contrôlant les ressources. Du PPPC (Packet Data Protocol Convergence), elle assure la compression et décompression des données afin de les acheminer dans le réseau, du RLC (Contrôle de liaison radio). Et enfin de celui qui est chargée de la transmission effective des signaux ; elle est constituée d'équipements supportant les technologies OFDMA et SC-FDMA appeler la couche physique (PHY).



***Figure 1.5 : Composition de l'interface radio ou E-UTRAN***

**b. Cœur du réseau ou EPC**

L'EPC est un réseau plat de base en technologie IP qui peut être utilisé grâce à l'accès radio 3GPP (UMTS, HSPA, HSPA+, LTE) et l'accès radio non-3GPP, permettant des procédures de transfert à l'intérieur et entre les deux types d'accès. Les principales composantes de l'EPC sont l'Entité gestion de la mobilité (MME), la Passerelle de Service ou Serving Gateway(S-GW) et le Packet Data Network Gateway (PDN-GW) ou Passerelle Réseaux de Paquets de Données. [7]

**1.2.2. Caractéristiques du LTE**

Le débit théorique est de 300 Mbit/s en DL et de 75 Mbit/s en UL. Les débits réels avoisinent 100 Mo en DL et 50 Mo en UL pour une allocation de fréquences de 20 MHz.

Les exigences suivantes s'appliquent lors de l'obtention du débit maximal :

**Tableau 1. 1 : Exigences pour l'obtention du débit maximal**

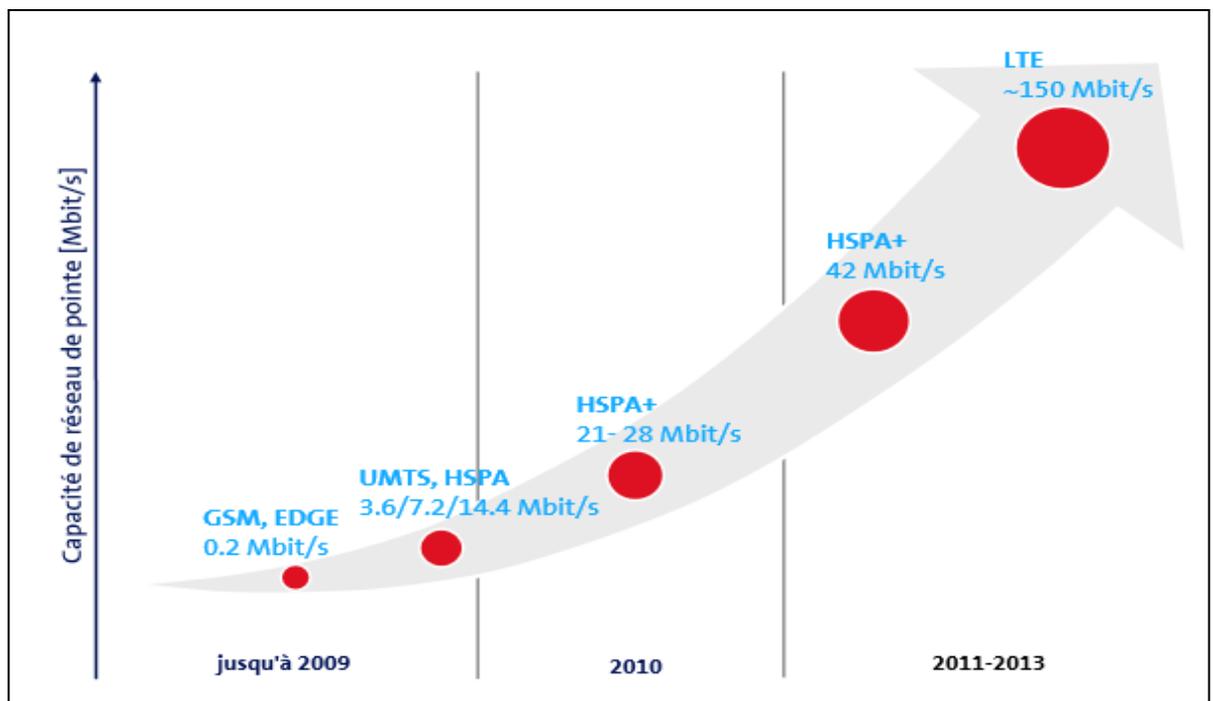
<b>Caractéristiques</b>	<b>DL</b>	<b>UL</b>
Débit de données théorique	300 Mbit/s	75 Mbit/s
Débit sur la couche physique	173 Mo	57 Mo
Fréquence FDD	20 Mhz	20 Mhz
Modulation	64 QAM	64 QAM
Technologies	OFDMA	SC- FDMA
Systèmes antennaires	Minimum MIMO 2 x 2	Minimum MIMO 2 x 2

Les caractéristiques suivantes sont à considérer : en termes de capacités, on arrive à atteindre entre 200 à plus de 400 utilisateurs simultanés pour une allocation de fréquences de 5 à 20 MHz, le temps de latence est largement réduit : 10-20 ms pour le plan d'utilisateur et <100 ms pour le plan de contrôle. On peut utiliser une bande passante évolutive de 1.4 Mhz jusqu'à 20 Mhz. On peut avoir 2 à 4 fois plus d'efficacité du spectre comparée à celle de HSPA en utilisant OFDM dans LTE. Globalement, elle est trois à quatre fois supérieure en DL et deux à trois fois supérieure en UL.

**Tableau 1. 2 : Comparaison des caractéristiques des systèmes entre les générations**

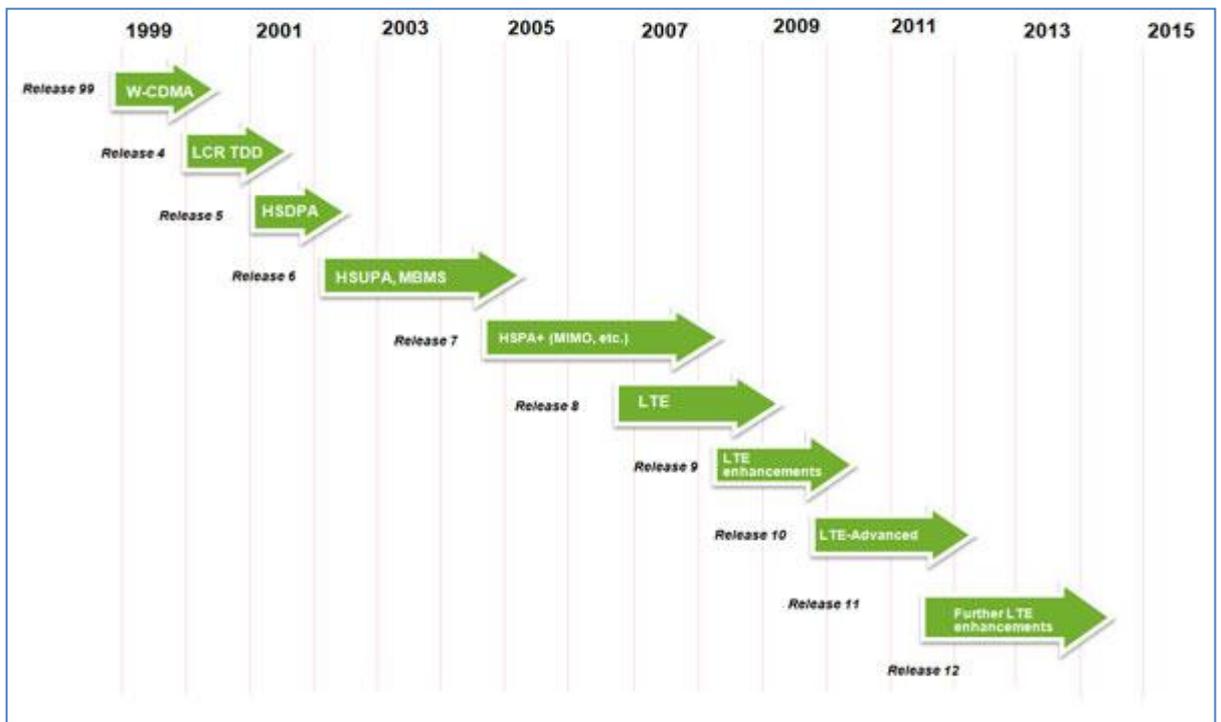
Réseaux d'accès	2G			3G			4G	
	1992	2000	2002	2005	2007		2010	2011
Technologies	2G	2.5G	2.75G	3G	HSPA	HSPA+	4G	4G+
Réseau téléphonie	GSM	GSM	GSM	GSM	GSM	GSM	EPC	
Réseau Internet	GSM/WAP	GPRS	EDGE	GPRS	GPRS	GPRS	EPC	
Débits	9,6 kbps	48 kbps	171 kbps	384 kbps	14,4 - 5,75 Mbps		300 - 75 Mbps	

En bref, par rapport aux technologies précédentes, le réseau LTE permet : la simplification le réseau d'accès radio en limitant le nombre de nœuds à 2, l'augmentation du débit, la réduction temps de latence, l'amélioration de l'efficacité du spectre, une meilleure flexibilité au regard de la bande de fréquences sur laquelle le système va être déployé, la migration du domaine CS vers le domaine PS optimisé, la minimisation des points de défaillance localisés, l'interopérabilité des équipements avec les anciens systèmes, d'avoir tout le réseau basé sur IP et l'amélioration de la puissance du terminal.



*Figure 1.6 : Evolution de la téléphonie mobile*

Les travaux spécifiques du 3 GPP ont permis d'agrégier les nouvelles technologies avec les systèmes OFDM et MIMO avec chaque version correspondantes (release).



*Figure 1.7 : L'évolution de la génération de la communication mobile*

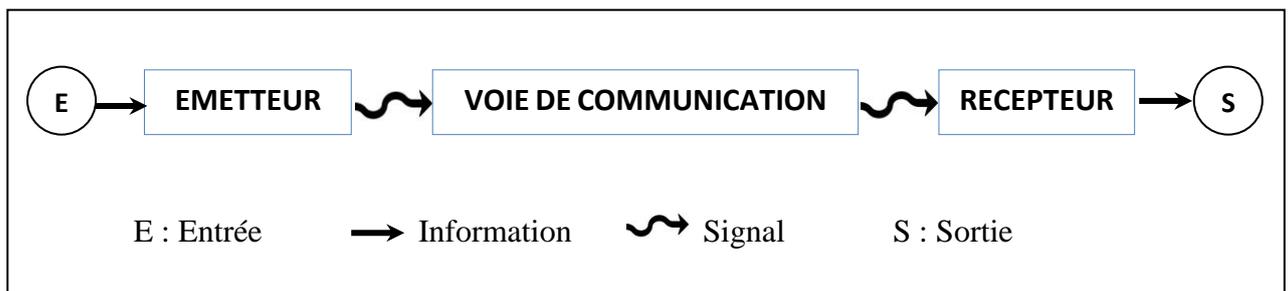
## Chapitre 2 : NOTION DE BASE SUR LE CANAL DE TRANSMISSION

La définition des mécanismes de base de la transmission du signal sera abordée en premier lieu dans ce chapitre qui présentera par la suite un aperçu théorique des modulations multi-porteuses OFDM et du système MIMO d'antennes multiples à l'émission et à la réception. Le chapitre précédent a en effet permis d'entrevoir que ces deux éléments clés sont déterminants pour supporter les performances du système LTE et assurer une bonne qualité de service et des débits de données satisfaisants.

En effet, pour le cas des technologies sans fil et toujours dans la recherche de débits plus élevés, le développement technologique se heurte à la limitation de la bande fréquentielle et perturbations intrinsèques aux canaux de transmission. Les principes de diversité spatiale et de diversité fréquentielle, respectivement à la base des systèmes MIMO et OFDM s'avèrent être très efficaces pour solutionner ces problèmes qui affectent les performances des systèmes. Par définition, la technologie OFDM permet d'augmenter l'efficacité du spectre tandis que la technologie MIMO permet une bonne robustesse de la transmission de données.

### 2.1. Bases de la transmission de signal

Par définition, un système de communication est constitué de 3 éléments principaux que sont l'émetteur, la voie de communication et le récepteur. L'émetteur traite l'information entrante pour le la convertir en signal (électrique, optique ou radioélectrique) qui est transmis par une voie de communication [7] (fibre optique, une ligne de transmission ou un espace radio électrique) au récepteur qui le convertira à son tour en information sortante utilisable.



*Figure 2.1* : Représentation d'un système de communication simple

### 2.1.1. Le Canal Radio Mobile

Le canal de propagation est ainsi utilisé pour la transmission d'un signal de la source vers la destination [8]. La relation d'un canal et du signal transmis est fonction de deux paramètres à savoir :

- le temps de symbole  $T_s$  qui correspond à la durée du symbole,
- la bande  $B_s$  qui correspond à l'occupation spectrale de l'information transmise.

Le canal de propagation joue un rôle important car de ce canal dépendent les performances des systèmes de communication sans fil. En effet, toute transmission ne se fait pas sans qu'il y ait des perturbations intrinsèques au canal qui affectent le signal transmis [11]. Ces perturbations dégradent et limitent les performances et capacités des systèmes de communication.

### 2.1.2. Perturbations liées au canal de transmission

Les perturbations liées au canal de transmission peuvent être causées par le bruit additif et l'évanouissement [9]. Le bruit additif est un signal qualifié de parasite, aléatoire et non désiré se superposant aux signaux utiles. Tandis que l'évanouissement est une atténuation de la puissance du signal perceptible soit au fur et à mesure que le signal électromagnétique se propage dans l'espace, soit par l'existence d'obstacles fixes sur le chemin de propagation ou ombrage, soit par un effet combiné de la multitude de parcours de propagation, des mouvements rapides des unités émettrices et réceptrices et des obstacles causé notamment par l'interférence d'au moins deux versions du signal transmis qui arrivent au récepteur avec un léger décalage temporel [10] [11] .

**Tableau 2. 1 : Types d'évanouissement et effets sur le signal**

Type	Phénomène	Effet sur le signal
<b>EVANOUISSEMENTS TEMPORELS</b>		
Evanouissements rapides	Provoqués par les réflexions d'objets proches et/ou leurs déplacements relatifs. $T_s \gg T$ : le canal est sélectif en temps :	Changement rapide de la réponse du canal.
Evanouissements lents	Existence d'ombrage entre l'émetteur et le récepteur. $T_s \ll T_c$ : le canal est non sélectif en temps.	Affaiblissement du signal.
<b>EVANOUISSEMENTS FREQUENTIELS</b>		
Canal sélectif en fréquence	$B_s \gg B$ : le canal sélectif en fréquence	Spectre du signal déformé en dehors de la bande de cohérence avec génération d'Interférence entre Symbole
Evanouissement plats	$B_s \ll B_c$ .	Toutes les fréquences du spectre du signal subissent les mêmes amplifications ou atténuations
<b>EVANOUISSEMENTS SPATIAUX</b>		
Evanouissements à grande échelle	Résultant de mouvements sur des grandes espaces et nuancé par les contours proéminents et les éléments du relief : montagnes, maisons, etc.	Atténuations de la puissance moyenne du signal dues à la distance entre émetteur et récepteur ou aux obstacles.
Evanouissements à petite échelle	Variation de l'amplitude et de la phase suite à des légers changements (de l'ordre de la demi-longueur d'onde) dans le positionnement des entités communicantes.	Dispersion ou étalement du signal dans le temps et la variation du comportement du canal.

Dans le cas des évanouissements à petite échelle, les deux types d'évanouissement suivant l'existence ou non de visibilité entre l'émetteur et le récepteur a été distingué. Si la ligne de vue est directe, l'évanouissement de petite échelle est dit de Rayleigh. Dans le cas contraire, il s'agit de l'évanouissement de RICE [17].

### 2.1.3. Perturbations liées à la propagation des ondes radio

Lorsqu'un signal est émis, il se propage dans plusieurs directions et subit des modifications suivant les obstacles se trouvant dans l'environnement de propagation (bâtiments, arbres, voitures pour l'environnement d'extérieur et meubles ou murs pour l'intérieur) entre la source et la destination.

#### *a. Les mécanismes de propagation*

Lors de la propagation, les signaux peuvent subir des phénomènes physiques de réflexion, de réfraction ou de diffraction et de diffusion [9].

**Tableau 2. 2 : Mécanismes de propagation et leurs effets**

<b>Phénomènes</b>	<b>Obstacles</b>	<b>Effet sur le signal</b>
Réflexion	Surface lisse de très grandes dimensions par rapport à sa longueur d'onde : murs, bâtiments, sol, etc.	Une partie ou toute l'onde repart vers son origine.
Réfraction ou diffraction	Corps dense de dimension comparable avec la longueur d'onde ou par une surface possédant des irrégularités pointues : sommets, collines et bâtiments, etc.	Les ondes sont déviées, il y a formation d'ondes secondaires derrière le corps obstruant.
Diffusion	Objets de petites dimensions par rapport à la longueur de l'onde (panneaux de signalisations, arbres, véhicules, etc.) ou	Dispersion des ondes et étalement de l'énergie dans toutes les directions.

### ***b. La propagation multi-trajets***

Généralement, dans la plupart des environnements et notamment en milieu urbain, il n'y a pas de ligne de vue directe entre l'émetteur et le récepteur. Les ondes reçues proviennent donc de différents trajets selon les obstacles trouvés sur leur trajectoire et après avoir subi les différents phénomènes précédemment décrits.

#### 2.1.4. La variabilité temporelle

Il s'agit du décalage de temps entre l'arrivée du signal et son émission. Les variations induisent une fréquence de décalage entre la fréquence de l'onde émise et la fréquence de l'onde reçue : il s'agit de l'effet Doppler [12].

#### 2.1.5. Les types de canaux de propagations

Il existe trois types de canaux de propagation : le canal avec bruit blanc gaussien additif, Le canal avec évanouissements et le canal de Rayleigh. Ce dernier regroupe c'est-à-dire il regroupe les deux canaux décrits précédemment.

#### 2.1.6. La sélectivité d'un canal en fréquence

La notion de sélectivité du canal est relative et elle dépend de la largeur de bande du signal et de l'étalement du délai du canal [16].

### ***a. Canal sélectif en fréquence***

Le canal est dit sélectif en fréquence quand le signal transmis  $x(t)$  occupe une bande de fréquence plus large que la bande de cohérence du canal de propagation (définie comme l'inverse du temps de retard maximum du canal de propagation).

### ***b. Canal non sélectif en fréquence***

Lorsque la bande du signal est très petite par rapport à la bande cohérente, le canal est dit non sélectif en fréquence ce qui est aussi le cas lorsque le récepteur n'est capable de distinguer qu'un seul trajet de propagation.

#### 2.1.7. La diversité

La diversité consiste à transmettre plusieurs répliques de la même information sur plusieurs canaux avec puissance comparable et évanouissement indépendant. A la réception, il y aurait au moins un ou plusieurs signaux non atténués. Les techniques de diversité s'avèrent très

efficaces pour réduire l'impact de ces problèmes sur les performances des systèmes dont principalement les évanouissements causés par les trajets multiples du canal de transmission pour avoir une meilleure qualité du signal reçu.

Les principales techniques de diversité étudiées dans le cadre de ce travail sont la diversité, temporelle, fréquentielle et spatiale.

**a. Diversité temporelle**

Elle est utilisée pour combattre l'évanouissement sélectif en temps. La diversité temporelle consiste à émettre plusieurs copies du signal dans des intervalles temporelles. Le principal désavantage est le retard induit par la diversité, et la baisse de débit correspondant.

**b. Diversité fréquentielle**

Elle est efficace lorsque les évanouissements du canal sont sélectifs en fréquence. Avec la diversité fréquentielle, les copies du signal sont émises sur plusieurs fréquences porteuses. La diversité fréquentielle peut être exploitée par l'utilisation d'une modulation multiporteuse 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 diversité est utilisée dans les systèmes OFDM.

**c. Diversité spatiale ou diversité d'antennes**

La diversité spatiale consiste à l'utilisation des antennes multiples à l'émission et/ou à la réception dans une idée de séparer les sources. Les antennes sont séparées dans l'espace par un minimum de distance appelée distance de cohérence fréquent. Cette dernière garantit un évanouissement indépendant et varie en fonction de l'angle de départ et/ou d'arrivée des multi-trajets.

Sur la base des observations réalisées, lorsque le nombre d'antennes émettrices et le nombre d'antennes réceptrices augmentent, la capacité du système augmente. Le fait d'associer plusieurs antennes à l'émission et la réception à la fois, forme ainsi le système multi antennaire dont connus sous le nom de MIMO (pour Multi Input Multi Output) et qui permettent d'atteindre de hauts degrés de diversité.

## **2.2. Aperçu sur l'OFDM**

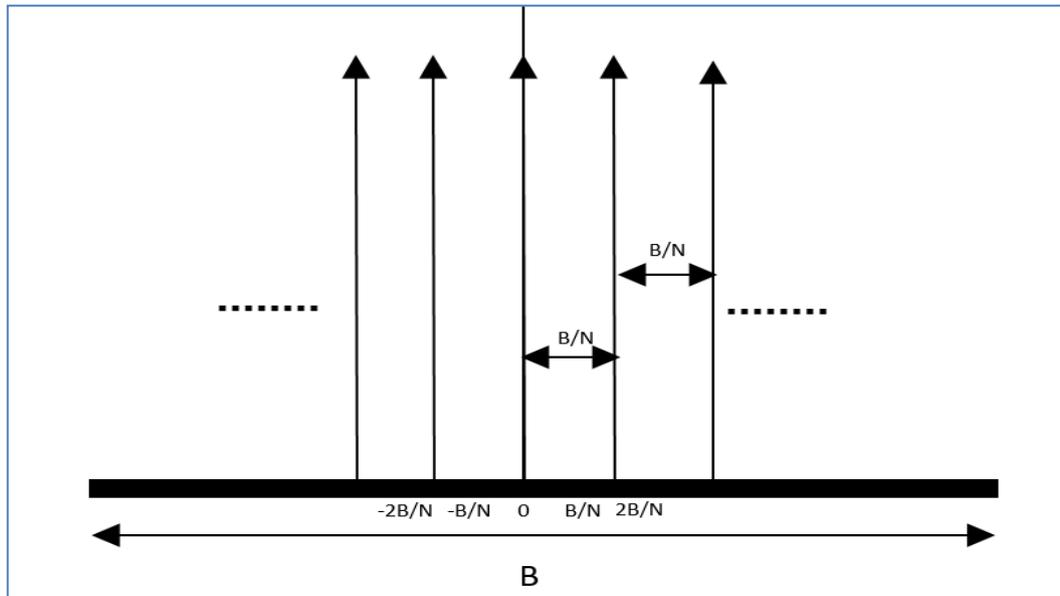
OFDM est une technologie de modulation multi-porteuse [16] conçue pour assurer la fiabilité de la communication sur la liaison descendante. Les systèmes performants telles que LTE, WIMAX, World Wide Interoperability for Microwave Access ou encore LTE-Advance sont basées sur OFDM [13]. Les flux de données sont répartis sur plusieurs sous-porteuses orthogonales. Le partage de largeur de bande permet d'éliminer les interférences ce qui fait que plus la bande est large, plus la performance de la liaison est bonne

### **2.2.1. La transmission multi-porteuse ou le MCM**

Avec le principe exposé ci-dessus, on passe d'un système à une seule porteuse à un système à N sous-porteuses à bande étroite. Il s'agit de la transmission multi-porteuse ou Multiple Carrier Modulated (MCM) qui est la base de l'OFDM.

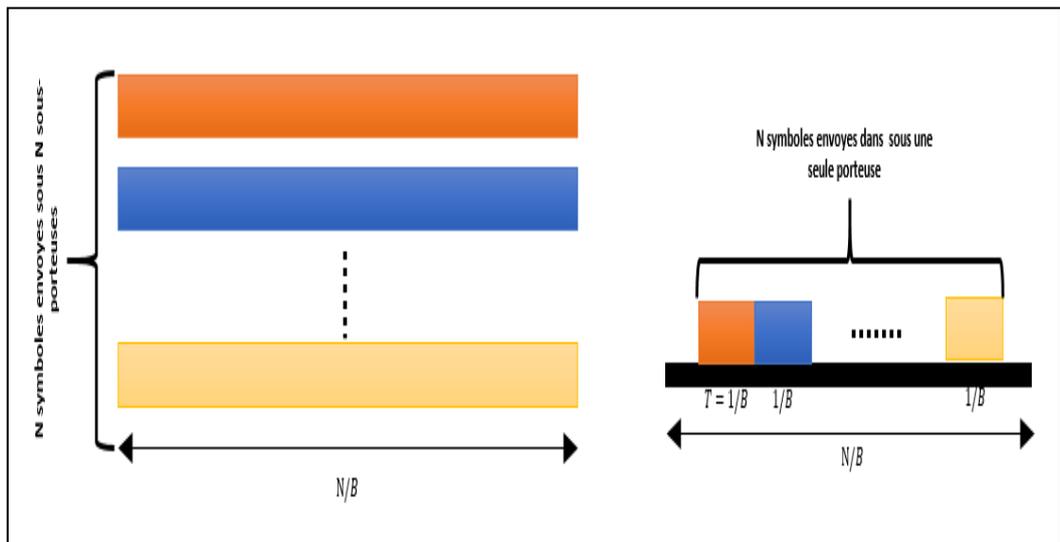
Les systèmes de transmission multi-porteuse ont été proposés comme alternatives aux évanouissements de signal face au caractère très sélectif du canal de transmission qui se trouve être très limitatif en haut débit. Cette technique permet de répartir les symboles à transmettre sur un grand nombre de sous-porteuses orthogonales chacune ayant une bande passante beaucoup plus réduite. Le temps de transmission de symbole sur chacune des sous-porteuses se trouve ainsi augmenté permettant donc de réduire l'IES entre les symboles d'une même porteuse [13][14]. Ce système est plus résistant à la sélectivité fréquentielle du canal puisqu'un symbole n'occupe qu'une faible bande passante.

Dans la transmission multi-porteuse, on a des multiples bandes sous-porteuses espacées de fréquence  $F_0$ . On a ainsi une sous porteuse à N fréquences (*Figure 2. 2*)



**Figure 2. 2 : Répartition de la largeur de bande en sous -porteuse**

Pour un système à simple bande porteuse, de largeur de bande  $B$ , on a  $T=1/B$  ce qui signifie que chaque symbole a un temps de transmission  $1/B$ . Sur un laps de temps  $N/B$ ,  $N$  symboles sont donc transmis. Avec le système à transmission multi-porteuses, chaque symbole dans chaque sous porteuse a  $N/B$  temps de symbole. Pour transmettre  $N$  symboles avec  $N$  sous-porteuses, le temps du symbole reste  $N/B$  mais les  $N$  symboles sont transmis en parallèle dans les  $N$  sous porteuses. Une multitude de transmission est réalisée dans des sous-canaux parallèles entre l'émetteur et le récepteur.



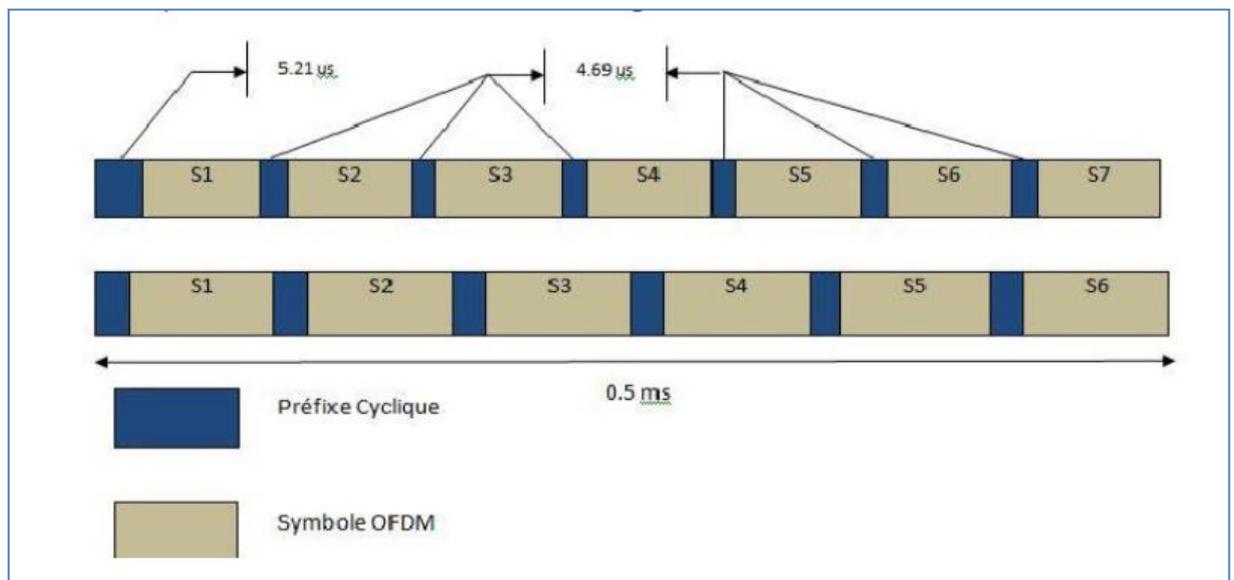
**Figure 2. 3 : Transmission de symboles dans les deux systèmes**

Dans le système OFDM, les N symboles ou flux de données sont repartis en plusieurs sous flux de données parallèles, qui seront modulés puis portés par des sous bandes orthogonales différentes. Par la suite, la transformée de Fourier Rapide Inverse (IFFT) véhicule le signal par le biais des différents sous-canaux et s'occupe de la recomposition du message à la réception. L'augmentation de la durée symbole ou le cyclic prefix accroît la robustesse de l'OFDM face au temps de propagation dû aux trajets multiples.

### 2.2.2. Le Cyclic Prefix (CP)

Le cyclic préfixe est un intervalle de garde placé en entête. Cette technique consiste à copier la dernière partie du symbole pour la durée du temps de garde en l'attachant en avant du symbole. Son rôle de garde est double : il permet d'une part d'absorber l'interférence entre paquets, mais également de périodiser le signal transmis.

Deux tailles de CP sont permises pour le système de transmission sans fil dont le CP court ou normal ( $5,21\mu\text{s}/4,69\mu\text{s}$ ) et le CP long ( $16,67\mu\text{s}$ ). Dans le réseau LTE, le choix dépend du type de cellule et du temps de propagation, pour les macrocellules, le CP long est utilisé, tandis que le CP court est utilisé pour les microcellules.



*Figure 2. 4 : Types de préfixe cyclique*

### 2.2.3. Diagramme de l'émission et de la réception OFDM

Pour la transmission de message, plusieurs opérations décrites ci-après sont réalisées dans les différents blocs de l'émetteur et du récepteur de l'OFDM.

#### *a. Diagramme de l'émission OFDM*

Du côté de l'émetteur, les opérations suivantes se succèdent : envoi du symbole  $X(0) X(1) \dots X(N-1)$  dans les sous-porteuses ; conversion du signal de série en parallèle par démultiplexage ou DEMUX qui sert basiquement à envoyer les signaux dans les sous-porteuses pour l'opération IFFT/FFT ;  $N$  symboles sont générés par le IFFT/FFT en  $x(0), x(1), \dots, x(N-1)$  et vont être convertis de parallèle en série par une opération qui s'appelle de S/P, le MUX ou le multiplexage ; et à la fin, ajout du Cyclique Prefix pour avoir  $x(N-\bar{L}) \dots x(N-2)x(N-1)x(0)x(1), \dots x(N-1)$ . Après toutes ces opérations, les symboles sont acheminés dans le canal [10] [18] [21].

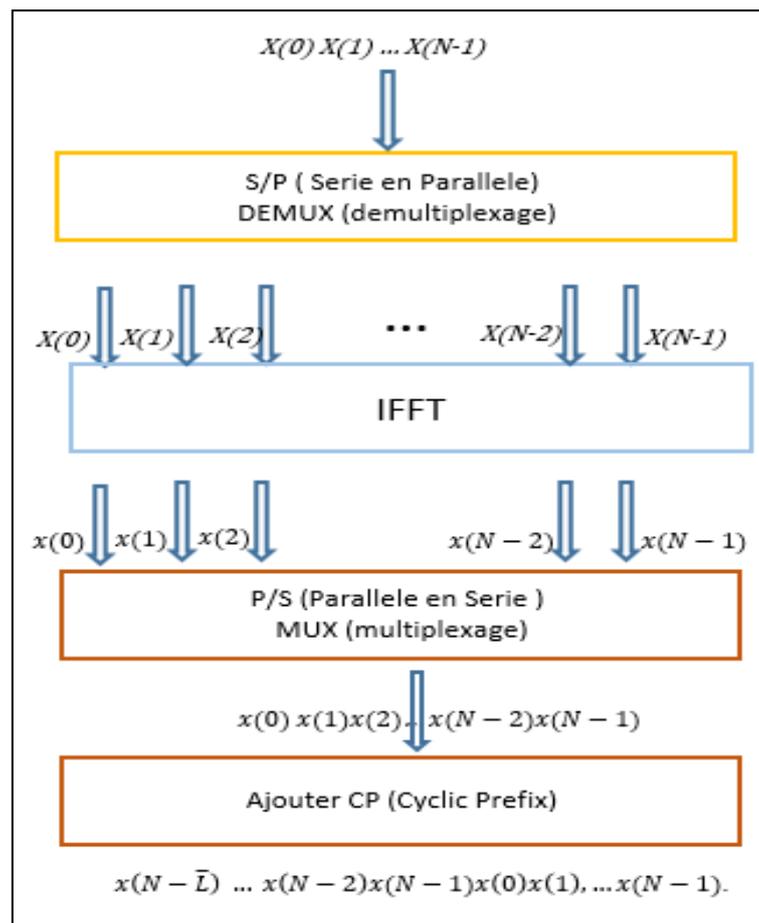
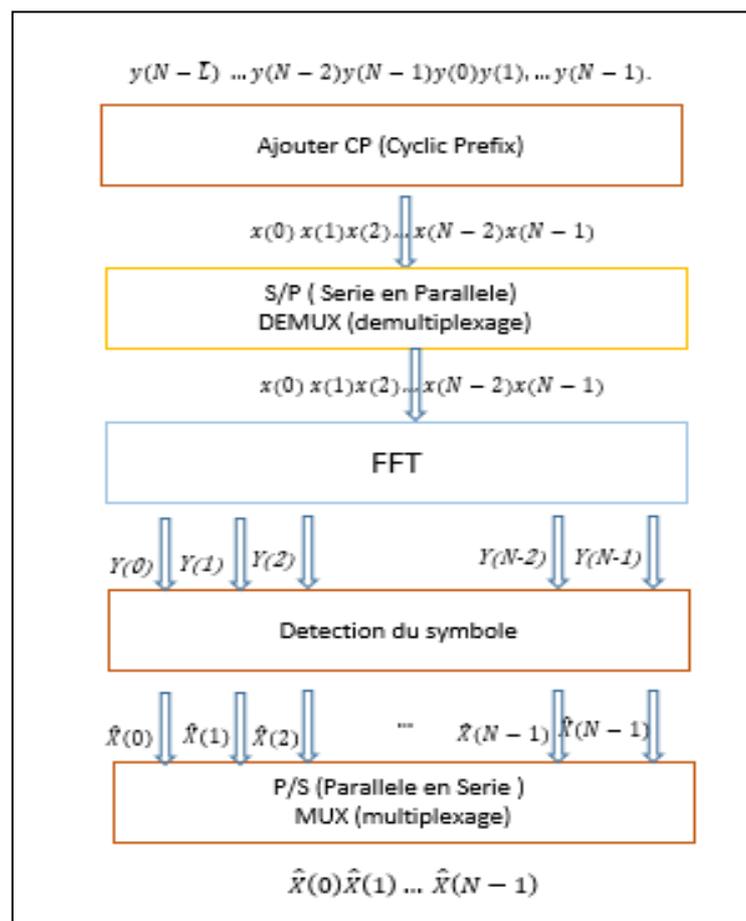


Figure 2. 5 : Principe d'acheminement du signal dans l'émetteur

**b. Diagramme de la réception OFDM**

Du côté de la réception, à la sortie du canal de transmission : le Cyclic Prefix du symbole est enlevé et on aura à la sortie  $y(0), y(1), \dots, y(N - 1)$  ; puis il y a par la suite conversion de série en parallèle par DMUX ; puis le symbole est réceptionné à la sortie du DMUX en étant généré par le FFT en  $Y(0), Y(1), \dots, Y(N - 1)$ , une détection du symbole est réalisée pour avoir  $\hat{X}(0)\hat{X}(1) \dots \hat{X}(N - 1)$  à la sortie, vient après et enfin la conversion de parallèle en série ou le MUX.



**Figure 2. 6 : Principe d’acheminement du signal dans le récepteur**

**2.2.4. La condition d’orthogonalité**

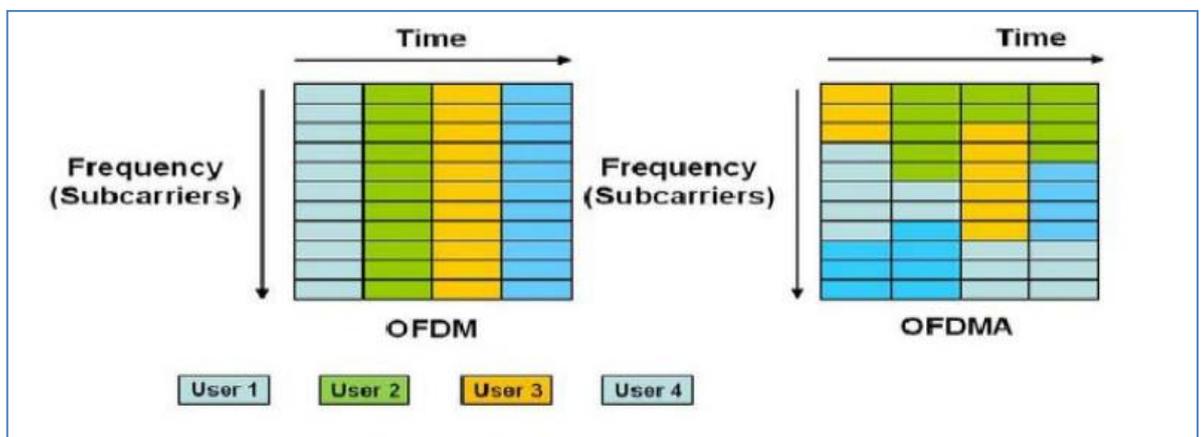
Le système est dite orthogonal car premièrement, l’espace inter-porteuse permet, lorsque le spectre d’une sous-porteuse est maximal, d’annuler les spectres de toutes les autres. Ainsi, les spectres des sous -portuses peuvent se recouvrir sans engendrer d’interférences, Le spectre d’une sous-porteuse, modulant une donnée pendant une fenêtre de temps est la transformée de Fourier de cette fenêtre. Et deuxièmement, dans la bande occupée par les sous-porteuses, le

spectre est presque plat, ce qui démontre une efficacité spectrale optimale autrement dit le spectre du signal OFDM est la somme des spectres de chacune des sous- porteuses.

### 2.2.5. OFDMA et le SC-FDMA

#### a. *OFDMA*

OFDMA est une technique dérivée de l'OFDM qui utilise le même principe de division de la bande passante en plusieurs sous- porteuses. La différence entre l'OFDM et l'OFDMA est que la première ne peut servir qu'un usager dans chaque intervalle de temps, par contre OFDMA peut servir plusieurs usagers dans un même intervalle de temps, comme le montre la *Figure 2. 7* ci-dessous.



*Figure 2. 7 : Différence entre OFDM et OFDMA*

On a vu dans le précédent chapitre que le réseau LTE utilise les bandes de fréquence large entre 1.4Mhz jusqu'à 20Mhz, les paramètres de l'OFDM dans chaque largeur de bande sont indiqués dans le *Tableau 2. 3* suivant :

*Tableau 2. 3 : Paramètres de l'OFDM*

Transmission BW	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Durée sous-trame (Ts)	0.5ms					
Espacement sous-porteuses	15KHz					
Fréquence d'échantillonnage	1.4 MHz	3.84 MHz	7.68 MHz	15.36MHz	23.04 MHz	30.72 MHz
Taille FFT	128	256	512	1024	1536	2048
Nombre de sous-porteuses occupées	73	181	301	601	901	1201

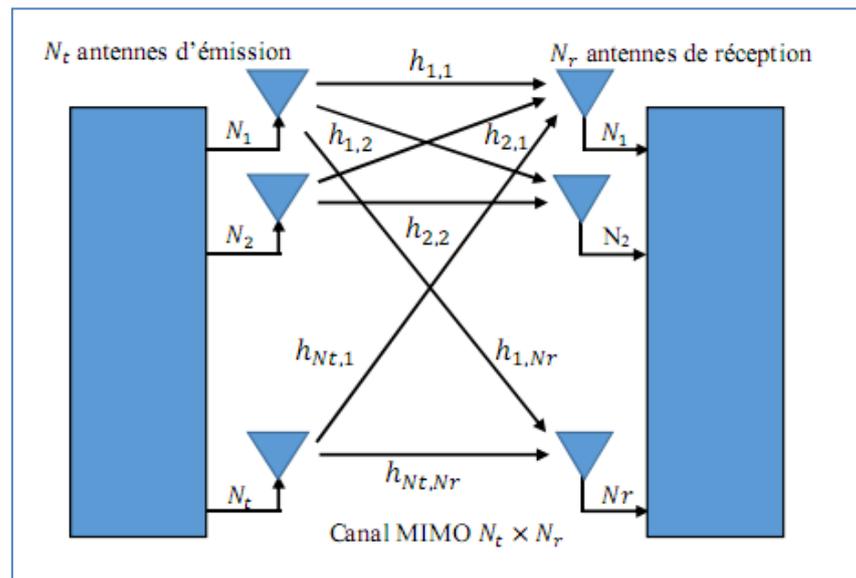
## b. SC-FDMA

Le SC-FDMA, est une technique d'accès multiple qui combine la technique de transmission mono-porteuse SC/FDE et une allocation de ressource radio par répartition de fréquences FDMA [18]. Il a été récemment proposé dans le cadre des normes 3GPP LTE pour les communications à voix montante c'est à dire des terminaux des utilisateurs à l'instar des téléphones portables ou "User Equipement" (UE) aux "Base Station" (BS). Son principal avantage est son faible "Peak Power Ratio" ou PAPR, très bénéfique à la réduction de la consommation énergétique des appareils mobiles [13] [23].

## 2.3. Aperçu sur le MIMO

### 2.3.1. Diagramme de représentation du système MIMO

Dans un système MIMO, on distingue T multiples antennes du côté de l'émetteur et R multiples antennes du côté du récepteur reliées par un canal à trajets multiple (**Figure 2. 8**) d'où sa qualification de Multiple Input Multiple Output.



**Figure 2. 8 : Canal MIMO Nt x Nr**

Le MIMO résulte d'une collection de plusieurs nombres de trajets multiples entre des combinaisons multi-antennes des côtés du récepteur et/ou de l'émetteur. L'augmentation du nombre d'antennes permettrait l'augmentation des fiabilités.

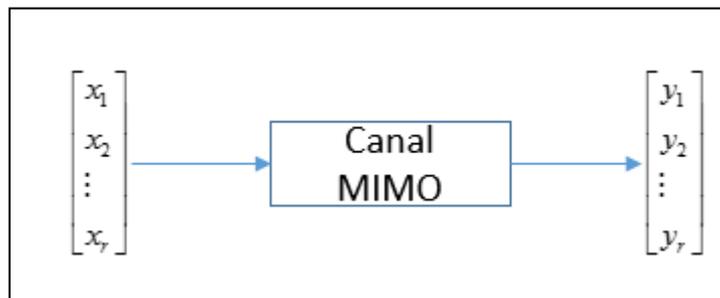
Avec plusieurs antennes des côtés de l'émetteur et/ou du récepteur, l'aspect est très différent sur les diversités [19]. Il est alors possible de transmettre un large volume de données, sans

utiliser la technique de multiplexage [8]. Pour cela, on utilise une autre méthode appelée multiplexage spatial qui consiste à envoyer ces données en parallèle dans une dimension plutôt que d'exploiter les fréquences et le temps.

Aussi, avec, du côté de l'émetteur, une multitude d'antennes  $N_t$ , on peut transmettre  $t$  symboles. On écrira  $x_1 x_2 \dots x_t$  symboles et on les considèrera comme vecteurs dimensionnels à transmettre dans le canal MIMO.

Du côté du récepteur, on a  $N_r$  antennes réceptrices et donc on reçoit  $y_1 y_2 \dots y_r$ , vecteurs dimensionnels reçus dans le canal MIMO.

On a ainsi le vecteur transmis  $\bar{x} = x_1 x_2 \dots x_t$ , (vecteur dimensionnel  $N_t$ ) et le vecteur reçu  $\bar{y} = y_1 y_2 \dots y_r$  (vecteur dimensionnel  $N_r$ )



*Figure 2. 9 : Canal MIMO avec entrée et sortie*

En conclusion, MIMO est le canal qui transforme le  $N_t$  vecteur dimensionnel en  $N_r$  vecteur dimensionnel, c'est une matrice de transformation.

On peut écrire :

$$\bar{y} = H \cdot \bar{x} + \bar{w} \quad (2. 1)$$

Avec :

$H$  est la matrice de transformation  $N_t * N_r$

$\bar{y}$  : Vecteur dimensionnel output

$\bar{x}$  : Vecteur dimensionnel input

$\bar{w}$  : Vecteur de bruit Gaussien

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_r \end{bmatrix}$$

$$\bar{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_r \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{t1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{r1} & \cdots & h_{rt} \end{bmatrix}$$

$$\bar{w} = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_r \end{bmatrix}$$

Le canal MIMO est donc une matrice  $H$  de dimension  $Nr * Nt$ , avec  $Nr$  nombre d'antennes réceptrices et  $Nt$  nombre d'antennes émettrices. Il s'agit d'une matrice à  $Nr$  lignes et  $Nt$  colonnes correspondants à chaque antenne. Le coefficient  $h_{ij}$ , est le coefficient du canal correspondant à l'antenne réceptrice  $i^{eme}$  et l'antenne émettrice  $j^{eme}$ . Il y a un seul coefficient pour une paire d'antenne.

Le total du coefficient dans un canal MIMO est de  $Nr * Nt$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{t1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{r1} & \cdots & h_{rt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_r \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Prenons l'exemple où  $h_{32}$  est le coefficient du canal entre la 3<sup>ème</sup> antenne du côté de la réception et la 2<sup>ème</sup> antenne du côté de l'émission et  $h_{23}$ , le coefficient entre la 2<sup>ème</sup> antenne Rx et la 3<sup>ème</sup> antenne Tx.

Cas exceptionnelles :

- Pour  $Nt=1$  et  $Nr=1$  : on a le système appelé SISO ou Single input Single Output
- Pour  $Nt > 1$  et  $Nr=1$  : le système est appelé MISO Multiple Input Single Output
- Pour  $Nt=1$  et  $Nr > 1$  : le système est SIMO ou Single Input Multiple Output

### 2.3.2. Le code espace-temps en blocs STBC : le code ALamouti

Le problème qui pose est de connaître le statut de l'information du canal dans la transmission, plus précisément du côté de l'émetteur avant l'envoi des symboles. Comme les techniques de "water-filling", "beamforming" et "MRC" et nécessitent une connaissance du canal à

l'émission et à la réception, la solution est d'utiliser le code espace-temps en blocs ou Space Time Block Code (STBC) [26], qui ne considère pas l'information du canal à l'émission et de déterminer un codage espace-temps.

Cela signifie que les données à émettre sont à répartir sur les différentes antennes émetteurs et au cours du temps, pour améliorer les performances, c'est-à-dire qu'il faut maximiser le débit en minimisant les erreurs [27]. C'est la fonction de mappage entre le signal à transmettre et le symbole à l'entrée résultante.

Ce STBC est le code le plus généralement utilisé dans le système MIMO [26]. Le code Alamouti, l'objet de notre étude dans ce paragraphe est un code espace-temps en blocs. Ce code a été inventé par Alamouti en 1998 comme étant le premier code espace-temps orthogonal en blocs à rendement unitaire. Ce codage est utilisable sans savoir l'information concernant le statut du canal ou le coefficient du canal d'émission, pour cette raison il est facile d'utilisation dans les cas pratique [20].

Prenons un système MISO,  $1 \times 2$  dont  $r = 1$  et  $t = 2$ .

Le système s'écrit :

$$y = [h_1 \ h_2] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + w \quad (2.3)$$

Dans un premier temps, le symbole  $x_1$  est transmis par l'antenne 1, et le symbole  $x_2$  de l'antenne 2. Le symbole transmis est :

$$y_1 = [h_1 \ h_2] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + w_1 \quad (2.4)$$

Par la suite, on va transmettre les mêmes symboles mais  $-x_2^*$  est transmis avec l'antenne 1 et  $x_1^*$  avec l'antenne 2. On a :

$$y_2 = [h_1 \ h_2] \begin{bmatrix} -x_2^* \\ x_1^* \end{bmatrix} + w_2 \quad (2.5)$$

$$y_2 = -h_1 x_2^* + h_2 x_1^* + w_2^* \quad (2.6)$$

$$y_2^* = -h_1^* x_2 + h_2^* x_1 + w_2 \quad (2.7)$$

$$y_2^* = \begin{bmatrix} h_2^* & -h_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + w_2^* \quad (2.8)$$

Après combinaison des deux formules Au premier instant on a eu la formule 2.44, et au deuxième instant on a 2.48, on a :

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2^* \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Il peut être donc dénoter:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2^* \end{bmatrix} = [\bar{c}_1 \quad \bar{c}_2] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2^* \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$\bar{y} = \bar{c}_1 x_1 + \bar{c}_2 x_2 + \bar{w} \quad (2.11)$$

On va voir les propriétés des deux colonnes de la matrice  $\bar{c}_1$  et  $\bar{c}_2$ .

$$\bar{c}_1 = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2^* \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \bar{c}_2 = \begin{bmatrix} h_2 \\ -h_1^* \end{bmatrix}$$

On observe que :

$$\bar{c}_1^H \bar{c}_2 = [h_1^* \quad h_2] \begin{bmatrix} h_2 \\ -h_1^* \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\bar{c}_1^H \bar{c}_2 = h_1^* h_2 - h_2 h_1^* = 0 \quad (2.13)$$

Ce qui veut dire que  $\bar{c}_1$  et  $\bar{c}_2$  sont des vecteurs orthogonaux géométriques.

Comme  $\bar{c}_1, \bar{c}_2$  sont orthogonaux, le code Alamouti est un code espace-temps orthogonal en bloc ou OSTBC.

Le symbole reçu possède la structure suivante :

$$\bar{y} = \bar{c}_1 \check{E}1 + \bar{c}_2 x_2 + \bar{w} \quad (2.14)$$

$$\frac{\bar{c}_1^H}{\|\bar{c}_1\|} \bar{y} = \frac{\bar{c}_1^H}{\|\bar{c}_1\|} (\bar{c}_1 x_1 + \bar{c}_2 x_2 + \bar{w}) \quad (2.15)$$

$$\frac{\bar{c}_1^H}{\|\bar{c}_1\|} \bar{y} = \frac{\bar{c}_1^H \bar{c}_1}{\|\bar{c}_1\|} x_1 + \frac{\bar{c}_1^H \bar{c}_2}{\|\bar{c}_1\|} x_2 + \frac{\bar{c}_1^H \bar{w}}{\|\bar{c}_1\|} \quad (2.16)$$

$$\frac{\bar{c}_1^H}{\|\bar{c}_1\|} \bar{y} = \|\bar{c}_1\| x_1 + 0 + \frac{\bar{c}_1^H \bar{w}}{\|\bar{c}_1\|} \quad (2.17)$$

$$\frac{\bar{c}_1^H}{\|\bar{c}_1\|} \bar{y} = \|\bar{c}_1\| x_1 + \bar{w} \quad (2.18)$$

On a :

$$SNR = \frac{\|c_1\|^2 E\{|x_1|^2\}}{\sigma^2} \quad (2.19)$$

Donc

$$SNR = \frac{\|\bar{h}\|^2 E\{|x_1|^2\}}{\sigma^2} \quad (2.20)$$

Il nous reste à trouver la puissance du symbole  $x_1$  émis.

La puissance totale des deux symboles est égale à P, donc la puissance doit être divisée en deux pour l'émission des deux symboles, c'est-à-dire :

$$\{x_1\|^2\} = E\{|x_2\|^2\} = \frac{P}{2} \quad (2.21)$$

La puissance finale du code Alamouti est :

$$SNR = \frac{\|\bar{h}\|^2 \frac{P}{2}}{\sigma^2} \quad (2.22)$$

$$SNR = \frac{1}{2} \|\bar{h}\|^2 \frac{P}{\sigma^2} \quad (2.23)$$

Et on sait que le SNR avec le système MRC s'écrit

$$SNR_{MRC} = \|\bar{h}\|^2 \frac{P}{\sigma^2} \quad [20] \quad (2.24)$$

$$SNR = \frac{1}{2} SNR_{MRC} \quad (2.25)$$

Donc la moitié du SNR est obtenue qu'avec le MRC.

Dans le système beamforming, on a eu le même SNR qu'avec le MRC mais le système nécessite de connaître l'information et le statut du canal [22]. Le code Alamouti ne tient pas compte de l'information du canal ou le Channel State Information (CSI) de l'émission et que le SNR du MRC est le double de l'Alamouti code. On perd 3dB par rapport aux deux systèmes MRC et Beamforming mais Alamouti reste pratique car le décodage est simple [26].

En conclusion, Alamouti est orthogonal. Cette orthogonalité facilite le décodage du côté récepteur et ne considère pas l'information du canal.

### 2.3.3. La capacité du système MIMO

L'objectif principal des systèmes de communication sans fil est de transmettre le plus haut débit possible avec la plus grande fiabilité. Le débit de transmission est fonction de la

capacité du canal qui est représentée par un nombre de données maximum transmises, à chaque instant. La fiabilité de la transmission, quant à elle, est associée à la probabilité d'erreur qui est inversement liée au rapport signal sur bruit. La capacité des systèmes MIMO est étudiée afin de déterminer les débits théoriques pouvant être attendus de ces systèmes.

On considère un système MIMO composé de  $N_t$  antennes à l'émission et de  $N_r$  antennes à la réception. On note le vecteur de taille contenant les symboles envoyés et  $y$  le vecteur contenant les symboles reçus. La relation qui relie  $x$  et  $y$  s'écrit alors :

$$y = Hx + w \quad (2.26)$$

Où  $H$  est la matrice du canal de taille  $N_t * N_r$  et  $w$  est le vecteur de bruit. La capacité du canal MIMO s'écrit alors :

$$C = \log_2(\det(I_m + \rho H Q H^*)) \quad (2.27)$$

Dans cette formule  $I_m$  est la matrice identité,  $\rho$  est le rapport signal sur bruit et  $Q$  est la matrice de corrélation des symboles émis. Lorsque l'émetteur n'a aucune connaissance du canal, la capacité maximale n'a pour expression :

$$C = \sum_{i=1}^{N_t} \log_2(1 + \frac{\rho}{N_t} \lambda_i) \quad (2.28)$$

$\lambda_i$  sont les valeurs les valeurs propres de  $H^* H$ .

La connaissance de la capacité dépend de l'état du canal. On peut les étudier dans trois domaines. Le premier domaine correspond aux techniques nécessitant une connaissance du canal à l'émission et à la réception comme les techniques de "water-filling" et de "beamforming". La deuxième est la technique nécessitant une connaissance du canal à la réception comme les techniques à multiplexage spatial et les codes espace-temps. La dernière est la technique ne nécessitant ni la connaissance du canal à la réception ni à l'émission comme les techniques de codes espace-temps différentiels.

Ce qui nous intéresse est la technique à multiplexage spatiale et les codes espaces temps.

Le chapitre suivant nous indiquera les simulations et les résultats quand on combine le canal avec les deux systèmes OFDM-MIMO

### Chapitre 3: SYSTEME DE TRANSMISSION OFDM-MIMO

Comme il a été observé auparavant, les systèmes à antennes multiples jouent un rôle important dans le développement des systèmes de communication futurs à large bande. Grâce aux trajets multiples entre l'émetteur et le récepteur, les effets d'atténuation du canal sont réduits d'une façon significative. Il a aussi été observé que la modulation OFDM est une méthode pratique pour s'affranchir de l'IES qui exploite cette large bande de fréquence. Ce dernier chapitre de l'étude montre comment la configuration MIMO associée à la technique OFDM apporte une amélioration significative des performances surtout sur la capacité. Pour la suite, il est important de considérer dans notre travail cette association MIMO-OFDM qui sera décrite dans ce qui suit. [17]

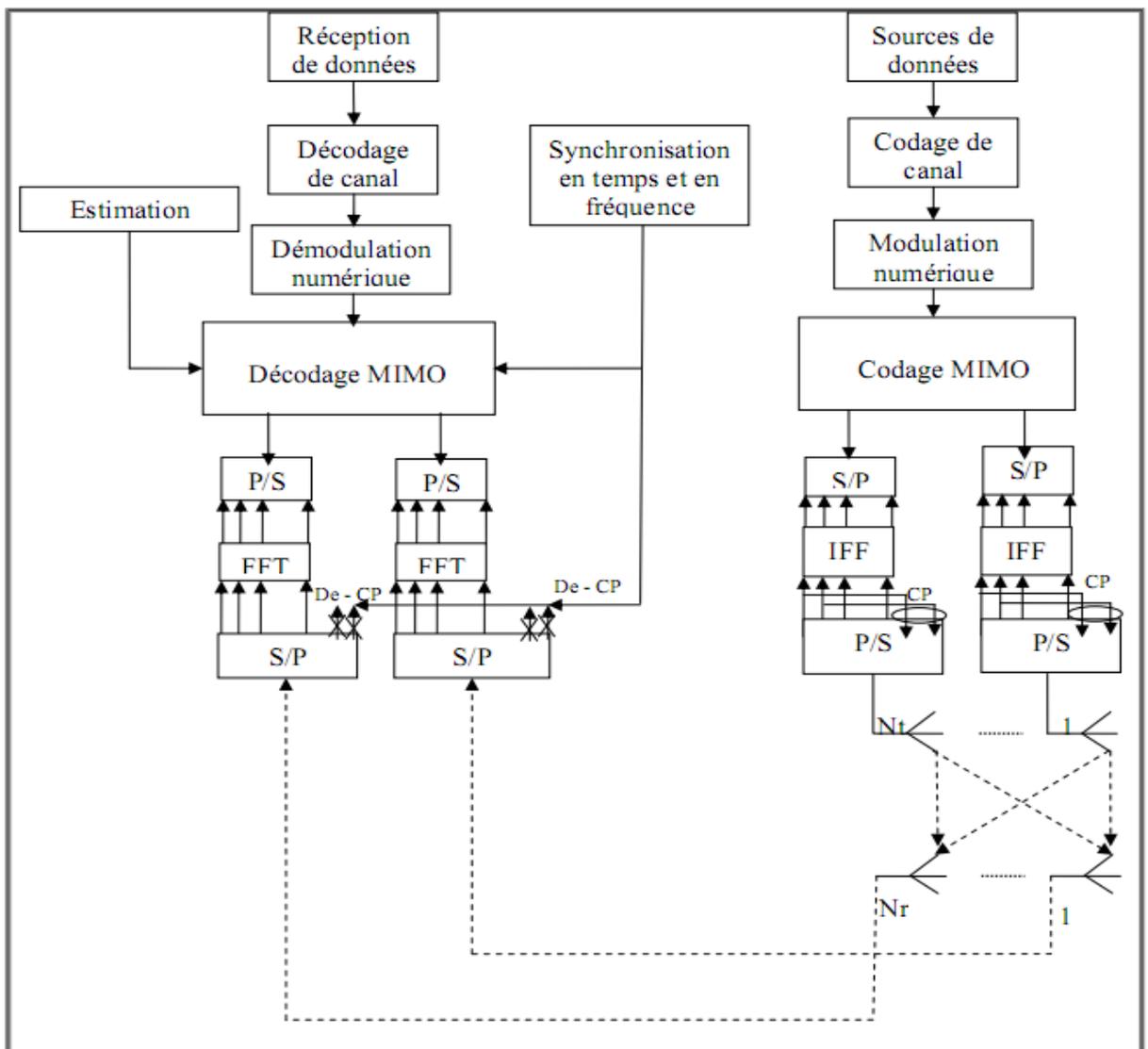


Figure 3.1 : Modèle du système MIMO –OFDM

Pour rappel, la modulation OFDM a pour principe de répartir le flux binaire sur un ensemble de sous- porteuses transmettant chacune des débits réduits. En émission nous avons les étapes de conversion de série en parallèle, la transformée de Fourier inverse, l'insertion d'un intervalle de garde (CP). En réception, les opérations inverses sont effectuées : la conversion de parallèle en série, la suppression de l'intervalle de garde, l'opération de la transformée de Fourier directe et la conversion de parallèle en série.

### **3.1. Le parcours suivi par le message dans le système MIMO-OFDM**

- a) Le message analogique à envoyer sera changé en un signal numérique de séquence binaire avec le minimum de bit possible par le code source. Cette opération n'est pas mise en compte par le système MIMO.
- b) La séquence binaire résultante est ensuite passée au codeur canal. Pour se débarrasser des bruits, interférences, on ajoute des bits de redondance qui peuvent être utilisés au niveau du récepteur.
- c) La séquence binaire sera ensuite modulée numériquement soit par BPSK, QPSK ou par QAM.
- d) Les symboles complexes sont par la suite mappés afin d'être transmis sur les antennes de transmission et à travers les ressources orthogonales du canal [18]. Comme le système MIMO étudié considère la modulation OFDM, l'utilisation d'un modulateur spatio-temporel s'avère être une option à considérer afin de profiter des ressources en espace, temps et fréquence présents.
- e) Finalement, les symboles passent à travers le modulateur OFDM avant d'être filtrés par le filtre limiteur de bande (passe bande).
- f) Le signal analogique résultant est transmis à travers le canal radio, où il se trouve affecté par les atténuations dues aux réflexions et aux réfractions du signal dans le milieu de propagation.
- g) A la réception, le récepteur à antennes multiples est constitué d'un filtre adapté au filtre passe bande utilisé à l'émission, du démodulateur OFDM, du décodeur spatio-temporel, du démodulateur numérique, du décodeur canal et du décodeur source.

### **3.2. Capacité du système MIMO-OFDM**

Les systèmes de transmission MIMO permettent d'atteindre des capacités très importantes grâce à l'exploitation de la diversité spatiale du canal. L'utilisation du système OFDM dans un système MIMO permet de s'affranchir de cette contrainte, simplement en assurant un temps de garde supérieur. Les données à émettre sont démultiplexées en  $T$  voies indépendantes, pour être émises sur chaque antenne.

En réception, le signal de chaque sous-porteuse est séparé, antenne par antenne, à l'aide de démodulateurs OFDM. Pour chaque sous-porteuse, le signal des différentes antennes est démodulé avec un récepteur MIMO classique. Au final, les données des récepteurs MIMO sont multiplexées dans l'ordre initial. Le canal MIMO large bande est modélisé par matrices  $H_p$  ( $N_r \times N_t$ ), chaque matrice correspondant à la réponse du canal pour la fréquence de la sous-porteuse. Si  $x_p$  est le vecteur symbole émis par la sous-porteuse, alors le vecteur reçu correspondant par la suite de l'application des codes espace-temps sur chaque sous canal [24].

Le modèle du signal pour la  $p$  sous porteuse s'écrit de la façon suivante :

$$y_p = H_p x_p + w_p \quad (3.1)$$

La capacité théorique

$$C = \frac{1}{p} \sum_{p=1}^p C_p \quad (3.2)$$

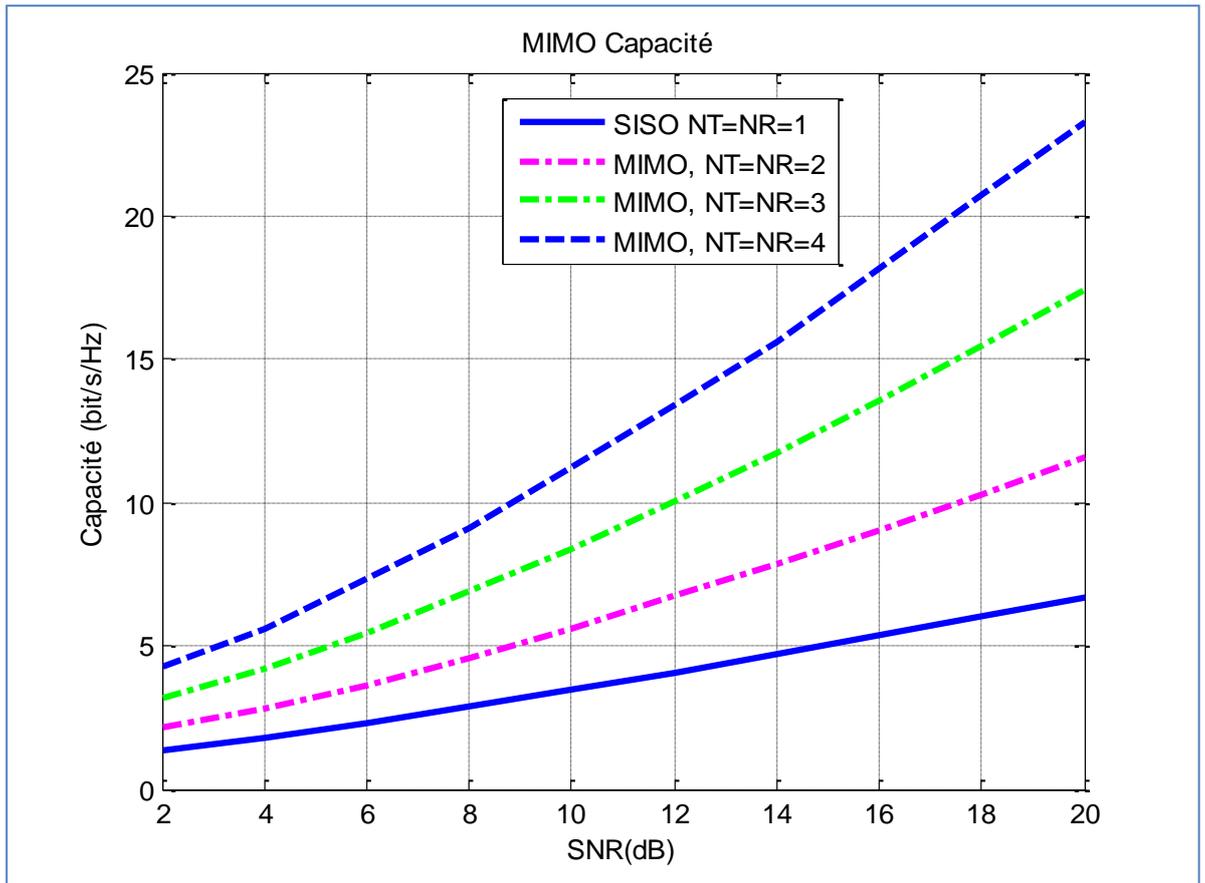
$C_p$  représentant la capacité du canal pour la sous-porteuse  $p$ .

### **3.3. Simulation d'un système MIMO- OFDM**

#### **3.3.1. Capacité du canal MIMO**

La capacité d'un canal MIMO avec  $N_t$  antennes d'émission et de  $N_r$  antennes de réception est analysée suivant le résultat des capacités (bit/s/Hz) en fonction du SNR (dB). Elle est représentée sur la *Figure 3. 2* selon les formules suivantes :

- Pour SISO :  $C_{\text{SISO}} = \log_2 (1 + \text{SNR})$ ;
- Pour MIMO on a  $C_{\text{MIMO}} = \log_2 (1 + \text{SNR} * \lambda(k) / N_t)$ .



**Figure 3.2 : La capacité du système MIMO**

Dans cette simulation, l'environnement est hautement dispersé. Dans cette simulation nous avons utilisé la première SNR pour avoir des résultats de la simulation, pour la capacité de MIMO 2x2, 3x3, 4x4.

On constate une grande différence entre les deux courbes, cette différence montre la capacité des deux systèmes. Au fur et à mesure que le SNR augmente, la capacité du canal monte linéairement.

Pour la courbe SISO ( $N_t = 1$  et  $N_r = 1$ ), la capacité varie de 1 à 4.5 bps/Hz environ. Elle reste faible et croît lentement avec le RSB, 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 est une borne qui ne peut être dépassée et un système multi antennes, même sous exploité, on obtiendra de meilleures performances.

### 3.3.2. Capacité du canal sous OFDM-MIMO

MATLAB 7.8.0 (R2009a) est utilisé pour réaliser les simulations de cette étude de la capacité du canal sous OFDM-MIMO.

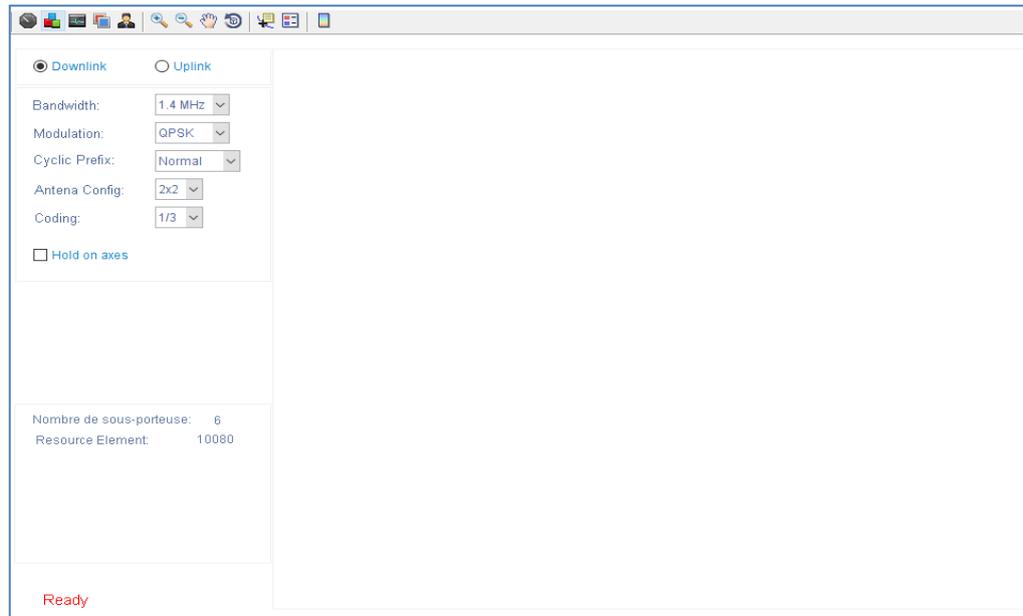
#### *a. Interface du logiciel de simulation*

L'interface du logiciel de simulation se présente comme (*Figure 3. 3*) :



*Figure 3. 3* : Page d'accueil du logiciel de simulation

L'accès à la page de travail (*Figure 3. 4*) pour la réalisation de la simulation se fait en un clic sur le bouton .



**Figure 3.4 : Page de travail**

La page de travail est composée de la barre de menu qui affiche les outils de manipulation



et les outils de calcul



Pour ces derniers, le bouton



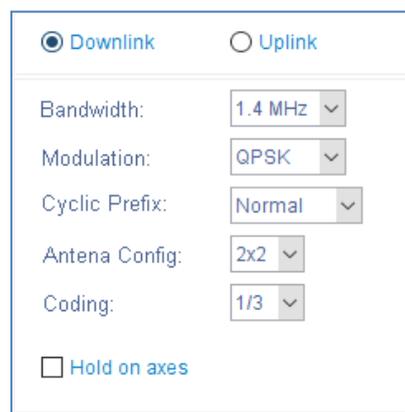
est utilisé pour le calcul de débit de transmission,



pour voir les spectres du signal

dans le canal,  pour la constellation après le choix de modulation, et enfin le bouton , est pour revenir à la première page d'accueil.

Etant donné que la prochaine étape de la simulation consiste à faire le choix des paramètres à utiliser durant la simulation, la page de travail est aussi munie d'une interface d'entrée des différents paramètres qu'on utilisera durant la simulation :



**Figure 3.5 : Interface de choix des paramètres de simulation.**

Comme toutes les interfaces de simulation, la page travail comporte dans sa partie droite l'espace destiné à l'apparition du résultat après le calcul.

**b. Les paramètres utilisés**

D'après les deux précédents chapitres, un canal de transmission possède deux voies de communication dont la voie descendante ou Down Link, le chemin des données envoyé de la source de l'émetteur vers le récepteur c'est-à-dire venant de l'EnodeB vers le UE si on prend le cas du réseau LTE. Et la voie montante ou Uplink qui, inversement est dans le sens de l'UE vers l'EnodeB.

Le canal du réseau LTE sous OFDM-MIMO doit avoir les caractéristiques indiquées dans le *Tableau 3. 1* pour avoir les débits de transmission et la robustesse du canal voulus.

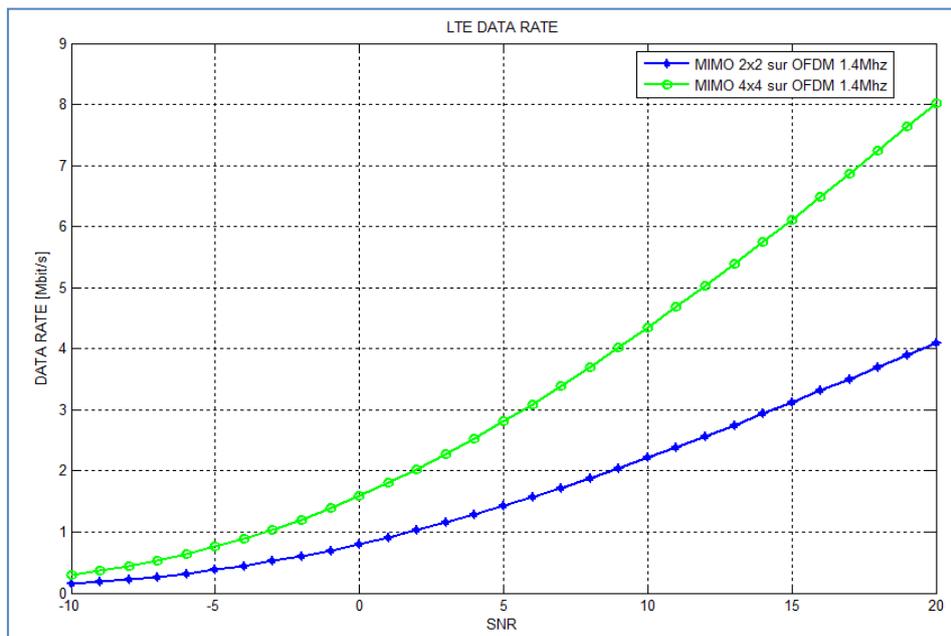
**Tableau 3. 1 : Paramètres de simulation**

Caractéristiques	Valeur et propriétés	Caractéristiques utilisées	Présentation sur le menu de choix de paramètres
Bande passante	1.4Mhz jusqu'à 20Mhz	1.4Mhz	
Modulations	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM	
Ciclic Prefix ou Temps de Garde	Normal : 5,21µs a 4,69µs et Long = 16,67µs.	Normal = 5,21µs Long = 16,67µs.	
Les antennes multiples	Multiple antennes au Tx et au RX	Tx=Rx=2 , Tx=2, Rx=4, Tx=4, Rx=2 ,Tx=Rx=4	
Codage et décodage du canal	Partage de la donnée, codage spatio-temporelle	1/3, 1/2, 2/3, 3/4, 4/5	

### 3.3.3. MIMO- OFDM sur une largeur de bande

Dans les exemples ci-dessous, on montrera les différentes techniques MIMO combinées avec le système OFDM avec une variation des nombres d'antennes à l'émission et à la réception en gardant une largeur de bande égale à 1,4MHz (nombre de sous-porteuse : 6 ; élément de ressource : 10080), une modulation de 64QAM et un Cyclic Prefix normal.

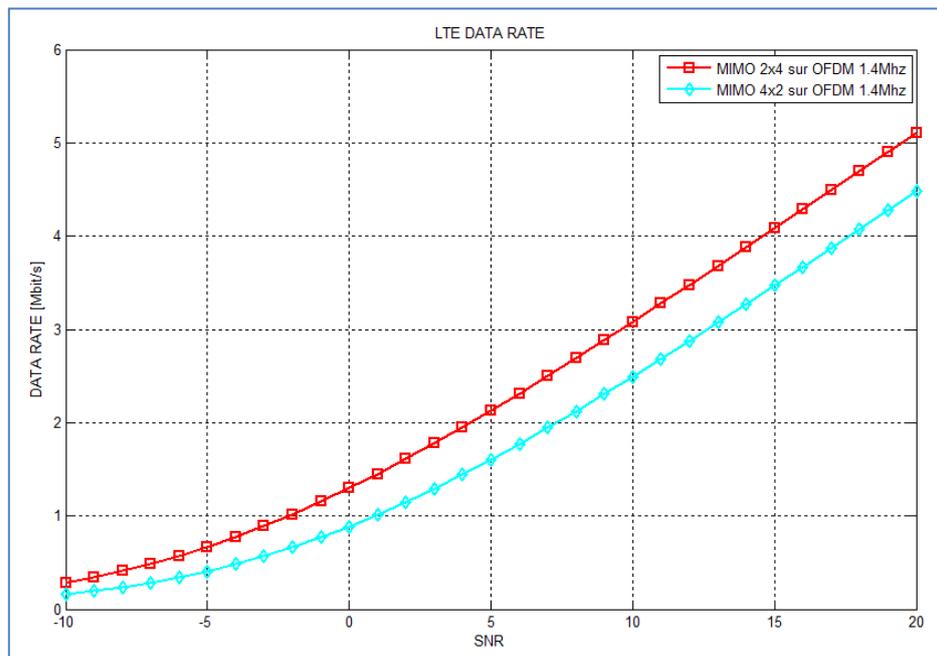
#### a. *MIMO symétriques 2x2 et 4x4 avec OFDM*



**Figure 3. 6 : MIMO symétrique 2x2 et 4x4 sur OFDM 1.4Mhz**

Avec un nombre d'antennes symétrique c'est-à-dire un nombre égal d'antennes à l'émission et à la réception, la capacité de transmission augmente avec celle du nombre d'antenne. On note un gain significatif en capacité de transmission pour un nombre d'antennes supérieur.

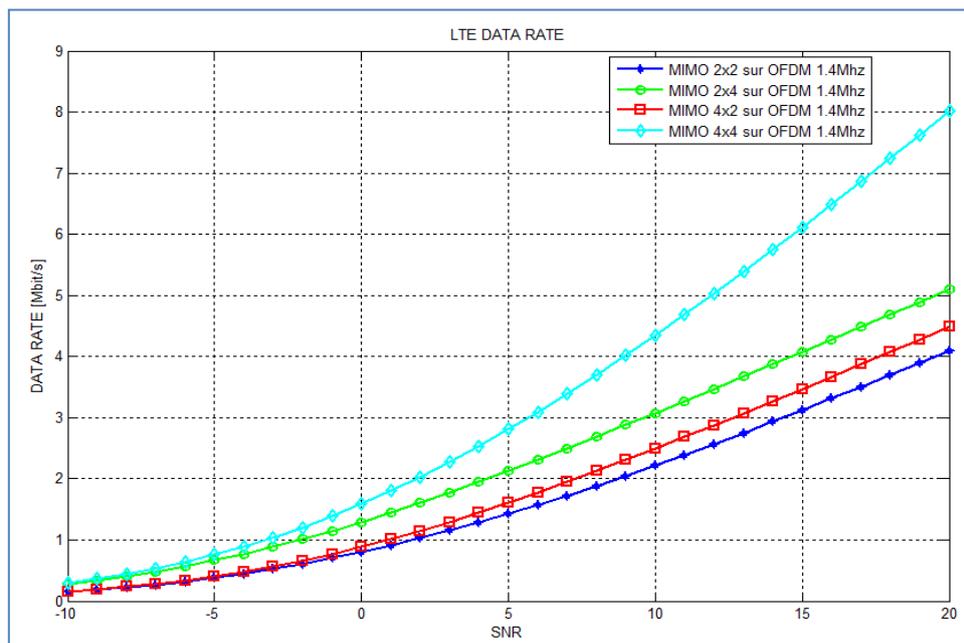
**b. Canal OFDM-MIMO asymétriques 2x4 et 4x2**



**Figure 3. 7 : MIMO asymétrique 2x4 et 4x2 sur OFDM 1.4Mhz**

Avec un nombre d'antennes asymétrique c'est-à-dire un nombre différent d'antennes à l'émission et à la réception, la capacité de transmission d'un système avec un nombre d'antennes  $T_x < R_x$  est supérieure à celle avec un nombre d'antennes  $T_x > R_x$  cela signifie que le système est plus performant lorsque le nombre d'antenne à la réception est supérieur au nombre d'antennes à l'émission.

**c. MIMO symétriques et asymétriques avec OFDM**

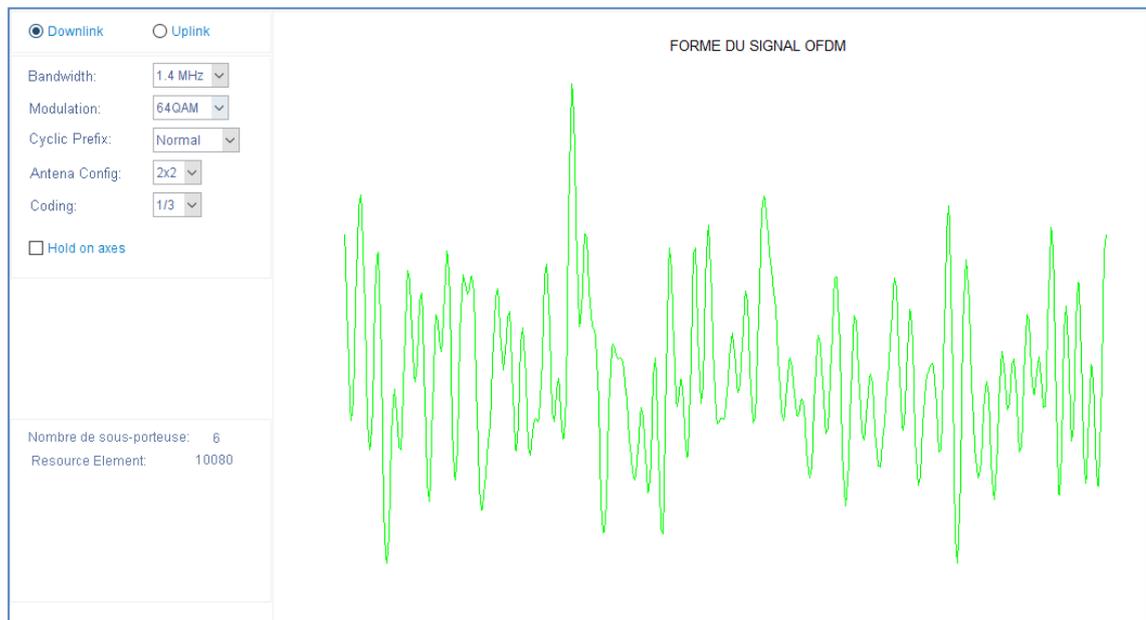


### ***Figure 3. 8 : MIMO symétrique et asymétrique sur OFDM 1.5Mhz***

On observe qu'effectivement la capacité de transmission augmente avec celle du nombre d'antenne. Aussi, on a une capacité de transmission inférieure pour un système 2 x2 par rapport au système 4x2 qui est à son tour inférieur à celui du système 2x4. On note toutefois que les différences sont moindres par rapport au gain du système 4 x 4 dont la capacité de transmission dépasse largement celle des trois autres.

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. Le prix à payer pour cette augmentation de la capacité est tout d'abord matériel, avec la multiplication des antennes et de leur électronique associée, mais aussi logiciel, avec des récepteurs nettement plus complexes et demandant plus de puissance de calcul.

#### ***d. Spectre du signal pour OFDM 1.4Mhz***



***Figure 3. 9 : Spectre du signal OFDM dans le canal***

### 3.3.4. Canal OFDM-MIMO sur différents largeur de bande

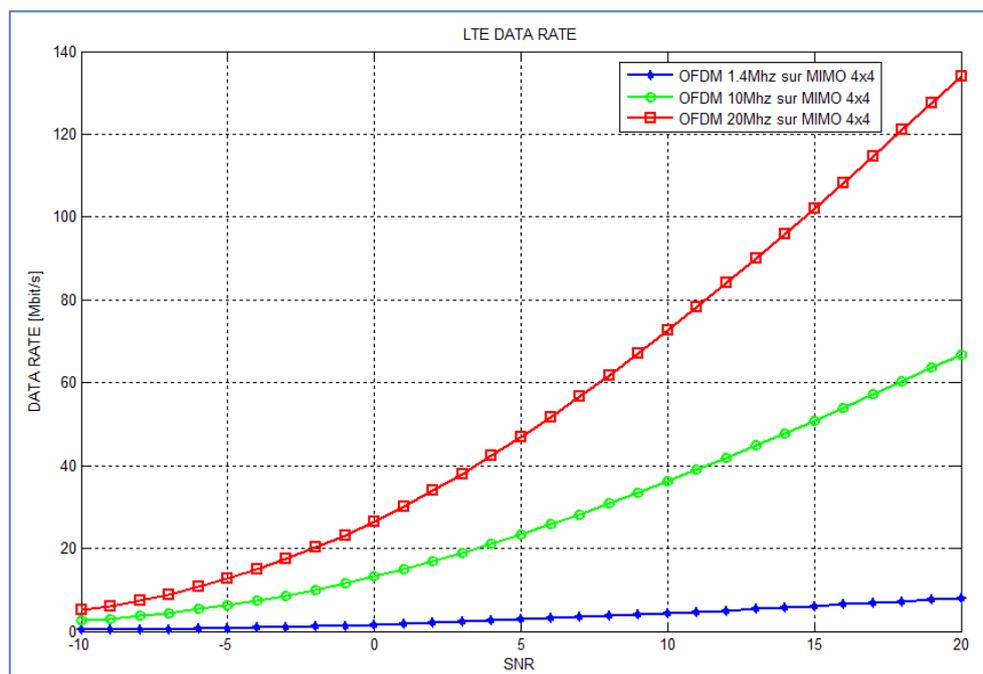
En partant de la précédente simulation, on prendra le système le plus performant c'est-à-dire MIMO 4 x 4 pour observer l'effet du changement de fréquence sur la performance du système en gardant toujours une modulation de 64QAM et un Cyclic Prefix normal.

Il est à rappeler que le système OFDM permet de d'optimiser l'utilisation d'une plus grande largeur de bande en la divisant en plusieurs sous-porteuses. Donc au fur et à mesure qu'on augmente la largeur de bande, la ressource en bloc et l'élément de ressource varient en conséquence comme l'indique le tableau suivant :

*Tableau 3. 2* : Variation la ressources en fonction de la largeur de bande

Largeur de bande	Sous-porteuse	Element de ressource
1.4Mhz	6	10080
10Mhz	50	84000
20Mhz	100	168000

#### a. *MIMO 4x4 sur différentes bandes de fréquence*

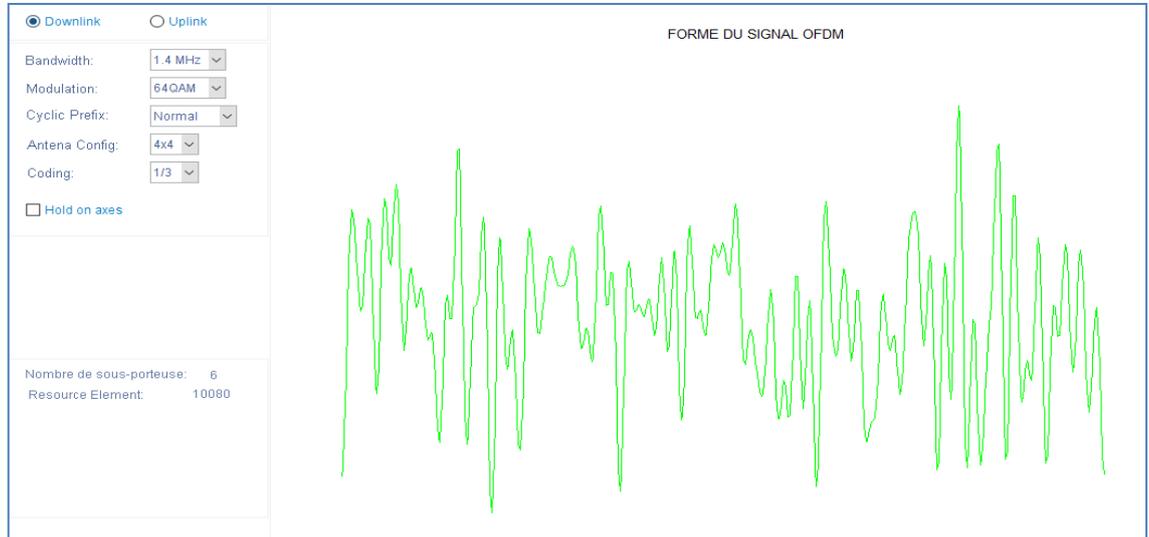


*Figure 3. 10* : MIMO 4x4 sur OFDM a différentes largeurs de bande

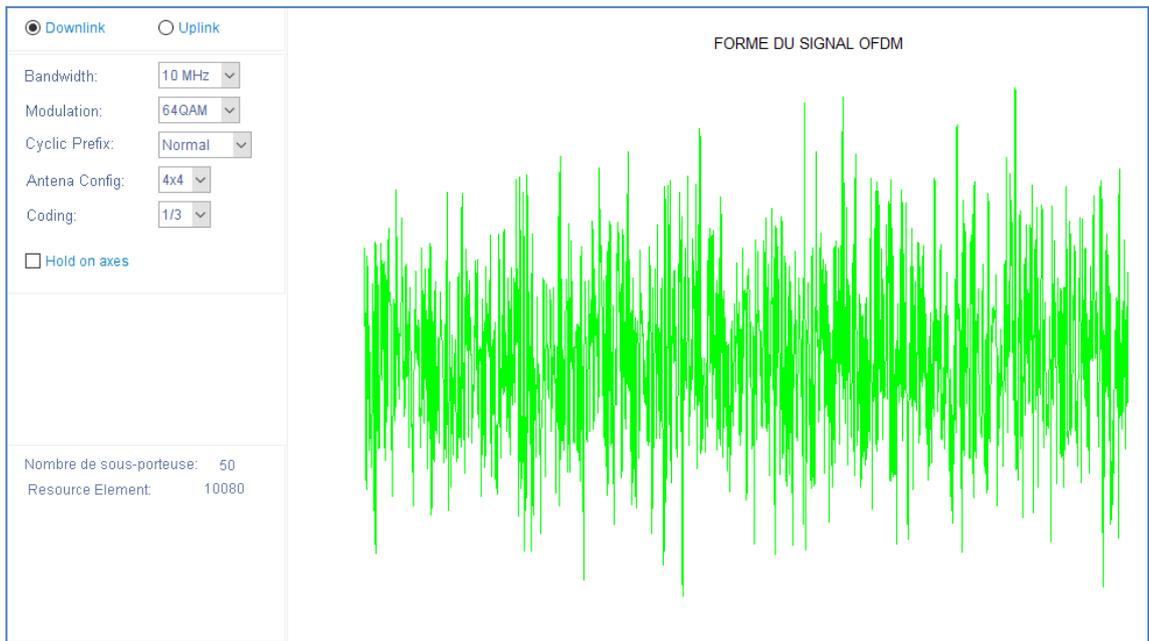
L'augmentation de la capacité de transmission est effectivement proportionnelle à celle de la largeur de bande dans un système OFDM. Ce résultat confirme ainsi le principe de base du

système OFDM tel qu'il a été défini selon lequel, l'efficacité spectrale du canal est améliorée par son utilisation.

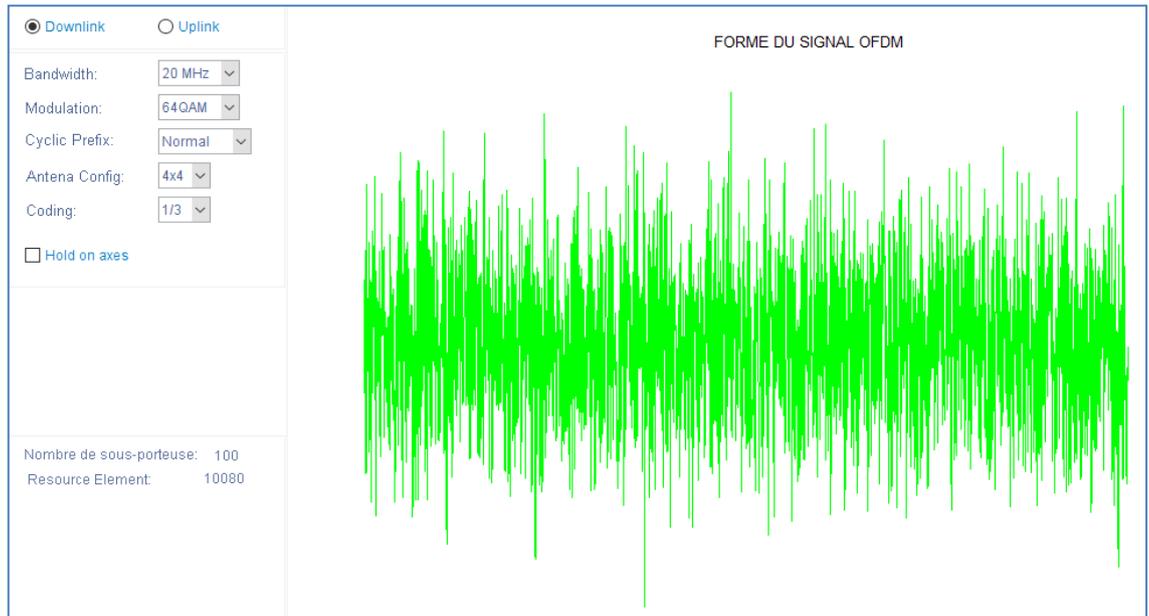
***b. Spectre du signal OFDM***



***Figure 3. 11 : Forme du signal dans OFDM-MIMO sous 1.4Mhz***



***Figure 3. 12 : Forme du signal dans OFDM-MIMO sous 10Mhz***



*Figure 3. 13* : Forme du signal dans OFDM-MIMO sous 20Mhz

Les trois spectres de signal OFDM dans le canal OFDM-MIMO sont très différentes pour les trois bandes de fréquences 1.4Mhz, 10Mhz et 20Mhz. On trouve plus de robustesse du signal au fur et à mesure que la largeur de bande augmente, ce qui est le point fort du canal MIMO-OFDM.

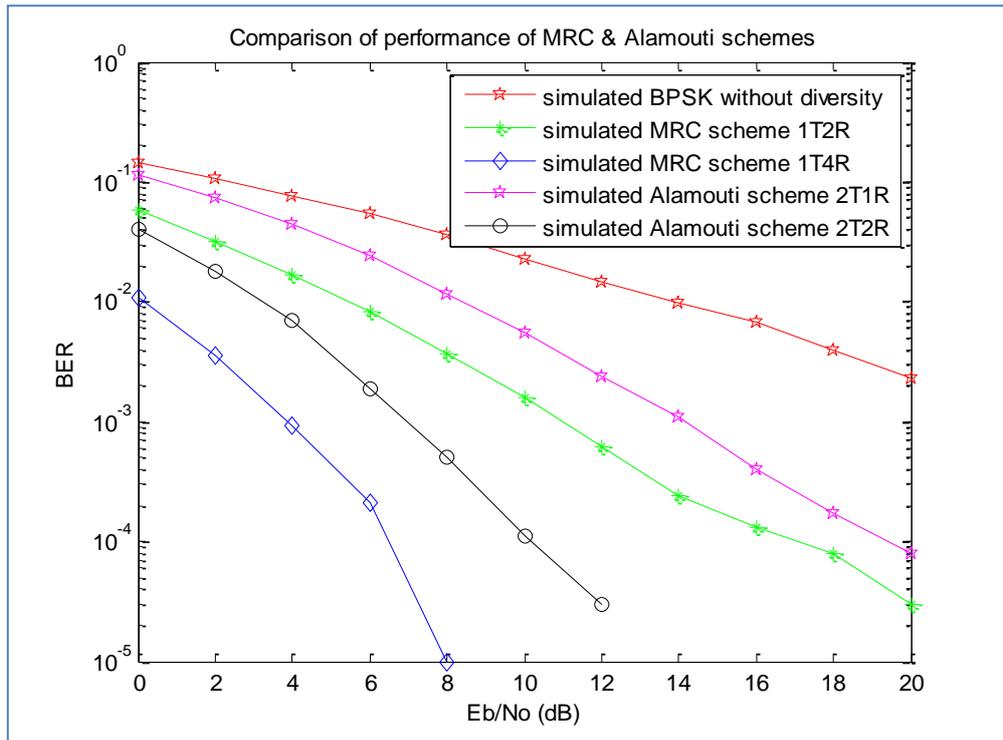
### 3.3.5. Conclusion

Nous avons constaté que l'association de la technologie MIMO avec la technique OFDM permet d'augmenter la capacité de transfert de données. Le choix des paramètres utilisés dans le canal est très important pour avoir un canal très robuste avec un transfert de données très rapide.

### 3.4. Etude de performance

Cette partie s'intéresse à l'étude de l'impact du nombre d'antennes avec les techniques de traitement sur les courbes du taux d'erreur par bit afin d'avoir des signaux optimaux à la réception.

Nous montrons cet effet en permettant un tracé des courbes du taux d'erreur en fonction de l'énergie  $E_o/N_o$  c'est-à-dire le rapport entre l'énergie par bit et la densité spectrale unilatérale de bruit  $BER = f(E_o/N_o)$  pour différents nombres d'antennes aux transmetteurs et aux récepteurs [25].



**Figure 3.14 : Performance du canal MIMO**

Il est à noter que le codage Alamouti atteint le même ordre de diversité que MRC 1 2 (même pente des courbes de BER) mais avec une perte de 3dB du SNR. Il est aussi démontré qu'avec la technique Alamouti 2 2 le même ordre de diversité que MRC1 4 est atteint.

Dans cette figure, les performances du canal sont comparées, plus précisément le Taux d'erreur binaire entre la technique de codage Alamouti et MRC.

Il est à noter que le MRC est une méthode de Diversité Mixte utilisée pour améliorer les performances de la diversité en utilisant des méthodes se basant sur le SNR en sortie de chaque branche [22].

En conclusion, la multiplicité d'antennes à la réception permet l'utilisation des techniques de combinaison des répliques pour éliminer les distorsions et les évanouissements subis par le signal lors de la transmission. Le BER diminue avec l'augmentation du nombre d'antennes et l'association de la technique de diversité pour des SNR croissants.

## CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce manuscrit porte sur étude de performance de canal du réseau LTE sous OFDM-MIMO. La performance de la combinaison de ces technologies basées sur les techniques de diversité étant indéniable, car ayant valu leur intégration dans la majorité des dernières versions des normes des technologies communications hertziennes large bande.

Dans le premier chapitre, le contexte de l'étude a été situé en commençant par la norme LTE et son historique. Cette partie a permis de mettre en exergue l'évolution du réseau de téléphonie mobile en partant de la première à la 3<sup>ème</sup> génération avec leurs différents objectifs et caractéristiques, en terminant sur l'insuffisance des capacités développées face à une demande des consommateurs qui évolue de façon exponentielle. Les fondamentaux d'une technologie révolutionnaire, le LTE a ainsi été relaté dans ce même chapitre pour exposer les paramètres ayant conduits au grand succès de ce réseau à haut débit.

Ces faits nous ont amené dans le deuxième chapitre à aborder les parties techniques qui régissent la technologie. Les bases de la transmission ont permis de définir les caractéristiques du canal. Vient ensuite l'aperçu de l'OFDM, cette technique de modulation multi porteuses permet d'un côté, de lutter contre les perturbations liées aux canaux de transmission et d'un autre côté, d'améliorer l'efficacité spectrale des systèmes. En ce qui concerne le MIMO, l'utilisation plusieurs antennes à l'émission et à la réception permet d'augmenter la capacité des systèmes.

Le dernier chapitre a relaté l'étude des techniques de transmission utilisant des réseaux d'antennes à l'émission et à la réception MIMO avec l'association de la modulation OFDM afin d'évaluer les performances de ces systèmes. Malgré quelques difficultés sur l'emploi et les erreurs apparues lors de l'utilisation du logiciel Matlab 7.8.0 (R2009) pour les simulations correspondantes, les performances élevées de la combinaison de ces deux systèmes sur la transmission des signaux à haut débits ont pu être confirmés. On peut conclure que l'exploitation des différentes largeurs de bandes avec l'utilisation de plusieurs antennes émettrices et réceptrices, en même temps, influence positivement la vitesse de transmission des données.

En tenant compte des avantages cités ci-dessous, l'exploitation des techniques combinées OFDM - MIMO sur le réseau LTE est en phase d'intégration dans le réseau sans fil à Madagascar. Cette technologie sera disponible pour le grand public dans les prochaines années

à venir. Il faudra quand même considérer que cette technologie nécessite des terminaux hauts de gammes en termes de configuration, et qui sont bien sur très couteux. Par ailleurs, la téléphonie mobile ne cessant de s'évoluer, les organismes et les systèmes de standardisations internationales, après le développement de la LTE-avancée, se penche déjà sur une technologie de la cinquième génération (5G) qui est en cours d'essai dans les pays leader de la technologie.

## **PERSPECTIVES**

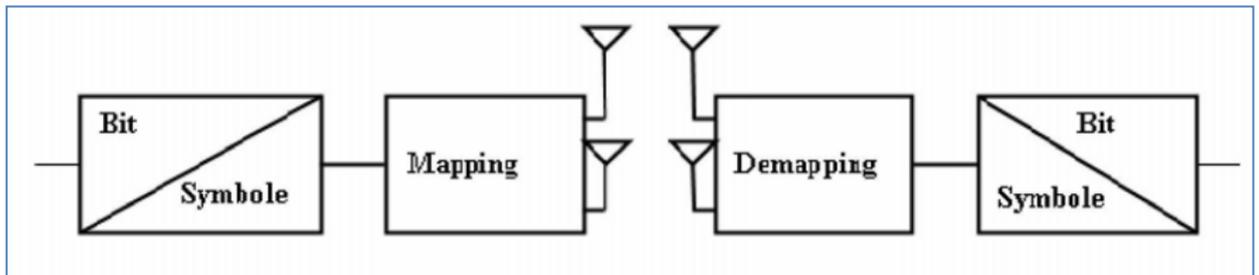
L'introduction du traitement numérique du signal pour la transmission à Haut débit est aujourd'hui irréversible. L'utilisation de formats de modulation à grande efficacité spectrale et l'exploitation du canal permettent de décupler la capacité des réseaux, ce qui se manifeste par la migration des liaisons actuelles à 100Mb/s vers un débit atteignant jusqu'à 1Gb/s sur les réseaux de transport sans fil. Cette tendance évoluera progressivement dans le même sens sur toute la prochaine décennie, en fonction des besoins des utilisateurs et des capacités d'investissement des opérateurs de réseaux. Malgré qu'à court terme, les offres en haut débit sont en train de se construire, les fournisseurs d'équipement en électronique et télécommunication anticipent déjà les besoins futurs en préparant les prochaines générations de systèmes de transmission à 10Gb/s et 100Gb/s qui seront vraisemblablement déployés à l'horizon 2025.

## ANNEXE 1: CODAGE SPATIO-TEMPOREL

### Introduction

Lors de l'implémentation des systèmes à antennes multiples, afin d'améliorer l'efficacité spectrale, plusieurs approches ont été définies. L'approche la plus classique, consiste à utiliser des antennes multiples à la réception et d'appliquer un combineur par ratio maximal (Maximum Ratio Combiner, MRC) aux signaux reçus. Mais, cette approche présente l'inconvénient d'augmenter la complexité du récepteur. Dans le cas où l'émetteur est muni de  $M$  antennes, nous devons définir quel est le traitement mapping nécessaire à appliquer aux signaux avant de les émettre. Ce traitement supplémentaire de part et d'autre du canal radio, mappeur/démappeur, est spécifique aux systèmes MISO et plus généralement MIMO en comparaison au système SISO comme le montre la figure 1, est appelé codage spatio-temporel ou codage espace-temps.

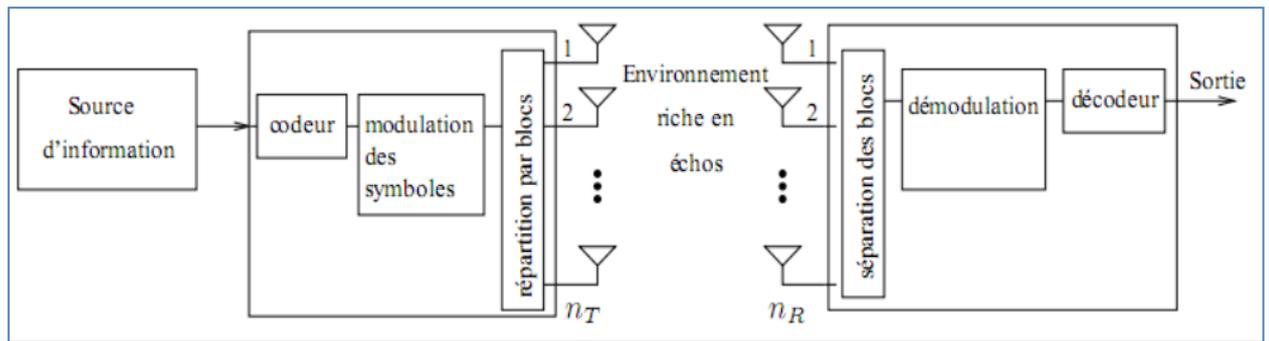
En conclusion, ces codes permettent d'introduire de la corrélation spatiale et temporelle entre les signaux émis d'une manière intelligente, afin qu'à la réception le signal reçu soit bien décodé.



*Figure 1* : Introduction du mappeur/démappeur spatio-temporel à l'émission/réception

### Architecture générale d'un système de codage spatio-temporel

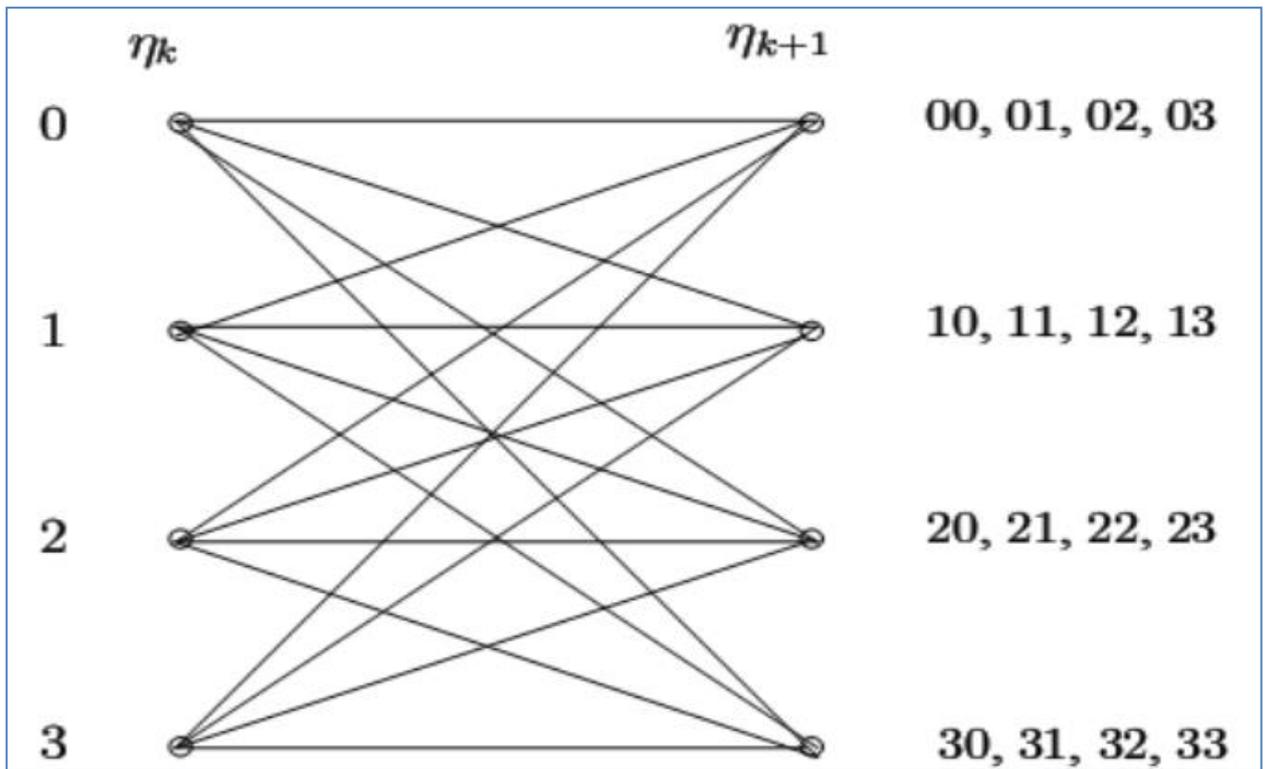
L'architecture générale du codage spatio-temporel (CST) est représentée sur la figure 2. Le codage ajoute de la redondance aux données binaires émises afin d'augmenter la diversité spatiale et éviter les évanouissements propre au canal radio-mobile.



*Figure 2* : Schéma du codage spatio-temporel

### Les différents types de codes :

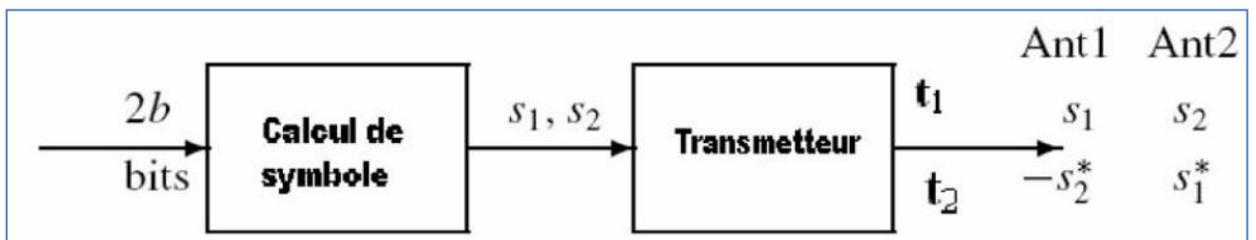
Le codage spatio-temporel est une technique de diversité de transmission, elle s'applique aux systèmes MISO et SIMO. Cette technique s'avère être bien adaptée aux systèmes dans lesquels le récepteur est muni d'une seule antenne à cause d'une contrainte de coût et/ou d'espace, par exemple nous citons le cas des réseaux cellulaires où les terminaux mobiles sont munis d'une seule antenne et où il est possible de munir la station de base de deux antennes ou plus. Les codes espace- temps permettent d'introduire de la corrélation spatiale et temporelle entre les signaux émis d'une manière intelligente, afin qu'à la réception le signal reçu soit bien décodé. Une multitude de techniques de codage ont vu le jour dans le but d'une meilleure utilisation de la diversité de transmission. Ces techniques de codages spatio-temporels peuvent être classées en deux catégories : les codes spatio-temporels en treillis (CSTT), les codes spatio-temporels en Bloc (STB). Les CSTT combinent le codage de canal avec la modulation sur les antennes émettrices.



*Figure 3* : Diagramme de treillis pour un CSTT à 4 états

Les CSTB sont définis comme une opération de modulation d'un bloc de symboles à la fois dans

L'espace et dans le temps. Elles peuvent être soit linéaire soit orthogonale (code Alamouti).



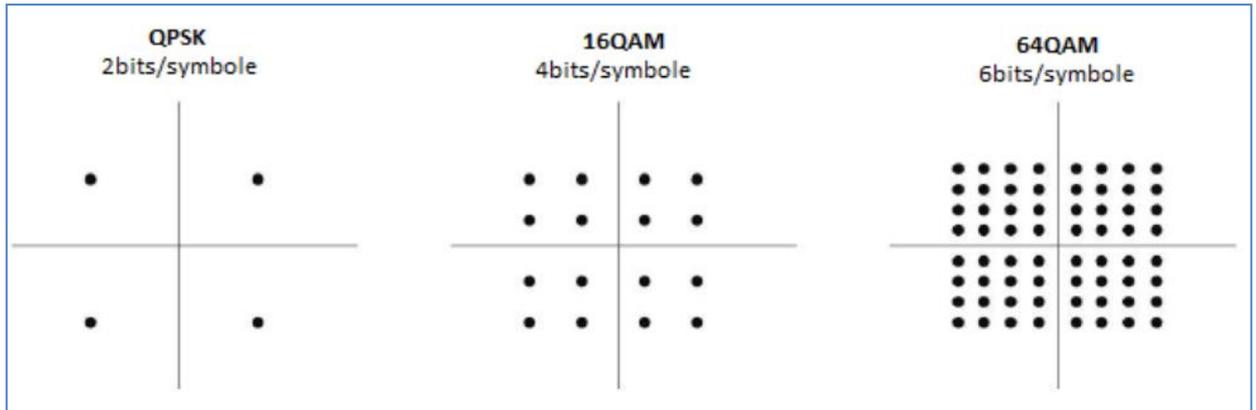
*Figure 4* : Schéma bloc d'un émetteur à code d'Alamouti

## ANNEXE 2 : QPSK, 4QAM, 16QAM

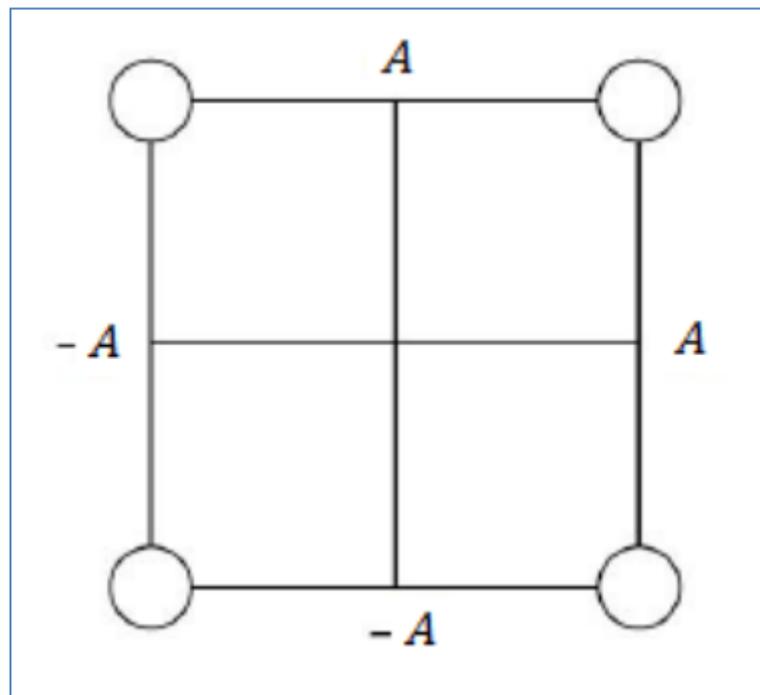
Trois niveaux de modulation sont utilisés dans la LTE, ils sont explicités ci-dessous :

### QPSK

Avec le QPSK, l'alphabet de modulation consiste en quatre différents une paire de deux bits consécutive est convertie de série en parallèle, et sa constellation en valeur complexe comme le montre la figure 5.



*Figure 5* : Constellation de la modulation LTE.



*Figure 6* : Constellation QPSK

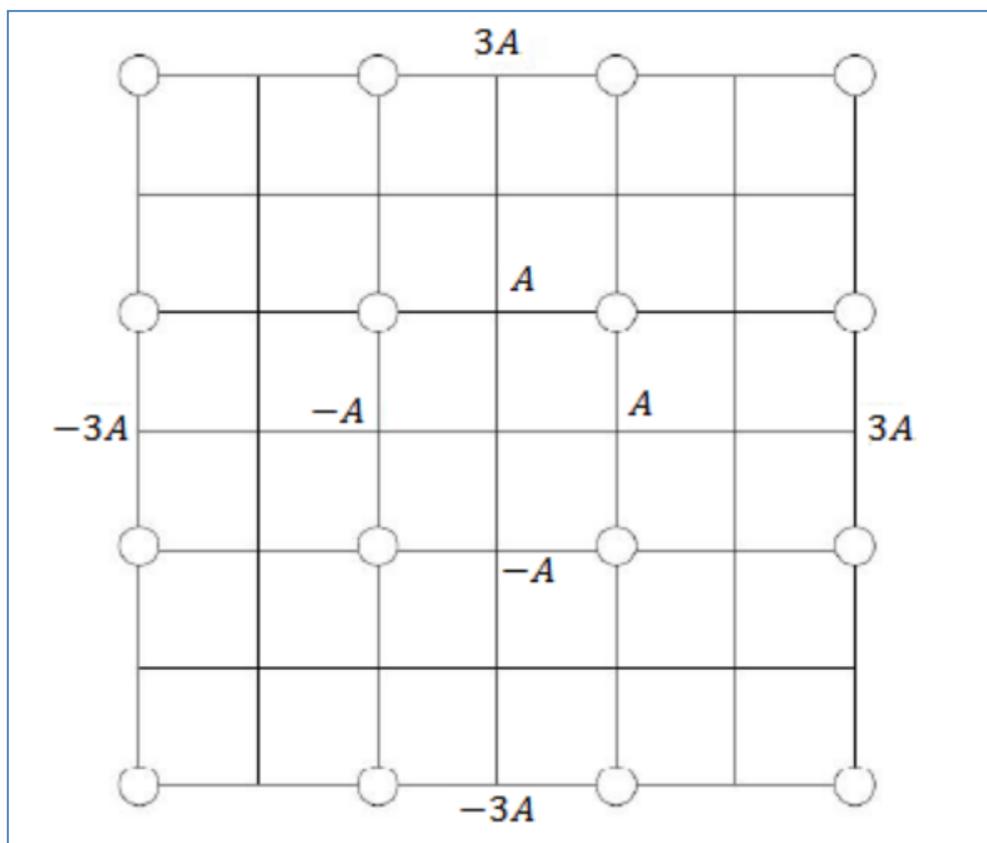
Avec la modulation QPSK, deux bits peuvent être simultanément transmis durant chaque intervalle de symbole. En supposant une amplitude maximale  $A$  sur les deux axes réel et imaginaire, et une puissance moyenne unitaire,  $A$  peut s'exprimer par :

$$\frac{4(A^2 + A^2)}{4} = 1$$

$$\Rightarrow A = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

## 16-QAM

Une modulation plus élevée comme le 16-QAM donne 16 différentes alternatives (quatre bits par symbole), qui permet de transmettre quatre bits simultanément, elle utilise donc plus efficacement la largeur de bande et permet un débit de données plus élevé que le QPSK. La figure 7 montre en montre la constellation sur un plan à deux dimensions. Comme précédemment, en supposant une puissance moyenne unitaire, les composants pouvant prendre ses valeurs parmi,  $3A$ ,  $A$ ,  $-A$  et  $-3A$  peut s'exprimer par :



*Figure 7* : Constellation 16-QAM

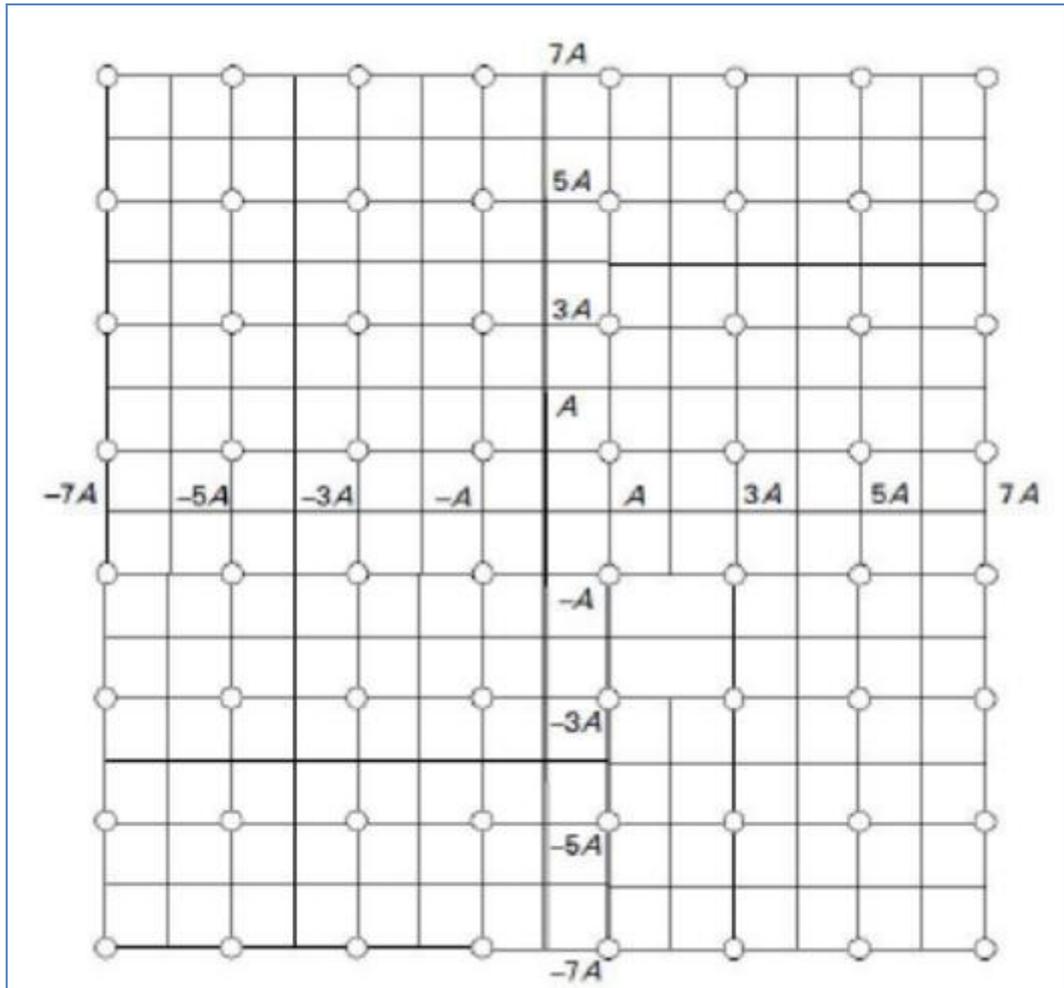
$$\frac{4(A^2 + A^2 + A^2 + A^2 + 9A^2 + 9A^2 + 9A^2 + 9A^2)}{16} = 1$$

$$\Rightarrow A = \frac{1}{\sqrt{10}}$$

## 64-QAM

En dernier lieu, la modulation 64-QAM présente 64 points de constellations différentes comme le montre la figure 8. Six bits par symbole sont transmis. Une puissance moyenne unitaire est supposée avec des amplitudes prenant leur valeur parmi  $7A$ ,  $5A$ ,  $3A$ ,  $A$ ,  $-A$ ,  $-3A$ ,  $-5A$ , et  $-7A$ . En utilisant la même méthode de calcul que précédemment,  $A$  vaut :

$$A = \frac{1}{\sqrt{42}}$$



*Figure 8* : Constellation 64-QAM

### ANNEXE 3 : EXTRAIT DE CODE SOURCE

- Comparaison du système MIMO 2x2, 4x4

```
clear all
clc
snr=0;
for i = 1:10
    snr = snr +2;
    c=(log(1+10^(snr/10)))/log(2);
    x(i)=snr;
    y(i)=c;
end
figure
plot(x,y,'-','LineWidth',2.5)
hold on

NR=2;
rand('state',456321)
snr=0;
for i=1:10;
    snr=snr+2;
    for j=1:10000;
        c(j)=(NR*log(1+(10^(snr/10))*abs(normrnd(0,1))))/log(2));
    end
    yy(i)=mean(c);
    xx(i)=snr;
end
plot(xx,yy,'-.','LineWidth',2.5, 'Color','m')

NR=3;
rand('state',456321)
snr=0;
for i=1:10;
    snr=snr+2;
    for j=1:10000;
        c(j)=(NR*log(1+(10^(snr/10))*abs(normrnd(0,1))))/log(2));
    end
    yy(i)=mean(c);
    xx(i)=snr;
end
plot(xx,yy,'-.','LineWidth',2.5, 'Color','g')

NR=4;
rand('state',456321)
snr=0;
for i=1:10;
    snr=snr+2;
    for j=1:10000;
        c(j)=(NR*log(1+(10^(snr/10))*abs(normrnd(0,1))))/log(2));
```

```

end
yy(i)=mean(c);
xx(i)=snr;
end

```

- MIMO sur un système OFDM

```

function rateupt_ClickedCallback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.status,'string','Loading...');pause(0.1);
set(handles.hfigcmd,'visible','off');set(handles.modcmd,'visibl
e','off');
%=====
=====
style='null b-* g-o r-s c-d m-v y-p k-h';
temp=str2double(get(handles.styletxt,'string'))+1;
if temp<=6, set(handles.styletxt,'string',num2str(temp));
else set(handles.styletxt,'string','0');end
%=====
=====
if
get(handles.holdchk,'value')==0,cla(handles.axes,'reset');end
%=====
=====
abw=[1.4 3 5 10 15 20];
acode=[1/3 1/2 2/3 3/4 4/5];
if get(handles.downoption,'value')==1,Link='downlink';
elseif get(handles.downoption,'value')==0,Link='uplink';
end

if strcmp(Link,'downlink')==1
    atx=[2 2 4 4];Ntx=atx(get(handles.downantenabox,'value'));
    arx=[2 4 2 4];Nrx=arx(get(handles.downantenabox,'value'));
    dulr=2/13;
elseif strcmp(Link,'uplink')==1
    atx=[1 1 2 2];Ntx=atx(get(handles.upantenabox,'value'));
    arx=[2 4 2 4];Nrx=arx(get(handles.upantenabox,'value'));
    dulr=1/17;
end
acode=acode*dulr;
switch get(handles.modulationbox,'value')
    case 1, Modulation='QPSK';
    case 2, Modulation='16QAM';
    case 3, Modulation='64QAM';
end
switch get(handles.cyclicprefixbox,'value')
    case 1, CyclicPrefix='normal';
    case 2, CyclicPrefix='extended';
end

Bandwidth=abw(get(handles.bandwidthbox,'value'));
coding=acode(get(handles.codingbox,'value'));

```

```

[SNRdB, DRM]=ltecapacity(Bandwidth, Modulation, CyclicPrefix, Ntx, N
rx);

DR=DRM*coding;

%=====
=====
set(handles.status, 'string', 'Done!');
pause(1); set(handles.status, 'string', 'Ready');
end

function codingbox_Callback(hObject, eventdata, handles), end
function codingbox_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end
end

function downantenabox_Callback(hObject, eventdata,
handles), end
function downantenabox_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end
end

function linkpanel_SelectionChangeFcn(hObject, eventdata,
handles)
switch get(eventdata.NewValue, 'Tag')
    case 'downoption'
        set(handles.downantenabox, 'visible', 'on');
        set(handles.upantenabox, 'visible', 'off');
    case 'upoption'
        set(handles.downantenabox, 'visible', 'off');
        set(handles.upantenabox, 'visible', 'on');
end
end

function
set(handles.status, 'string', 'Loading...'); pause(0.1);
cla(handles.axes, 'reset');
set(handles.hfigcmd, 'visible', 'on'); set(handles.modcmd, 'visible
', 'off');
%=====
=====
abw=[1.4 3 5 10 15
20]; BW=abw(get(handles.bandwidthbox, 'value'));
Ncp=8-get(handles.cyclicprefixbox, 'value');

```

```

if get(handles.downoption, 'value')==1, Link='downlink';
elseif get(handles.downoption, 'value')==0, Link='uplink';
end

    if strcmp(Link, 'downlink')==1

        atx=[2 2 4
4]; Ntx=atx(get(handles.downantenabox, 'value'));
        CFI=2; map=10;
        matrix = lteprgfdddlink(BW, Ncp, CFI, Ntx);
    elseif strcmp(Link, 'uplink')==1
        Mpfi=1; map=6;
        matrix=lteprgfdduplink(BW, Ncp, Mpfi);
    end

    opendir(matrix, [.8 .8 .8], map, 1, Name);

%=====
=====
set(handles.status, 'string', 'Done!'); pause(1); set(handles.statu
s, 'string', 'Ready');
end

function hfigcmd_Callback(hObject, eventdata, handles)
abw=[1.4 3 5 10 15 20]; Ncp=8-
get(handles.cyclicprefixbox, 'value');
if get(handles.downoption, 'value')==1, Link='downlink';
elseif get(handles.downoption, 'value')==0, Link='uplink';
end

    if strcmp(Link, 'downlink')==1
        atx=[2 2 4
4]; Ntx=atx(get(handles.downantenabox, 'value'));
        CFI=2; map=10;
        matrix = lteprgfdddlink(BW, Ncp, CFI, Ntx);
    elseif strcmp(Link, 'uplink')==1
        Mpfi=1; map=6;
        matrix=lteprgfdduplink(BW, Ncp, Mpfi);
    end

end
end

```

- Performance entre la combinaison MRC et le code Alamouti

```

clear all
clc
close all

N = 10^6;
Eb_NO_dB = [0:25]; % multiple Eb/N0 values
nRx = 2;
for ii = 1:length(Eb_NO_dB)

    % Transmitter
    ip = rand(1,N)>0.5; % generating 0,1 with equal probability
    s = 2*ip-1; % BPSK modulation 0 -> -1; 1 -> 0

    % Alamouti STBC
    sCode = 1/sqrt(2)*kron(reshape(s,2,N/2),ones(1,2)) ;

    % channel
    h = 1/sqrt(2)*[randn(nRx,N) + j*randn(nRx,N)]; % Rayleigh
channel
    n = 1/sqrt(2)*[randn(nRx,N) + j*randn(nRx,N)]; % white
gaussian noise, 0dB variance

    y = zeros(nRx,N);
    yMod = zeros(nRx*2,N);
    hMod = zeros(nRx*2,N);
    for kk = 1:nRx

        hMod = kron(reshape(h(kk,:),2,N/2),ones(1,2)); %
repeating the same channel for two symbols
        hMod = kron(reshape(h(kk,:),2,N/2),ones(1,2));
        temp = hMod;
        hMod(1,[2:2:end]) = conj(temp(2,[2:2:end]));
        hMod(2,[2:2:end]) = -conj(temp(1,[2:2:end]));

        % Channel and noise Noise addition
        y(kk,:) = sum(hMod.*sCode,1) + 10^(-
Eb_NO_dB(ii)/20)*n(kk,:);

    % Receiver
    yMod([2*kk-1:2*kk],:) =
kron(reshape(y(kk,:),2,N/2),ones(1,2));

    % forming the equalization matrix
    hEq([2*kk-1:2*kk],:) = hMod;
    hEq(2*kk-1,[1:2:end]) = conj(hEq(2*kk-1,[1:2:end]));
    hEq(2*kk,[2:2:end]) = conj(hEq(2*kk,[2:2:end]));

end

```

```

    % equalization
    hEqPower = sum(hEq.*conj(hEq),1);
    yHat = sum(hEq.*yMod,1)./hEqPower; % [h1*y1 + h2y2*, h2*y1
-h1y2*, ... ]
    yHat(2:2:end) = conj(yHat(2:2:end));

    ipHat = real(yHat)>0;

    % counting the errors
    nErr(ii) = size(find([ip- ipHat]),2);

end

simBer = nErr/N; % simulated ber
EbN0Lin = 10.^(Eb_N0_dB/10);
theoryBer_nRx1 = 0.5.*(1-1*(1+1./EbN0Lin).^(-0.5));

p = 1/2 - 1/2*(1+1./EbN0Lin).^(-1/2);
theoryBerMRC_nRx2 = p.^2.*(1+2*(1-p));

pAlamouti = 1/2 - 1/2*(1+2./EbN0Lin).^(-1/2);
theoryBerAlamouti_nTx2_nRx1 = pAlamouti.^2.*(1+2*(1-
pAlamouti));

```

## ANNEXE 4 : TABLEAU DE DONNEES POUR LTE

*Tableau 1 : Tableau de correspondance canaux et bandes de fréquences LTE [28]*

Canaux LTE	Bande d'upload (Débit montant)	Bande de download	Mode Duplexage	Largeur de bande (Mhz)	Fréquence centrale et Nom Comun	Région
		(Débit Descendant)				
1	1920 à 1980Mhz	2110 à 2170Mhz	FDD	5, 10, 15, 20	2100Mhz (IMT, UMTS 2100)	Asie, Europe, Israël, Japon (NTT DoCoMo, KDDI, Softbank), Corée du Sud (LG Uplus), Philippines (Intelligente)
2	1850 à 1910Mhz	1930 à 1990Mhz	FDD	1.4, 3, 5, 10, 15, 20	1900Mhz (PCS)	Canada, Amérique Latine, Etats-Unis
3	1710 à 1785Mhz	1805 à 1880Mhz	FDD	1.4, 3, 5, 10, 15, 20	1800Mhz (DCS)	Royaume-Uni (EE), Finlande, Allemagne, Australie, Hong Kong, Japon (Emobile), Pologne, Afrique du Sud, Singapour, Corée du Sud, Kazakhstan, Nouvelle-Zélande, Sri Lanka
4	1710 à 1755Mhz	2110 à 2155Mhz	FDD	1.4, 3, 5, 10, 15, 20	1700Mhz (AWS)	Canada, Amérique latine, Etats-Unis (AT&T Mobility, Big River broadband, T-Mobile USA, Verizon Wireless, MetroPCS)
5	824 à 849Mhz	869 à 894Mhz	FDD	1.4, 3, 5, 10	850Mhz (CLR)	Amérique, Corée du Sud (LG Uplus, SKTelecom), Israël
6	830 à 840Mhz	875 à 885Mhz	FDD	5, 10	850Mhz (UMTS 800)	

7	2500 à 2570Mhz	2620 à 2690Mhz	FDD	5, 10, 15, 20	2600Mhz (IMT-E)	Australie (Telstra) Canada, Union Européenne, Amérique Latine, Singapour, Brésil, Hong-Kong,
8	880 à 915Mhz	925 à 960Mhz	FDD	1.4, 3, 5, 10	900Mhz (GSM, UMTS 900)	Union européenne, Australie (Telstra), Amérique Latine, Japon (Softbank dès 2014)
9	1749,9 à 1784,9Mhz	1844,9 à 1879,9Mhz	FDD	5, 10, 15, 20	1800Mhz (UMTS 1800)	
10	1710 à 1770Mhz	2110 à 2170Mhz	FDD	5, 10, 15, 20	1700Mhz (Extended AWS)	Equateur, Pérou, Uruguay
11	1427,9 à 1447,9Mhz	1475,9 à 1495,9Mhz	FDD	5, 10	1500Mhz (PDC)	Japon (KDDI)
12	699 à 716Mhz	729 à 746Mhz	FDD	1.4, 3, 5, 10	700Mhz (SMH Blocs inférieurs A/B/C)	Etats-Unis (C Spire Wireless et US Cellular)
13	777 à 787Mhz	746 à 756Mhz	FDD	5, 10	750Mhz (SMH Bloc supérieur C)	Etats-Unis (Verizon Wireless)
14	788 à 798Mhz	758 à 768Mhz	FDD	5, 10	750Mhz (SMH Bloc supérieur D)	Etats-Unis
17	704 à 716Mhz	734 à 746Mhz	FDD	5, 10	700Mhz (SMH Blocs inférieurs B/C)	Etats-Unis (AT&T Mobility)
18	815 à 830Mhz	860 à 875Mhz	FDD	5, 10, 15	850Mhz (Japon inférieure 800)	Japon (KDDI)
19	830 à 845Mhz	875 à 890Mhz	FDD	5, 10, 15	850Mhz (Japon supérieure 800)	Japon (NTT DoCoMo)
20	832 à 862Mhz	791 à 821Mhz	FDD	5, 10, 15, 20	800Mhz (Dividende numérique UE)	Union Européenne, Fédération Russie

21	1447,9 à 1462,9Mhz	1495,9 à 1510,9Mhz	FDD	5, 10, 15	1500Mhz (PDC)	Japon (NTT DoCoMo)
22	3410 à 3490Mhz	3510 à 3590Mhz	FDD	5, 10, 15, 20	3500Mhz	France (Free Mobile?) UE ?
23	2000 à 2020Mhz	2180 à 2200Mhz	FDD	1.4, 3, 5, 10	2000Mhz (S-band a/k/a AWS-4)	Etats-Unis (Dish Network)
24	1626,5 à 1660,5Mhz	1525 à 1559Mhz	FDD	5, 10	1600Mhz (L-Band)	Etats-Unis (LightSquared)
25	1850 à 1915Mhz	1930 à 1995Mhz	FDD	1.4, 3, 5, 10, 15, 20	1900Mhz (PCS étendu)	US (Sprint)
26	814 à 849Mhz	859 à 894Mhz	FDD	1.4, 3, 5, 10, 15	850Mhz (SRMSA + CLR)	US (Sprint)
27	806 à 824Mhz	851 à 869Mhz	FDD	1.4, 3, 5, 10, 15	850Mhz (SRMSA)	
28	703 à 748Mhz	758 à 803Mhz	FDD	5, 10, 15, 20	700Mhz	France (Avril 2016), Australie (Optus, Telstra en 2015), Nouvelle Zélande, Japon (NTT DoCoMo, KDDI, Emobile en 2015), Mexique, Uruguay, Brésil (2016), Chili
29	n/a	716 à 728Mhz	FDD	5, 10	700Mhz (SMH Blocs inférieurs D/E)	Etats-Unis (AT&T Mobility agrégation porteuses liaison montant avec bandes 2 ou 4)
30	2305 à 2315Mhz	2350 à 2360Mhz	FDD	5, 10	2300Mhz (WCS Blocs A/B)	Etats-Unis (AT&T Mobility)
33	1900 à 1920Mhz		TDD	5, 10, 15, 20		EU
34	2010 à 2025Mhz		TDD	5, 10, 15		EU
35	1850 à 1910Mhz		TDD	1.4, 3, 5, 10, 15, 20	PCS Upload	
36	1930 à 1990Mhz		TDD	1.4, 3, 5, 10, 15, 20	PCS Download	
37	1910 à 1930Mhz		TDD	5, 10, 15, 20	PCS Bande de garde	
38	2570 à 2620Mhz		TDD	5, 10, 15, 20		EU, Fédération de Russie

39	1880 à 1920Mhz	TDD	5, 10, 15, 20		Chine
40	2300 à 2400Mhz	TDD	5, 10, 15, 20		Australie, Chine, Inde (Airtel, Jio, Infocomm), Afrique du Sud (Telkom Mobile)
41	2496 à 2690Mhz	TDD	5, 10, 15, 20	BRS/EBS	US (Clearwire), Japon (Wireless City Planning)
42	3400 à 3600Mhz	TDD	5, 10, 15, 20		
43	3600 à 3800Mhz	TDD	5, 10, 15, 20		
44	703 à 803Mhz	TDD	5, 10, 15, 20	APAC 700	

**Tableau 3 :** Caractéristiques des catégories d'UE LTE

Catégorie d'UE	Débit crête (Mbit/s)		Modulations		Nombre d'antennes de réception	Nombre maximal de couches spatiales en DL
	DL	UL	DL	UL		
1	10	5	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM	2	1
2	50	25			2	2
3	100	50			2	2
4	150	50			2	2
5	300	75		QPSK, 16QAM, 64QAM	4	4

**Tableau 4 :** Catégories LTE 4G et débits des appareils avec une largeur de bande de 20Mhz

Catégorie	1	2	3	4	5
Débit descendant (mb/s)	10	50	100	150	300
Débit montant (mb/s)	5	25	50	50	75

**Tableau 5 :** Catégories LTE 4G et débits des appareils avec une largeur de bande de 10Mhz

Catégorie	1	2	3	4	5
Débit descendant (mb/s)	5	25	50	75	150
Débit montant (mb/s)	2,5	12,5	25	25	37,5

**Tableau 6:** Catégories LTE 4G et débits des appareils avec une largeur de bande de 5Mhz

Catégorie	1	2	3	4	5
Débit descendant (mb/s)	2,5	12,5	25	37,5	75
Débit montant (mb/s)	1,25	6,25	12,5	12,5	18,75

**Tableau 7:** La LTE Advanced possède 3 nouvelles catégories : 6, 7 et 8

Catégorie	6	7	8
Débit descendant	301,5 mbit/s	301,5 mbit/s	3 Gigabit/s
Débit montant	51 mbit/s	102 mbit/s	1,5 Gigabit/s

## REFERENCE

- [1] Les Réseaux Mobiles pour les Non-Initiés / EFFORT [en ligne] / URL : <http://www.efort.com> / 2016
- [2] Invention du téléphone / Olivier LAVOISY / *Encyclopædia Universalis* [en ligne] / consulté le 17 mai 2016. URL : <http://www.universalis.fr/encyclopedie/invention-du-telephone>
- [3] <http://www.slideshare.net/abhishekshringi/gsm-architecture-11984082>
- [4] Les réseau Mobiles / cours réseau/ Vincent Barreaud/ ENSSAT
- [5] The creation of 3GPP and its achievements / Karl Heinz Rosenbrock / ETSI / 2007
- [6] [http://www.artizanetworks.com/lte\\_resources/lte\\_tut\\_sae\\_tec.html](http://www.artizanetworks.com/lte_resources/lte_tut_sae_tec.html)
- [7] LTE-SAE architecture and performance / Per Beming et Al. / Ericsson review n°3 / 2007
- [8] Etude et implémentation d'un système sans fil multi-antennes dans un contexte MC-CDMA / Mohamed Maâlej / Ecole Polytechnique de Tunisie / 2008
- [9] Etude et simulation d'un système de communication MIMI/OFDM / Mohamed Nadjib CHAABI/ Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumedienne / 2015
- [10] Les canaux et bandes de fréquences LTE 4G et répartition mondiale / Fabien CAPPOËN / Juin 2013 / URL : <http://www.lowcostmobile.com/actualite/1609-canaux-bandes-frequences-lte-4g-repartition-mondiale>
- [11] Evolution to LTE report / Global mobile Suppliers Association review / 13 octobre 2013
- [12] Cours de système teleinformatique, SDE master 2, Dép.electronique E.S.P.A., 2013-2014.
- [13] <http://www.3gpp.org/about-3gpp>
- [14] Etude et optimisation des systemes multi-antennes associes a des modulations multiporteuses / Vincent Le Nir / 17 Jun 2005
- [15] Canal de Propagation/ 3ème année Télécom-Réseaux 2007-2008/ Martial COULON
- [16] Etudes de nouvelles techniques d'estimation et d'égalisation de canal adaptees au système SC-FDMA/ Yvon Sosthene Yameogo / Universite Rennes 1, 2011
- [17] Etude et Implémentation d'un Système MIMO dans un Contexte OFDM / ferouani souhila / ecole doctorale des technologies et applications spatiales /2010

- [18] Etudes de nouvelles techniques d'estimation et d'égalisation de canal adaptées au système SC-FDMA / Yvon Sosthene Yameogo / janv 2012
- [19] Théorie de l'information et codage pour les canaux de Rayleigh MIMO / Philippe Ciblat / École Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris, France /
- [20] Systemes MIMO et codage Spatio-Temporel / Didier Le Ruyet / Cours ELE203 v2.0 /
- [21] Multidiffusion et Diffusion dans les systèmes OFDM sans fil / résumé de thèse de doctorat / Université Paris – Sud / oct 2012
- [22] Matthieu Gauthier /Technique MIMO / INRIA /
- [23] MIMO pour les nuls / Pascal Djiknavorian / Université LAVAL / janv 2006
- [24] MIMO-OFDM Wireless communication with Matlab / Young Soo Cho / Jaekwon Kim / Wong Young Yang / Chung Gu Kang / IEEE Press / 2010
- [25] Diversity techniques for flat fading channels / document ppt
- [26] Space–time block code / Wikipedia, the free encyclopedia\_27s\_code
- [27] Doc Pdf / Alamouti Space-Time Block Coding / Nutaq Nutaq
- [28]<http://www.lowcostmobile.com/actualite/1609-canaux-bandes-frequences-lte-4g-repartition-mondiale>

## RESUME

*Le monde de la technologie ne cesse d'évoluer dans une recherche constante d'amélioration. Tel est le cas de la communication sans fil qui, après près d'une quarantaine d'année d'évolution, a conduit à l'adoption de la technologie LTE dont la rapidité de transmission de message et l'efficacité en sont les deux grands objectifs. La combinaison du système MIMO qui augmente la taille du canal de transmission et de l'OFDM pour le traitement du signal avec une grande largeur de bande constitue une des meilleurs systèmes pour atteindre ce niveau de performances. Toutefois, l'évolution étant toujours de mise, les technologies LTE Avancée et 5G sont déjà présents sur le marché des pays leaders en communication malgré le fait que LTE commence à peine à être mis en place à Madagascar.*

**Mots clés** : Débit, canal, MIMO, OFDM

## ABSTRACT

*Evolution in the world of technology never stops and is in a constant performances-oriented research of improvement. This is the case of the wireless communication which, after nearly forty year of evolution, leaded to the adoption of LTE with high speed and high data rates as main goals. MIMO and OFDM systems combination increases transmission channel size and signal modulation with large band uses to get those performances. However, evolution is still going on, as LTE Advanced and 5G technologies is already on the market in some of the developed countries while the implementation of LTE has just started in Madagascar.*

**Key words**: Data rate, channel, OFDM, MIMO