



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE ET ELECTRONIQUE (GEE)



## Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de

**MASTER en Télécommunication**

Option : Réseaux Mobile et Service (RMS)

**Présenté par**

Melle BENOSMAN Radia

Melle SIDHOUM Amel



## THEME

**Etudes et simulation des performances des systèmes  
MIMO en configurations STBC et V-BLAST**

Soutenu en juin 2013 devant un jury composé de

Mr. KAMECHE. S

Président

M.C.B à l'université de Tlemcen

Mr. ABDELMALEK.A

Examinateur

M.C.B à l'université de Tlemcen

Mr. MERZOUGUI.R

Examinateur

M.C.B à l'université de Tlemcen

Mr.ZERROUKI.H

Encadreur

M.A. B à l'université de Tlemcen

## *Dédicaces*

*Je remercie le bon dieu de m'avoir donné le courage et la patience pour aller jusqu'au bout du parcours des études. Je dédie ce mémoire :*

*\* Mes chers parents pour tous les grands sacrifices fournis durant ma formation et leurs encouragements, qui veulent partager avec moi le bonheur et la réussite.*

*\* Mes grands parents que dieu leur prête la santé et une longue vie.*

*\* Mes chères sœurs : Samia, Amina et Farah et mon frère*

*Mohamed-Riyad.*

*\* A mon beau frère Nazim et mon cher neveu,*

*Mohamed-Fares et l'adorable nièce Sabiha-Hadjer que dieu les protège.*

*\* A mon cher binôme Amel qui m'a vraiment aidé à réaliser ce travail.*

*\* Mes meilleurs Ami(e)s : Ibtissem, Amel, Sarah, Samia, Wafaa et Hannen.*

*\* Ainsi que BENMOSTEFA Abderahman qui nous a éclairés par ses conseils notre travail.*

*\* A toute la promotion 2<sup>ème</sup> année mastère télécommunication.*

*Merci de m'avoir encouragé et aidé.*

*Radia*

## *Dédicaces*

*Je remercier le bon dieu de m'avoir donné le courage et la patience pour aller jusqu'au bout du parcours des études. Je dédie ce mémoire :*

*\* Mes chers parents pour tous les grands sacrifices fournis durant ma formation et leurs encouragements, qui veillent partager avec moi le bonheur et la réussite.*

*\* Mes grands parents que dieu leur prête la santé et une longue vie.*

*\* Mes chers frères : Amine, Youcef et Abdennour et spécialement à ma sœur adorable Fatiha Zohra.*

*\* A mon beau frère Mohammed et mon cher neveu,*

*Ahmed-Wassim, que dieu le protège.*

*\* A mon cher binôme Radia qui m'a vraiment aidé a realiser ce travail.*

*\* Mes chères cousines : Ibtissem, Touria, Djamila, Aicha, Khadidja, Fatiha, Mansoria, Fatima Zohra, Fatima, Rabia, Halima et Meriem.*

*\* Mes meilleurs Ami(e)s : Dounia, Sabiha, Ibtissem, Amel, Farid.*

*Merci de m'avoir encouragé et aider*

*Amel*

## *Remerciements*

*Avant tout, nous remercions le bon Dieu de nous avoir aidé à accomplir ce modeste travail et qui m'a donné la force de mener à bien cette tâche.*

*Au nom de la science, de la technologie, de l'esprit scientifique, de la vertu du travail, de l'esprit d'élévation de la connaissance, nous tenons à remercier notre encadreur Monsieur ZERROUKI Hadj, pour l'intérêt constant qu'il a apporté à ce travail.*

*Nous exprimons notre reconnaissance à Monsieur KAMECHE Samir, Maitre de conférences classe B à l'université de Tlemcen pour bien vouloir accepter de présider le jury.*

*Nous tenons à remercier également Monsieur MERZOUGUI Rachid, Maitre de conférences classe B et Monsieur ABDELMALEK Abdelhafid, Maitre de conférences classe B à l'université de Tlemcen pour avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Enfin, nous remercions toute personne ayant intervenue de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

Depuis quelques années, il y a une exigence accrue quant à la rapidité de transferts d'information, notamment, en raison de la généralisation des applications multimédia sur le système de communication sans fil. Pour y remédier, les chercheurs du laboratoire Bell en 1996 ont proposé une technique d'emploi simultané de réseaux d'antennes en émission et en réception (MIMO). Le canal MIMO est alors constitué par un ensemble de sous-canaux. Grâce à cette technique, le débit et la qualité de transmission peuvent être améliorés sans augmenter la puissance de transmission et la bande passante supplémentaires. Deux techniques de transmissions principales ont été développées pour tirer parti des systèmes MIMO: la diversité de transmission et le multiplexage Spatial. La première cherche à accroître la diversité et a été réalisé par les codes espace-temps en bloc (STBC). La seconde technique vise à augmenter le nombre de canaux disponibles, Architecture V-BLAST (VerticalBell-LabsLayeredSpace-Time).

Le travail présenté dans ce mémoire est d'abord consacré à la caractérisation et à la modélisation de ces deux techniques et traité également l'étude comparative de leurs performances en termes de taux d'erreurs binaire en fonction du rapport signal sur bruit SNR.

**Mots-clés :** système MIMO, capacité du canal, Codes spatio-temporels, STBC, V-BLAST, Multiplexage spatial, BER, SNR

# Abstract

In recent years, there is an increased requirement including transfers rapidity of information, due to the widespread use of multimedia applications on wireless communication system. To remedy this, researchers at the Bell Laboratory in 1996 proposed a technique of simultaneous use of array antennas for transmission and reception (MIMO). The MIMO channel is composed of a plurality of subchannels. Using this technique, flow and transmission quality can be improved without increasing the transmission power and the additional bandwidth. Two main transmission techniques have been developed to take advantage of MIMO systems: transmit diversity and Spatial multiplexing. The first seeks to increase the diversity and was carried by the space-time block codes (STBC). The second technique is to increase the number of available channels, Architecture V-BLAST (Vertical Bell Labs Layered Space-Time).

The work presented in this paper is primarily devoted to the characterization and modeling of these two techniques and also treat the comparative study of their performance in terms of bit error as a function of signal to noise ratio SNR.

**Keywords:** MIMO system, Channel capacity, Space-time codes, STBC, V-BLAST, Spatial Multiplexing, BER, SNR.

# Table des matières

Remerciement.....	ii
Résumé.....	iii
Abstract .....	iv
Table des matières .....	v
Liste des figures.....	viii
Liste des tableaux .....	x
Acronymes et Abréviations .....	xi
Introduction générale.....	2

## Chapitre 1 : La Technologie MIMO

I.1 Introduction .....	6
I.2 Présentation des systèmes MIMO .....	6
I.2.1 Comment ça marche .....	7
I.2.2 Intérêt de la transmission sur plusieurs antennes .....	9
I.2.3 Limite de SHANNON.....	10
I.3 Architecture et caractérisation .....	11
I.3.1 Architecture MIMO .....	11
I.3.1.1 Système SISO .....	11
I.3.1.2 Système MISO .....	11
I.3.1.3 Système SIMO .....	12
I.3.1.4 Système MIMO.....	13
I.4 Modèle de canal MIMO .....	14
I.3.3 Capacité des canaux MIMO .....	15
I.4 Domaine d'utilisation de la technologie MIMO .....	16

I.4.1	La technologie MIMO dans WiMAX .....	16
I.4.2	La technologie MIMO dans WiFi .....	17
I.5	Les avantages de la technologie MIMO.....	17
I.6	Conclusion : .....	18

## Chapitre 2 : les Codes Spatio-Temporel

II.1	Introduction .....	21
II.2	Diversité spatiale .....	21
II.3	Diversité spatio-temporelle .....	22
II.4	Les codes temps-espace .....	22
II.4.1	Codes spatio-temporels en treillis (STT) .....	23
II.4.2	Codes spatio-temporels en bloc STBC .....	24
II.5.2.1	<i>Les Codes espace-temps non orthogonaux</i> .....	25
II.5.2.2	<i>Codes temps-espace en bloc quasi-orthogonaux</i> .....	26
II.5.2.3	<i>Les Codes espace-temps orthogonaux (OSTBC)</i> .....	27
B.	<i>Les codes espace-temps en blocs de Tarokh</i> .....	32
II.5	Algorithmes de réception associés aux systèmes MIMO .....	33
II.5.1	Critère de forçage à zéro.....	34
II.5.2	Erreur Quadratique Moyenne Minimale (EQMM).....	34
II.5.3	Récepteur à Maximum de Vraisemblance (MV).....	35
II.5.4	Annulations successives d'interférences ordonnées (V-BLAST) .....	35
II.6	La Technique de modulation .....	36
II.7	Conclusion .....	37

## Chapitre 3 : les Techniques du Multiplexage Spatial

III.1	Introduction .....	40
III.2	Système MIMO à base de Multiplexage spatial.....	40
III.2.1	Architecture H-BLAST .....	41
III.2.2	Architecture D-BLAST .....	41



III.2.2 Turbo-BLAST .....	42
III.2.2 Architecture V-BLAST .....	43
III.2.2.1 Cas de V-BLASTde 8x8 antennes.....	45
III.3 Réception de V-BLAST .....	47
III.3.1 Récepteur ZF .....	47
III.3.2 Détection de V-BLAST.....	48
III.4 Conclusion.....	49

## Chapitre 4 : La Simulation des performances STBC et V-BLAST

IV-1 Introduction .....	52
IV.2 Le langage utilisé .....	52
IV.3 Capacité des systèmes MIMO .....	52
IV.4 Simulation d'un système STBC .....	56
IV.5 Simulation d'un système V-BLAST .....	59
IV.6 Comparaison entre système STBC et V-BLAST .....	62
IV.7 Conclusion .....	63
Conclusion générale .....	66
Bibliographie.....	68

<b>Figure I-1</b> schéma d'un système de transmission sans fil MIMO .....	7
<b>Figure I-2</b> Dispositif MISO .....	12
<b>Figure I-3</b> Dispositif SIMO.....	13
<b>Figure I-4</b> Dispositif MIMO .....	13
<b>Figure I-5</b> Schéma d'un système de transmission MIMO .....	14
<b>Figure II-1</b> Schéma du codage spatio-temporel.....	22
<b>Figure II-2</b> Les familles de codes temps-espace .....	23
<b>Figure II-3</b> Diagramme de treillis pour un CSTT à 4 états utilisant $N_t=2$ émetteurs et une Modulation MDP-4 .....	24
<b>Figure II-4</b> Schéma d'Alamouti avec une antenne émettrice et deux antennes réceptrice.....	28
<b>Figure II-5</b> Schéma d'Alamouti avec deux antennes émettrices .....	30
<b>Figure II-6</b> Modulation d'amplitude en Quadrature 16-QAM .....	37
<b>Figure III-1</b> Architecture d'un transmetteur H-BLAST .....	41
<b>Figure III -2</b> Schéma représentant le processus d'un émetteur H-BLAST .....	41
<b>Figure III-3</b> Architecture d'un transmetteur D-BLAST .....	42
<b>Figure III-4</b> Schéma représentant le processus d'un émetteur D-BLAST .....	42
<b>Figure III-5</b> Architecture d'un transmetteur V-BLAST.....	43
<b>Figure III-6</b> principe de l'architecture de modulation V-BLAST .....	43
<b>Figure III-7</b> Schéma représentant le processus d'un émetteur V-BLAST.....	44
<b>Figure III-8</b> V-BLAST Non Codé .....	44
<b>Figure III-9</b> Cas de V-BLAST de 8X8 antennes .....	46
<b>Figure IV-1</b> Capacité des systèmes SIMO à 4 et 8 antennes par rapport au système SISO ...	53
<b>Figure IV-2</b> Capacité des systèmes MIMO dans un canal de Rayleigh en fonction du nombre d'antenne pour ( $N_t=N_r$ ) .....	54
<b>Figure IV-3</b> Capacité des systèmes MIMO dans un canal de Rayleigh en fonction du nombre d'antenne pour 4 récepteurs ( $N_r=4$ ).....	55
<b>Figure IV-4</b> Capacité des systèmes MIMO dans un canal de Rayleigh en fonction du nombre d'antenne pour 4 émetteurs ( $N_t=4$ ).....	56

<b>Figure IV-5</b> <i>performance du système STBC en 4-QAM</i> .....	57
<b>Figure IV-6</b> <i>les performances du systèmes STBC en 16-QAM</i> .....	58
<b>Figure IV-7</b> <i>les performances du systèmes STBC en 4-QAM et 16-QAM</i> .....	59
<b>Figure IV-8</b> <i>perfeormance de système V-BLAST en 4-QAM</i> .....	60
<b>Figure IV-9</b> <i>performance du systèmes V-BLAST en 16-QAM</i> .....	61
<b>Figure IV-10</b> <i>performance du systèmes V-BLAST en 4-QAM et 16-QAM</i> .....	62
<b>Figure IV-11</b> <i>Comparaison entre les performances des systèmes STBC et V-BLAST en 4-QAM</i> .....	63

## Liste des tableaux

---

<b>Tableau II-1</b> <i>Schéma de transmission dans le temps</i> .....	28
<b>Tableau II-2</b> <i>Signaux reçus aux niveaux des antennes réceptrices</i> .....	31
<b>Tableau II-3</b> <i>Canaux entre antennes émettrices et antennes réceptrices</i> .....	31
<b>Tableau III-1</b> <i>Manière de transmission des symboles pour 2 intervalles de temps</i> .....	46

# Acronymes et Abréviations

---

<b>MIMO</b>	Multiple Input Multiple Output.
<b>SISO</b>	Single Input Single Output.
<b>MISO</b>	Multiple Input Single Output
<b>SIMO</b>	Signal Input Multiple Output.
<b>RSB</b>	Rapport Signal sur Bruit.
<b>SNR</b>	Signal to Noise Ratio.
<b>AWGN</b>	Additive White Gaussian Noise.
<b>BER</b>	Bit Error Ratio.
<b>WiMAX</b>	Worldwide Interoperability for Microwave Access
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
<b>LTE</b>	Long Term Evolution
<b>Wi-Fi</b>	Wireless-Fidelity
<b>4 G</b>	4ème Génération.
<b>3 GPP</b>	3rd Generation Partnership Project
<b>CST</b>	Codage Spatio-Temporel
<b>STT</b>	Codes spatio-temporel en treillis
<b>STB</b>	Code Spatio-Temporel en bloc
<b>STBC</b>	Space-Time Block Coding
<b>STTC</b>	Space Time Trellis Coding
<b>STC</b>	Space Time Coding
<b>OSTBC</b>	Orthogonal Space-Time Block Coding
<b>QO-STBC</b>	Quasi- Orthogonal Space-Time Block Coding
<b>QAM</b>	Quadrature Amplitude Modulation
<b>FSK</b>	Frequency Shift Keying.
<b>PSK</b>	Phase Shift Keying.

<b>ASK</b>	Amplitude Shift Keying.
<b>EQMM</b>	Erreur Quadratique Moyenne Minimale
<b>BLAST</b>	Bell Labs Layered Space-Time.
<b>V-BLAST</b>	Vertical-Bell Labs Layered Space-Time.
<b>H-BLAST</b>	Horizontal-Bell Labs Layered Space-Time.
<b>D-BLAST</b>	Diagonale- Bell Labs Layered Space-Time
<b>T-BLAST</b>	Turbo- Bell Labs Layered Space-Time
<b>ZF</b>	Zero Forcing.
<b>MV</b>	Maximum de Vraisemblance.
<b>ML</b>	Maximum Likelihood.
<b>MMSE</b>	Ordered Successive Interference Cancellation.
<b>OSIC</b>	Ordered Successive Interference Cancellation.
<b>802</b>	Commission IEEE de standardisation des réseaux locaux et métropolitains.
<b>802.11</b>	Groupe de travail IEEE sur les réseaux locaux sans fil.

# **Introduction Générale**

Depuis une dizaine d'années, une nouvelle technologie est apparue dans les systèmes de télécommunication qui permet d'améliorer la qualité de transmission. Cette technologie a comme principaux objectifs d'augmenter le débit de transmission et d'exploiter la diversité offerte par le système. Il s'agit du système à entrées multiples et à sorties multiples (appelé aussi MIMO) qui emploie plusieurs antennes en émission et plusieurs antennes en réception. Elles permettent d'atteindre à la fois de très hautes efficacités spectrales et de lutter efficacement contre les évanouissements du signal.

D'une part, l'efficacité spectrale potentielle d'un tel système est bien plus élevée que celle d'un système mono-antenne. En effet, la capacité d'un système MIMO augmente linéairement avec le nombre d'antennes à l'émission. D'autre part, grâce à une meilleure exploitation de la diversité, ce système est plus robuste aux évanouissements du canal de transmission améliorant ainsi la qualité de la transmission.

La plupart des études sur les systèmes MIMO et les codes espace-temps STC, pour ce la beaucoup d'études figurant dans littérature font cas des performances de tels systèmes avec l'utilisation des techniques de codages spatio-temporelles dont les plus usuels sont les codages en bloc STBC, ce dernier augmente la diversité du canal de transmission et donc la robustesse du récepteur et les avantages des systèmes à antennes multiples sont assez connus et pour preuve on peut déjà citer le fameux code d'Alamouti .

Pour différentes configurations d'antennes. Cependant, une approche intéressante avait été écartée. En effet, le concept de diversité spatiale d'émission consiste à transmettre la même information, codée différemment, sur chaque antenne d'émission. Le débit obtenu est donc équivalent au débit d'un système mono-antenne. Néanmoins, il est possible de transmettre des flux différents sur chaque antenne simultanément, dans la même bande de fréquence et sans augmentation de la puissance. On parle alors de multiplexage spatial. Cette technique a été introduite sous le nom de BLAST (Bell Labs Layered Space-Time), ça version simplifiée est V-BLAST qui semble offrir le meilleur compromis entre la performance du système et la complexité de mise en œuvre.



A la réception les antennes reçoivent un mélange des contributions de toutes les antennes émettrices. Pour cela il existe des algorithmes à la réception permettant de séparer les signaux et de retrouver l'information initiale dans le but de faire augmenter le débit de plus en plus et d'avoir la meilleure qualité de signal à la réception.

L'étude des limites de performance du système MIMO devient très importante car elle va donner des idées de ce lot dans la compréhension et la conception des systèmes MIMO pratiques. Pour cela on va présenter dans ce mémoire les performances des systèmes MIMO en configuration STBC et V-BLAST.

Le travail élaboré est constitué de quatre chapitres:

Dans le Chapitre 1, la capacité des systèmes MIMO est étudiée afin de déterminer les débits théoriques qu'on peut attendre de ces systèmes. Nous donnons d'abord un état de l'art sur les techniques MIMO et sur la capacité les formules des capacités des différents canaux SISO et SIMO et MISO seront fournies par la théorie de l'information et comparées à celle du système MIMO. Par cette notion de capacité, nous montrons les améliorations en termes de performances apportées par les systèmes MIMO.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des systèmes à diversité d'espace en émission, nous distinguons de différent code spatio-temporelle STBC et nous sommes intéressées à présenter le code d'Alamouti en utilisant les techniques de modulation M-QAM. Ainsi nous citons différents récepteurs tels que ZF, MMSE, MV et V-BLAST qui seront utilisés pour l'estimation du canal et éliminés les interférences dues aux émetteurs.

Le troisième chapitre porte sur quatre différents algorithmes BLAST à savoir D-BLAST (BLAST diagonale), H-BLAST (BLAST horizontal), Turbo-BLAST et nous choisissons l'architecture basée sur V-BLAST (BLAST verticale), Les différents algorithmes utilisés en réception tels que ZF et VBLAST sont décrits.

Le quatrième chapitre présent les résultats numériques obtenus, nous discutons les performances des systèmes STBC et V-BLAST étudiés selon les paramètres considérés dans chaque cas par des simulations. En sortant à la fin avec une comparaison entre les performances de STBC et celles du V-BLAST. Ces dernières sont réalisées en utilisant le logiciel MATLAB® qui dispose d'une riche bibliothèque pour les calculs matriciels.

La conclusion termine ce document.

## **Chapitre I**

# **La Technologie MIMO**

# Chapitre 1

## Techniques MIMO

### Sommaire

---

---

I.1	Introduction.....	6
I.2	Présentation des systèmes MIMO .....	6
I.2.1	Comment ça marche.....	7
I.2.2	Intérêt de la transmission sur plusieurs antennes.....	9
I.2.3	Limite de SHANNON.....	10
I.3	Architecture et caractérisation.....	11
I.3.1	Architecture MIMO .....	11
I.3.1.1	Système SISO .....	11
I.3.1.2	Système MISO .....	11
I.3.1.3	Système SIMO .....	12
I.3.1.4	Système MIMO.....	13
I.4	Modèle de canal MIMO .....	14
I.3.3	Capacité des canaux MIMO .....	15
I.4	Domaine d'utilisation de la technologie MIMO.....	16
I.4.1	La technologie MIMO dans WiMAX .....	16
I.4.2	La technologie MIMO dans WiFi .....	17
I.5	Les avantages de la technologie MIMO.....	17
I.6	Conclusion .....	18

---

---

## I.1 Introduction :

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

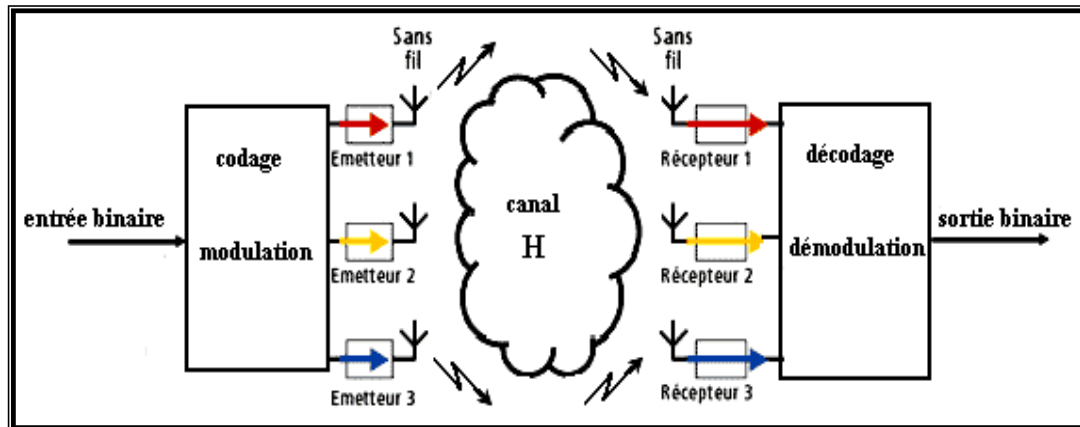
Un bref historique va d'abord introduire les systèmes MIMO. Ensuite une modélisation des systèmes multi-antennaires SIMO (Single-Input Multiple-Output), MISO (Multiple-Input Single-Output) et MIMO va être faite afin de se familiariser avec l'aspect spatial qu'apporte l'augmentation du nombre d'antennes. La capacité étant un facteur limitant du SISO, nous allons donner la capacité des systèmes SISO, SIMO et MIMO [1].

L'apparition des systèmes MIMO a été motivée par le besoin accru en termes de débit dû a l'arrivée de nouveaux services tels que l'accès a internet et la transmission d'image via les systèmes de communications sans fil. Ainsi que la saturation des ressources en canaux de transmission, en particulier dans la bande de la téléphonie mobile [2].

## I.2 Présentation des systèmes MIMO :

Dans un système mono-antenne, l'augmentation de la taille de la modulation ou de la bande de fréquence utilisée est les seules solutions pour augmenter le débit de données, avec tous les problèmes de complexité ou d'encombrement que cela entraîne [3]. Partant du point de vue de la théorie de l'information, deux membres des laboratoires de recherche Bell, Telatar [4] et Foschini [5], ont parallèlement et indépendamment montré que la capacité des systèmes multi-antennes augmentait linéairement avec le nombre d'antennes émettrices, dépassant de manière significative la limite théorique de Shannon. L'aptitude des systèmes multi-antennes à résister aux évanouissements et aux interférences constitue par ailleurs un avantage supplémentaire indéniable.

Ces découvertes ont fait des systèmes MIMO (figure I-1) un des domaines les plus attractifs pour les industriels, qui y voient une des technologies susceptibles de résoudre les problèmes d'encombrement et de limitation de capacité des réseaux sans fil large bande.



**Figure I-1 :** Schéma d'un système de transmission sans fil MIMO.

On distingue principalement deux types d'architectures de systèmes multi antennes développées pour atteindre l'objectif de l'augmentation de l'efficacité spectrale de la transmission.

- L'architecture originale, connue sous le nom de BLAST visait à augmenter principalement la capacité des systèmes et a naturellement pris le nom de système spatio-temporel par couches, puisque la chaîne de symboles est directement démultiplexée sur les antennes émettrices.
- Afin d'améliorer la qualité de la transmission, Tarokh [6] puis Alamouti[7] ont conçu des systèmes basés essentiellement sur la diversité, proposant un codage et un étiquetage conjoints. La redondance ainsi introduite permet alors de réduire considérablement le Taux Erreur Bit, sacrifiant une partie du gain en débit dû à la multiplicité d'antennes [8].

### I.2.1 Comment ça marche :

Pour comprendre comment fonctionne la technologie MIMO qui permet d'améliorer les performances des réseaux sans fil, et d'où elle tire la plupart de ses avantages, nous allons décrire brièvement son principe de fonctionnement.

Le MIMO permet d'envoyer plusieurs signaux différents sur des antennes différentes à des fréquences proches pour augmenter le débit ou la portée du réseau. Sa particularité passe donc par l'utilisation simultanée de plusieurs antennes, émettrices et réceptrices. Ainsi il permet d'améliorer les performances des appareils, qui aujourd'hui connaissent des problèmes

liés à la nature des ondes et à leur comportement suivant l'environnement, ce qui diminue la qualité de transmission et donc le débit ainsi que la portée.

C'est donc en palliant à ces problèmes que le MIMO se place en tête des technologies d'avenir pour les communications mobiles, et plus précisément la technologie WiFi (Wireless Fidelity).

Comme d'autres systèmes de communication sans fil, le Wi-Fi utilise des ondes radio pour transmettre des informations. Le problème, c'est que ces signaux se dégradent avec la distance et avec les obstacles, limitant ainsi la portée et le débit de la liaison. D'où les piètres performances des déclinaisons actuelles du Wi-Fi (les normes 802.11b et 802.11g), notamment en intérieur, entre différentes pièces d'un bâtiment.

C'est justement pour améliorer les performances de ces liaisons sans fil que des fabricants spécialisés (Linksys, Netgear, Belkin ou D-Link, par exemple) exploitent depuis quelque temps dans leurs produits Wi-Fi une nouvelle technique baptisée MIMO. Le principe du MIMO (Multiple Input, Multiple Output, soit multiples entrées, multiples sorties) est simple : il consiste à multiplier les signaux pour transmettre une même information. Peu importe que les ondes radio se dégradent avec la distance ou à cause des obstacles : les paquets de données qu'elles véhiculent sont réorganisés à l'arrivée pour reconstituer l'information d'origine.

Pour multiplier les signaux, les produits estampillés MIMO utilisent ainsi plusieurs antennes (jusqu'à huit). Mais ces antennes ne fonctionnent pas toutes de la même manière. De fait, deux méthodes coexistent actuellement, chacune défendue par un constructeur de circuit Wi-Fi (Airgo et Atheros).

### ***1 - Le signal d'origine est découpé par la borne MIMO***

Avec le système préconisé par le fabricant de processeurs Airgo, la puce de la borne MIMO scinde le signal à transmettre en deux ou trois flux complémentaires de paquets de données. Chacun est envoyé, sous forme d'ondes, via une antenne distincte. Pour garantir la compatibilité avec les matériels Wi-Fi de génération précédente, cette borne diffuse en même temps, via une antenne spécifique, le signal d'origine dans son intégralité. Il contient donc tous les paquets de données à transmettre.

## ***2 - Le signal d'origine est répliqué par la borne MIMO***

Avec le système préconisé par le fabricant de processeurs Atheros, la puce de la borne MIMO réplique le signal d'origine en plusieurs flux de données, diffusés simultanément via plusieurs antennes. Cette technique permet de garantir la compatibilité des bornes MIMO avec les matériels Wi-Fi de générations précédentes (802.11b et 802.11g), incapables de reconstituer un signal fragmenté.

## ***3 - Un seul signal est compris par un module 802.11g***

Si aucun obstacle ne vient brouiller sa transmission, le signal complet (non fragmenté) émis par une ou plusieurs antennes de la borne MIMO peut être intercepté et interprété par un matériel Wi-Fi classique.

## ***4 - Aucun signal n'est reçu par un module 802.11g éloigné***

Placé derrière un obstacle filtrant les ondes radio (mur épais ou un meuble métallique, par exemple), un module Wi-Fi classique (à la norme 802.11b ou 802.11g) demeure incapable d'interpréter les signaux altérés ou atténués émis avec la technique MIMO.

## ***5 - Le signal d'origine est reconstitué***

Même altérés par des obstacles, les signaux demeurent interprétables à leur réception. Le processeur du module MIMO reconstitue le signal d'origine grâce à un algorithme. Comme s'il s'agissait d'un puzzle, il remet dans le bon ordre les paquets de données reçus.

## ***6 - Le signal d'origine est reconstitué***

Même altérés par des obstacles, les signaux demeurent interprétables à leur réception. Le processeur du module MIMO utilise un algorithme pour reconstituer le signal d'origine en superposant les différents flux de données reçus [9].

### **I.2.2 Intérêt de la transmission sur plusieurs antennes :**

Lors de transmission, la quantité d'information transmise est limitée par la capacité du canal, ainsi cette limite est indépendante de l'utilisateur, et par conséquent, impose une limite aux transmissions, cette limite est appelée « capacité de Shannon ».

Pour un lien simple, c'est-à-dire une antenne à l'émission et une autre à la réception, la capacité maximale du canal est donnée par :

$$C = W \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{P}{N_0 W} \right) \quad \text{bps} \quad (\text{I.1})$$

Où :

$P$  est la puissance du signal utile en Watt,

$N_0$  est la densité spectrale de puissance du bruit calculée en W/Hz,

$W$  est la bande passante donnée en Hz.

Pour rendre la capacité indépendante de la bande passante du canal  $W$ , la notation d'efficacité Spectrale  $\eta$  a été définie, qui est le rapport entre la capacité du canal et la bande passante :

$$\eta = \frac{C}{W} = \log_2 \left( 1 + \frac{P}{N_0 W} \right) \quad \text{bps/Hz} \quad (\text{I.2})$$

Physiquement cela se traduit par la quantité d'information que l'on peut envoyer par chaque Hertz de bande passante. Autrement dit, l'efficacité spectrale renseigne sur la limite à laquelle on peut exploiter la bande passante disponible [10].

### I.2.3 Limite de SHANNON

La limite physique imposée par le canal à la quantité d'information envoyée nous pousse à trouver une solution pour améliorer le débit, tout en gardant une complexité du matériel raisonnable.

L'équation (I.2) montre que l'augmentation de la puissance du signal émis se traduit par une augmentation logarithmique de l'efficacité spectrale. À titre d'exemple, si on veut gagner 1 bps/Hz, on doit doubler la puissance de l'émetteur. Si on veut passer de 1 bps/Hz à 10 bps/Hz, on doit multiplier la puissance de l'émetteur par 1000. Ce qui n'est pas toujours possible.

Certaines techniques ont été utilisées pour améliorer qualitativement ou quantitativement l'information transmise, comme la technique de diversité spatiale en émission (MISO) ou la technique de diversité spatiale en réception (SIMO) [10].



### I.3 Architecture et caractérisation :

#### I.3.1 Architecture MIMO :

De part le nombre d'antennes existant dans les différents dispositifs d'antennes, on peut distinguer plusieurs configurations (systèmes). Cependant, ces architectures et particulièrement l'architecture MIMO, utilisent différentes fonctions de traitement du signal telles que la technique de combinaison, le codage spatio-temporel, le multiplexage spatial etc.

Ceci afin de permettre une meilleure performance du dispositif antenne.

##### I.3.1.1 Système SISO :

C'est l'architecture la plus simple qui utilise une seule antenne en émission et une autre en réception.

La capacité du canal SISO est

$$C = W \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{P}{N_0 W} \right) \text{ bps} \quad (\text{I.3})$$

Où :

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

$N_0$  : la densité spectrale de puissance du bruit calculé en W/Hz,

$W$  : la bande passante donnée en Hz.

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

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

$$C = \log_2(1 + \rho) \quad (\text{I.4})$$

##### I.3.1.2 Système MISO:

C'est une technique de diversité spatiale en émission. C'est-à-dire Plusieurs antennes émettent des signaux qui sont interceptés par une seule antenne en réception.

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

$$P = \sum_{i=1}^{N_t} P_i \quad (\text{I.5})$$

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

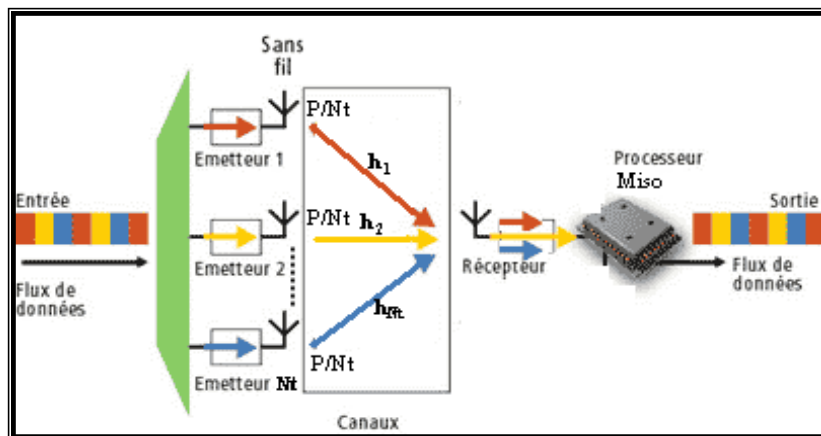
La capacité du canal MISO :

$$C = W \log_2 \left( 1 + N_t \frac{P_i}{N_0 W} \right) = W \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{P}{N_0 W} \right) \quad (I.6)$$

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

$$C = \log_2(1 + \rho) \quad (I.7)$$

L'équation (I.1) et (I.3) sont identiques, mais l'avantage de la technique MISO par rapport à la technique SISO est dans le fait que dans les multi trajets ; la probabilité d'évanouissement dans  $N_t$  antennes est inférieure à la probabilité d'évanouissement sur une seule antenne (Figure I-2).



**Figure I-2 : Dispositif MISO**

### I.3.1.3 Système SIMO :

C'est une technique qui utilise plusieurs antennes en réception pour lutter contre l'évanouissement dû au canal. Le signal reçu est additionné et le rapport signal sur bruit total est la somme des rapports signaux sur bruits de chacun des antennes de la réception. Ce principe est représenté sur la Figure I-3. La capacité du canal SIMO :

$$C = W \cdot \log_2 \left( 1 + N_r^2 \frac{P}{N_0 W} \right) \quad (I.8)$$

$N_r$  : le nombre d'antenne réceptrice.

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

$$C = \log_2(1 + N_r^2 \rho) \quad (I.9)$$

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

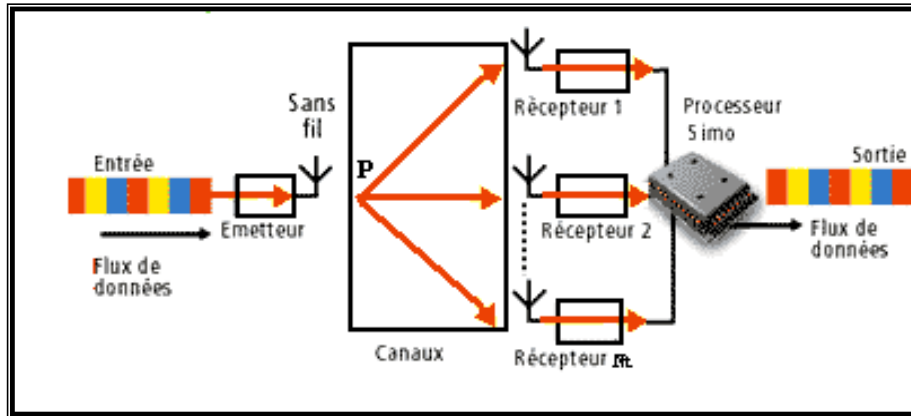


Figure I-3: Dispositif SIMO

#### 1.3.1.4 Système MIMO

La technologie MIMO permet d'augmenter le débit linéairement avec le nombre d'antenne à la réception et de contrer l'évanouissement du canal. Ainsi, elle permet de minimiser la probabilité d'évanouissement et d'atténuation du signal. La différence entre un système MISO et un système MIMO est que ; le MISO envoie les mêmes paquets aux antennes qui émettent à la même fréquence. Tandis que, le MIMO envoie des paquets différents aux antennes qui émettent à la même fréquence (Figure I-4).

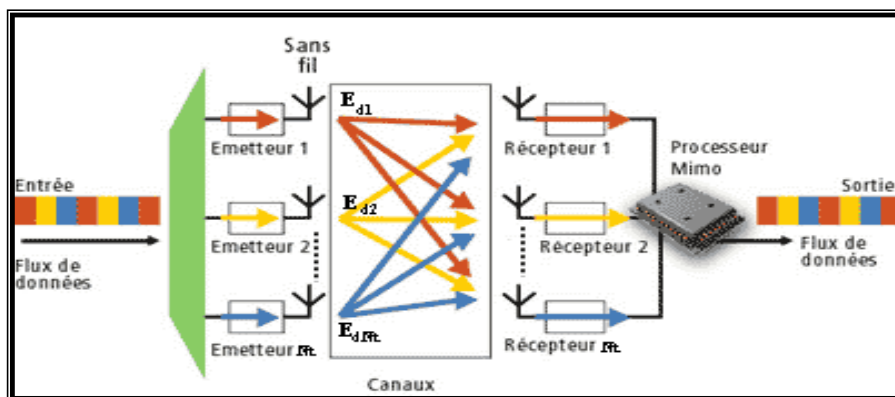
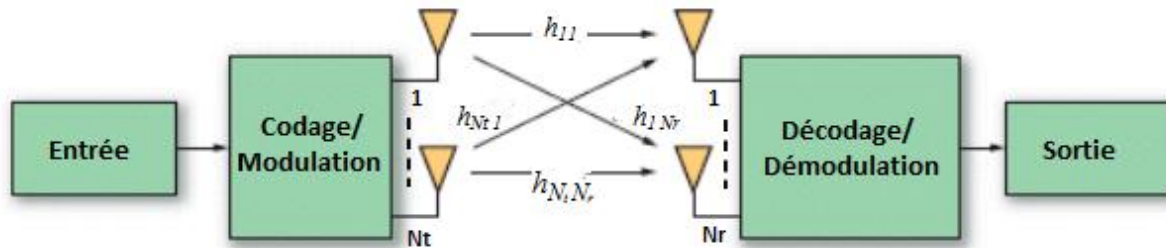


Figure I-4: Dispositif MIMO

#### I.4 Modèle de canal MIMO :

Considérons un système MIMO avec  $N_t$  émetteurs et  $N_r$  récepteurs (figure I-5). on suppose ici que le canal de transmission est non-sélectif en temps et en fréquence, ainsi le trajet entre la  $m^{ième}$  antenne émettrice et la  $n^{ième}$  antenne réceptrice est représenté par le coefficient d'atténuation complexe  $h_{nm}$ .



**Figure I-5 :** Schéma d'un système de transmission MIMO.

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

$$y_n(k) = \sum_{m=1}^{N_t} h_{nm} s_m(k) + b_n(k) \quad (\text{I.10})$$

Où  $b_n$  représente un bruit additif.

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

$$y(k) = Hs(k) + b(k) \quad (\text{I.11})$$

Avec

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1N_t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r1} & \cdots & h_{N_rN_t} \end{pmatrix}, \quad \text{et} \quad y = (y_1 \dots y_{N_r})^T$$

Par la suite on supposera que :

- Les symboles transmis sont de puissance unitaire,
- le bruit additif est blanc, gaussien, de moyenne nulle et de variance  $\sigma^2$
- le bruit et les symboles sont décorrélés, c'est-à-dire [1] :

$$E[ss^H] = I_{N_t}, \quad E[sb^H] = 0 \quad (\text{I.12})$$

### I.3.3 Capacité des canaux MIMO :

Dans un milieu de propagation riche en réflexions (beaucoup d'obstacles) l'architecture MIMO est capable de créer dans la même bande de fréquence plusieurs canaux indépendants [11]. Les débits supportés sont largement supérieurs à ceux atteints dans une architecture classique, dans le cas optimal la capacité de la liaison augmentant linéairement avec le nombre d'antennes minimum.

Pour un système SISO la capacité est donnée par la formule bien connue de Shannon :

$$C = \log_2(1 + \rho|h|^2) \text{ b/s/Hz} \quad (\text{I.13})$$

où  $h$  est le coefficient complexe du canal (supposé non dispersif ici). Ce coefficient peut être fixe (canal déterministe), ou aléatoire.  $\rho$  Représente le SNR en réception. Si l'on déploie  $N_r$  antennes en réception on obtient un système SIMO avec une capacité donnée par :

$$C = \log\left(1 + \rho \sum_{i=1}^{N_r} |h_i|^2\right) \text{ b/s/Hz} \quad (\text{I.14})$$

Où  $h_i$  représente le gain pour l'antenne  $i$ . La particularité de (I.14) c'est qu'une croissance linéaire de  $N_r$  apporte seulement une croissance en  $\log$  de la capacité, sur un canal AWGN. Notons que ce résultat est la capacité optimale de tout système exploitant la diversité en réception. Si tous les canaux  $h_i$  sont d'amplitude constante, on retrouve un résultat classique : le SNR résultant est égal au produit du SNR monovoie et du nombre d'éléments.

Si on déploie maintenant  $N_t$  antennes en émission avec une seule en réception, on obtient un système MISO avec une capacité donnée par :

$$C = \log\left(1 + \frac{\rho}{N} \sum_{i=1}^{N_t} |h_i|^2\right) \text{ b/s/Hz} \quad (\text{I.15})$$

Où la division par  $N_t$  sert à fixer la puissance totale en émission. On observe dans ce cas aussi une dépendance logarithmique du nombre d'antennes  $N_t$ . Si maintenant on veut profiter de la diversité en émission et en réception en même temps on déploie  $N_t$  antennes en émission et  $N_r$  antennes en réception pour obtenir un système MIMO avec une capacité donnée par la formule [12] :

$$C = \log_2 \left[ \det \left( I_{N_r} + \frac{\rho}{N_t} HH^* \right) \right] \text{ b/s/Hz} \quad (\text{I.16})$$

Où (\*) représente la transposée – conjuguée et  $H$  et une matrice  $N_r \times N_t$  qui caractérise le canal. Foschini [5] et Telatar [4] ont démontré tous les deux que la capacité donnée par (I.16) augmente linéairement avec  $m = \min(N_r, N_t)$  contrairement à une croissance logarithmique en (I.14) et (I.15). C'est le résultat fondamental concernant la capacité des systèmes MIMO, devenus omniprésents (future norme WiFi, WiMAX, 4G, ...).

Prenons comme exemple la figure (I.5) avec 4 antennes en émission et 4 antennes en réception la matrice caractérisant le canal est de la forme suivante :

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} \\ h_{41} & h_{42} & h_{43} & h_{44} \end{bmatrix} \quad (\text{I.17})$$

Où  $h_{ij}$  dépend de l'antenne  $i$  émission et de l'antenne  $j$  en réception [13].

#### I.4 Domaine d'utilisation de la technologie MIMO :

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

MIMO est également prévu pour être utilisé dans de radiotéléphonie mobile des normes telles que récente 3GPP et 3GPP2. En 3GPP, l'accès haute vitesse par paquets plus (HSPA+) et Long Term Evolution (LTE) normes prennent en compte MIMO. Par ailleurs, à soutenir pleinement les environnements cellulaires, y compris les consortiums de recherche MIMO IST-MASCOT proposons de développer des techniques avancées MIMO, par exemple, MIMO multi-utilisateurs (MU-MIMO) [14].

Les systèmes : HiperLAN/2, WiFi et les systèmes de la 4<sup>ème</sup> génération tels LTE et WiMAX utilisent la technologie MIMO-OFDM afin d'augmenter le débit de transmission et améliorer la qualité de transmission [10].

##### I.4.1 La technologie MIMO dans WiMAX :

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

Les réalisations de WiMAX qui emploient la technologie de MIMO sont devenues importantes. L'utilisation de la technologie de MIMO améliore la réception et tient compte d'une meilleure extension et taux de transmission. L'exécution de MIMO donne également à WiMAX une augmentation significative d'efficacité spectrale [15].

#### **I.4.2 La technologie MIMO dans WiFi :**

La norme 802.11n est disponible depuis le 11 septembre 2009. Le débit théorique atteint les 300 Mbit/s (débit réel de 100 Mbit/s dans un rayon de 100 mètres) grâce aux technologies MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) et OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [14].

### **I.5 Les avantages de la technologie MIMO**

La technique MIMO présente multiples avantages, nous citons :

- Exploiter les trajets multiples en bénéficiant des avantages de décoloration aléatoire, tel qu'il est connu que la déficience principale à la performance d'un système de communication sans fil s'estompe en raison de trajets multiples et des interférences.
- Augmenter le débit de données du système pour la même puissance rayonnée totale et la même largeur de bande de canal.
- Parvenir à très haute efficacité spectrale et c'est une solution parfaite pour la disponibilité de la bande passante limitée.
- Sauver la consommation électrique du système, car elle augmente la capacité du système et de fiabilité sans consommer un pouvoir excessif.
- Accroître la capacité du système, donc il peut prendre en charge un nombre beaucoup d'utilisateurs.
- Augmenter le système dans l'ensemble comme il peut soutenir des débits élevés.
- Augmenter la qualité de service et les revenus de manière significative [16].

## **Chapitre II**

# **Les Codes Spatio-temporel**



## I.6 Conclusion :

Dans les systèmes de communications traditionnels, il n'existe qu'une antenne à l'émission et une antenne à la réception. Or les futurs services de communications mobiles sans fils demandent plus de transmissions de données (augmentation de la capacité de transmission). Ainsi pour augmenter la capacité et satisfaire ces demandes, les bandes passantes de ces systèmes et les puissances à transmettre ont été largement augmentés. Mais l'utilisation de plusieurs antennes à l'émission et à la réception (Système MIMO) permettait d'augmenter le débit de transmission des données et cela sans augmenter ni la bande passante de l'antenne réceptrice, ni la puissance du signal à l'émission. Nous avons passé en revue les différents systèmes multi-antennaires SISO, SIMO et MIMO et donné les capacités correspondantes. Les systèmes MIMO ont un potentiel énorme en terme de capacité par rapport au SISO, SIMO ou MISO.

Les systèmes MIMO, malgré les caractéristiques attrayantes, sont plus complexes que les systèmes SISO. Sur les antennes de réception, les signaux reçus sont un mélange des contributions de tous les signaux émis.

Après avoir posé le modèle des systèmes MIMO, le prochain chapitre introduit les techniques exploitant la diversité spatiale dont les précodeurs linéaires. Nous pouvons raisonnablement supposer que le récepteur estime le canal et que cette information peut ensuite remonter à l'émetteur.

# Chapitre 2

## Les Codes Spatio-temporels

### Sommaire

---



---

II.1	Introduction .....	21
II.2	Diversité spatiale .....	21
II.3	Diversité spatio-temporelle .....	22
II.4	Les codes temps-espace .....	22
II.4.1	Codes spatio-temporels en treillis (STT) .....	23
II.4.2	Codes spatio-temporels en bloc STBC .....	24
II.5.2.1	<i>Les Codes espace-temps non orthogonaux</i> .....	25
II.5.2.2	<i>Codes temps-espace en bloc quasi-orthogonaux</i> .....	26
II.5.2.3	<i>Les Codes espace-temps orthogonaux (OSTBC)</i> .....	27
B.	<i>Les codes espace-temps en blocs de Tarokh</i> .....	32
II.5	Algorithmes de réception associés aux systèmes MIMO .....	33
II.5.1	Critère de forçage à zéro .....	34
II.5.2	Erreur Quadratique Moyenne Minimale (EQMM).....	34
II.5.3	Récepteur à Maximum de Vraisemblance (MV).....	35
II.5.4	Annulations successives d'interférences ordonnées (V-BLAST) .....	35
II.6	La Technique de modulation .....	36
II.7	Conclusion .....	37

---



---

## II.1 Introduction :

Les systèmes MIMO, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, permettent d'augmenter la capacité d'un canal de transmission grâce à l'utilisation de plusieurs antennes en émission et en réception. Le codage temps-espace a pour objectif de répartir l'information en temps et en espace dans le but d'améliorer les performances de la communication.

Ce chapitre présente les différentes familles des codes spatio-temporels : les codes spatio-temporels en treillis (STT) et les codes spatio-temporel en bloc (STB). Un code ST est caractérisé par son rendement, son ordre de diversité et son gain de codage. Il existe dans la littérature une multitude de codes ST dont nous citons le fameux code Alamouti [7] a proposé en 1998 un système à diversité qui augmente la fiabilité de la transmission mais seulement pour deux antennes à l'émission. En 1999, Tarokh [6] a étendu le codage d'Alamouti pour un nombre arbitraire d'antennes. Les codes d'Alamouti et de Tarokh font partie des codes en blocs espace-temps orthogonaux (OSTBC), qui envoient de manière redondante les symboles afin d'améliorer les taux de transmission correcte sur des canaux sélectifs.

## II.2 Diversité spatiale :

Le mécanisme le plus connu et probablement le plus simple pour réaliser la diversité est la diversité spatiale. En utilisant des antennes ayant des diagrammes de rayonnement identiques mais suffisamment espacées, la différence de phase fait que les signaux arrivant sur les antennes réceptrices ont peu de chance de s'évanouir en même temps. Il est possible d'utiliser des antennes multiples à l'émission, à la réception ou à la fois à l'émetteur et au récepteur.

Les systèmes exploitant la diversité spatiale en réception sont appelés système SIMO (" Single-Input Multiple-Output "). Les systèmes exploitant la diversité spatiale en émission sont appelés système MISO (" Multiple-Input Single-Output "). La troisième structure est l'utilisation de la diversité spatiale à la fois à l'émission et la réception nommé système MIMO (" Multiple-Input Multiple-Output ").

Les systèmes MIMO nous permettent non seulement de réduire l'effet d'évanouissement mais d'atteindre aussi les bornes de capacité largement supérieures à celles données par d'autres structures. L'inconvénient majeur de la diversité spatiale est l'encombrement car en théorie les antennes doivent être espacées d'au moins  $0,5 \lambda$  pour que les signaux puissent être

indépendants l'un de l'autre. Cependant, lorsque l'espacement entre les antennes est trop petit, d'autres mécanismes de diversité peuvent intervenir.

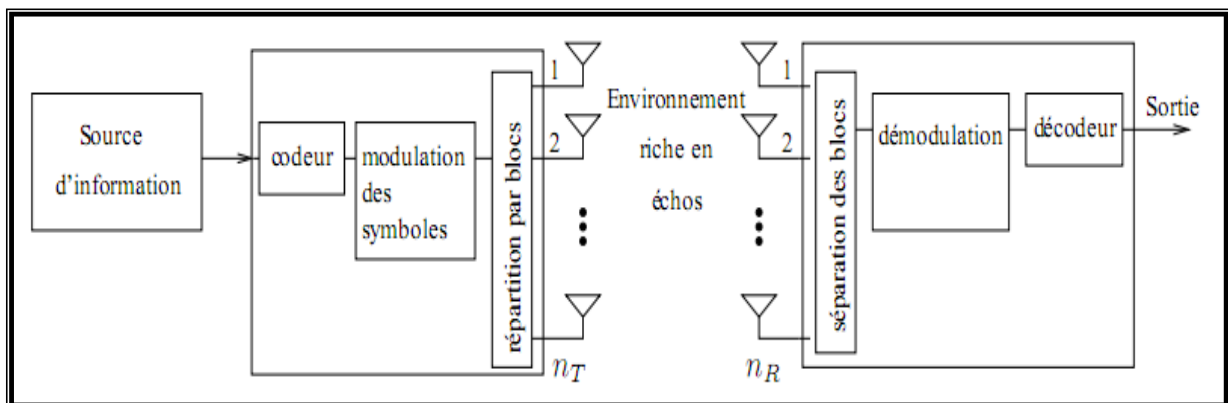
### II.3 Diversité spatio-temporelle :

La diversité spatio-temporelle est un exemple de combinaison de techniques de diversité. En effet, dans cette technique on envoie des versions de signal différées dans le temps via plusieurs antennes transmetteurs. Ainsi, on atteint un niveau de diversité plus aisé.

### II.4 Les codes temps-espace :

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.

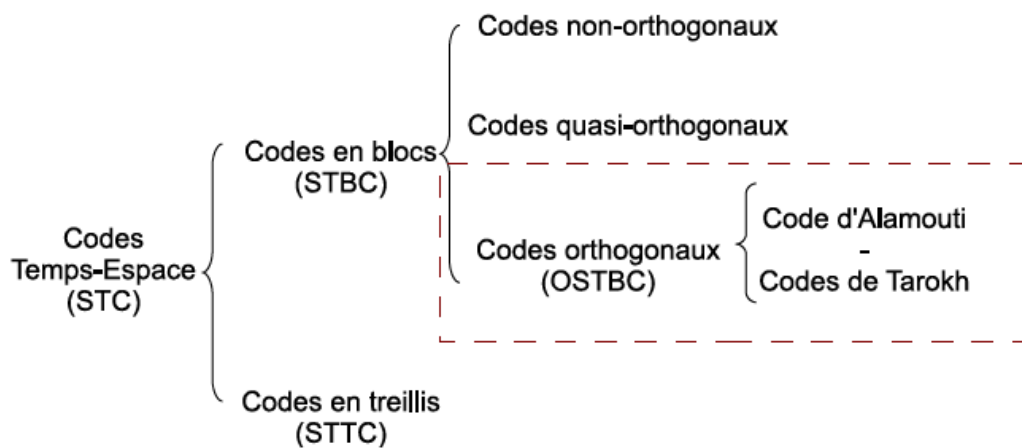
L'architecture générale du codage spatio-temporel (CST) est représentée sur la figure II.1. Le codage ajoute de la redondance aux données binaires émises afin d'augmenter la diversité spatiale et éviter les évanouissements propre au canal radio mobile.



**Figure II-1:** schéma du codage spatio-temporel

Une multitude de techniques de codage ont vu le jour dans le but d'une meilleure utilisation de la diversité de transmission. Les codes temps-espaces (STC : Space-Time Coding) sont apparus afin d'améliorer la fiabilité de la transmission dans un contexte de diversité d'émission [7]. La figure II.2 présente les différentes familles de codes.

Deux approches dérivées des codes SISO existent : les codes en blocs (STBC : Space-Time Block Coding) et les codes en treillis (STTC : Space Time Trellis Coding). Les premiers sont simples à mettre en œuvre, et les seconds offrent les meilleures performances. Notons que dans le contexte de l'implémentation et plus encore du prototypage, les codes en blocs sont presque tout le temps préférés à leur homologue en treillis.

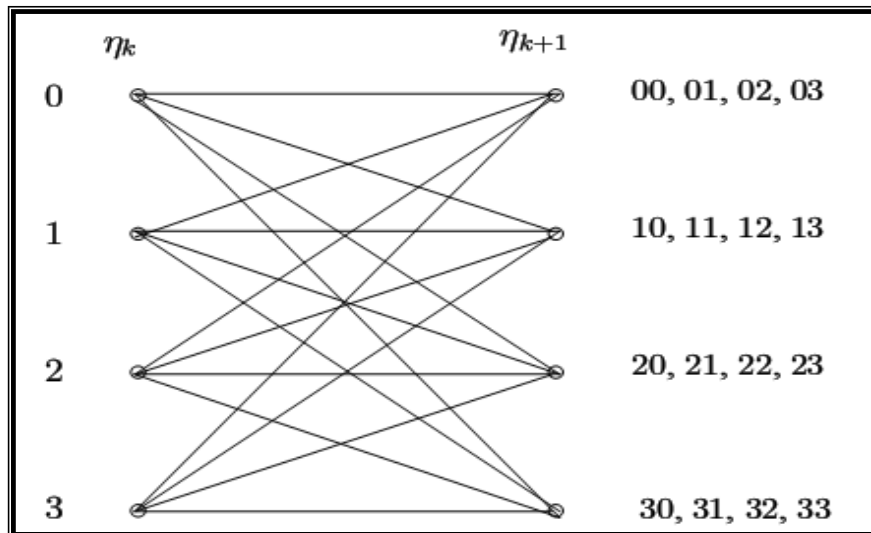


**Figure II-2 :** Les familles de codes temps-espace.

#### II.4.1 Codes spatio-temporels en treillis (STT) :

Proposés originellement par TAROKH et Al des laboratoires de recherche AT&T [17], ils combinent le codage de canal avec la modulation sur les antennes émettrices, et peuvent être considérés comme une extension des codes en treillis classiques [18] au cas des antennes multiples à l'émission et à la réception. Si le code est bien construit, on peut ajouter à l'avantage évident de diversité un gain de codage loin d'être négligeable.

Le CSTT crée des relations entre les signaux à la fois dans l'espace (plusieurs antennes émettrices) et dans le temps (symboles consécutifs). Le codeur est composé de  $N_T$  polynômes générateurs qui déterminent les symboles émis simultanément. Figure II-3 propose le diagramme de treillis d'un CSTT à 4 états utilisant une modulation simple MDP-4, avec un nombre d'antennes émettrices  $N_T = 2$ .



**Figure II-3:** Diagramme de treillis pour un CSTT à 4 états utilisant  $N_T = 2$  émetteurs et une modulation MDP-4.

Le fonctionnement du codeur est relativement simple, et peut être résumé comme suit:

- $\eta_k$  représente l'état du treillis à l'instant  $k$  et par conséquent l'état suivant est noté  $\eta_{k+1}$
- Considérons que le treillis est à l'état initial  $\eta_k = 0$ .
- L'état suivant du treillis dépend des bits d'information à coder. Ainsi, si les deux bits à coder sont 11, alors l'état suivant prend la valeur décimale équivalente c'est-à-dire  $\eta_{k+1} = 3$ .
- Les symboles à droite du treillis sont les codes associés à chaque doublet d'éléments binaires entrants.

Dans le cas ( $\eta_k = 0$  et  $\eta_{k+1} = 3$ ) le doublet à la sortie du codeur est donc 30 (3 sur la première antenne et 0 sur la seconde).

Du point de vue système, les STC insèrent de la redondance dans le débit symbole et diminuent donc le débit utile. On parle alors du rendement du code  $R$  pour quantifier la perte de débit utile. Le rendement est toujours inférieur ou égal à un. Le rendement, outre ses performances en termes de fiabilité de la liaison est également à prendre en compte dans le choix du code.

#### II.4.2 Codes spatio-temporels en bloc STBC :

Espérant réduire la complexité exponentielle du décodeur dévolu aux CSTT, Alamouti a proposé un schéma simple de diversité d'émission [7], étendu par la suite par Tarohk et al. [6]

pour former une nouvelle classe de codes spatio-temporels: les codes spatio-temporels en blocs (CSTB), possédant le même avantage de diversité que les techniques de combinaisons des répliques à gain maximal. Les CSTB sont définis comme une opération de modulation d'un bloc de symboles à la fois dans l'espace et dans le temps, créant ainsi des séquences orthogonales transmises par des antennes émettrices différentes.

Les codes en blocs se scindent en plusieurs groupes, jouant sur l'orthogonalité des données transmises par les antennes. Car la superposition des données sur chaque antenne de réception corrompt les données originales ; un codage particulier permettant au récepteur de les séparer facilement est qualifié d'orthogonal. Ce qualificatif donne son nom à un des groupes des codes STBC : les OSTBC (Orthogonal STBC). Les autres groupes sont alors qualifiés de codes STBC quasi-orthogonaux ou simplement de STBC s'il n'y a pas d'orthogonalité.

### ***II.5.2.1 Les Codes espace-temps non orthogonaux***

V. Tarokh a démontré qu'il n'existe pas de codes espace-temps en blocs orthogonaux à plus de deux antennes de rendement unitaire avec une diversité égale au nombre d'antennes d'émission [19]. Afin de conserver le rendement unitaire pour des systèmes à plus de deux antennes, le code espace-temps en blocs est nécessairement non orthogonal.

Les codes espace-temps non orthogonaux à quatre antennes d'émission a un rendement unitaire. La puissance totale émise est  $P$  avec une seule antenne d'émission. Pour un système à 4 antennes d'émission, chaque antenne émet un symbole sur chaque durée symbole, donc chaque antenne émet un symbole de puissance  $P/4$ .

#### ***Code proposé par Jafarkhani***

Le code espace-temps proposé par Jafarkhani dans [20] est le suivant :

$$\overline{S}_{Jaf} = \begin{bmatrix} \mathcal{G}_2^1 & -\mathcal{G}_2^{2*} \\ \mathcal{G}_2^2 & \mathcal{G}_2^{1*} \end{bmatrix} \quad (II.3)$$

$$\overline{S}_{Jaf} = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* & -s_3^* & s_4 \\ s_2 & s_1^* & -s_4^* & -s_3 \\ s_3 & -s_4^* & s_1^* & -s_2 \\ s_4 & s_3^* & s_2^* & s_1 \end{bmatrix} \quad (II.2)$$

Sous les hypothèses que les coefficients d'évanouissement sont constants sur quatre durées symboles consécutives, le signal reçu pour  $N_T = 4$  antennes d'émission et  $N_R$  antenne de réception est alors donné par :

$$r = h\overline{S_{jaf}} + n \quad (\text{II.3})$$

### II.5.2.2 Codes temps-espace en bloc quasi-orthogonaux

Pour un nombre d'antennes supérieur à 2, nous avons vu dans la partie précédente que les O-STBC complexes ne peuvent pas atteindre le rendement maximal unitaire  $R_c = 1$ . Dans [21], Jafarkani propose la construction de codes avec plus que 2 antennes d'émission atteignant un rendement maximal  $R_c = 1$  tout en assurant un gain de diversité maximal. Par contre, l'orthogonalité entre les différentes lignes du code n'est pas toujours vérifiée. Ces codes sont appelés codes temps-espace en blocs quasi-orthogonaux 'Quasi-Orthogonal Space-Time Block Codes (QO-STBC).

La construction de ces codes va être présentée à l'aide d'un exemple fourni dans [21]. L'objectif est de construire un code en bloc à 4 antennes d'émission à rendement plein. Si deux paires différentes  $(s_1, s_2)$  et  $(s_3, s_4)$  de signaux sont codées suivant le code d'Alamouti, les mots de code peuvent s'écrire :

$$C_{12} = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad C_{34} = \begin{bmatrix} s_3 & -s_4^* \\ s_4 & s_3^* \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

En utilisant ces deux matrices dans un schéma de type d'Alamouti, on peut alors construire le code

$$C = \begin{bmatrix} C_{12} & -C_{34}^* \\ C_{34} & C_{12}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 & s_2^* & -s_3^* & s_4 \\ s_2 & s_1^* & -s_4^* & s_3 \\ s_3 & s_4^* & -s_1^* & -s_2 \\ s_4 & s_3^* & -s_2^* & -s_1^* \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

La première ligne et la dernière ligne ne sont pas orthogonales. Il est donc clair que le gain de diversité n'est pas maximal. Dans [21], il est démontré que ce code a un gain de diversité égal à  $2N_R$  et donc n'atteint pas le gain de diversité maximal  $N_t N_R$ . En contrepartie, le rendement de ce code vaut 2. Le décodage ne se fait plus comme pour les O-STBCs par symbole mais par paires de symboles  $(s_1, s_2)$  et  $(s_3, s_4)$ .



Par analogie, des codes pour un plus grand nombre d'antennes d'émission peuvent être construits pour obtenir des codes à rendement maximal mais n'atteignant pas le gain maximal de diversité.

### ***II.5.2.3 Les Codes espace-temps orthogonaux (OSTBC):***

Les codes ST orthogonaux sont des codes ST en blocs tels que les mots de code sont des matrices orthogonales ou unitaires [20]. Cette propriété permet un décodage linéaire de rendement qui s'écroule lorsque le nombre d'antennes est grand.

Le premier code orthogonal à deux antennes émettrices et à rendement unitaire a été proposé par Alamouti dans [7] en 1998. Puis, Tarokh a proposé une généralisation de ce code pour trois et quatre antennes émettrices. Deux structures ont été proposées en 1999 par Tarokh, la première à rendement 1/2 et la seconde à rendement 3/4 [22].

#### ***A. Le code d'Alamouti***

- ***Cas de deux antennes en émission une antenne en réception***

On peut définir la technique d'Alamouti à partir de trois fonctions : la séquence de transmission et encodage, schème de combinaison au récepteur et la règle de décision de Forçage à zéro (figure II-4).

##### ***➤ Séquence de transmission et encodage***

Supposant qu'en veut transmettre la séquence  $\{s_0, s_1, s_2, \dots, s_n\}$  ; dans le cas ordinaire, le symbole  $s_0$  est transmis durant le premier intervalle de temps,  $s_1$  durant le seconde intervalle, puis  $s_2$  et ainsi de suite ; mais, dans cas du code d'Alamouti, les symboles sont groupés deux à deux antennes à un intervalle de temps donné. Durant le premier intervalle, les symboles  $s_0$  et  $s_1$  sont simultanément transmis de la première et de la deuxième antenne. Dans le second intervalle ces -  $s_1^*$  et  $s_0^*$  et ainsi de suite (Tableau II-1).

Notant que en groupant les symboles ainsi, en a toujours besoin d'un double intervalle de temps pour l'émission de deux symbole. Autrement dit, on conserve toujours le même débit que dans le cas d'une seule antenne.

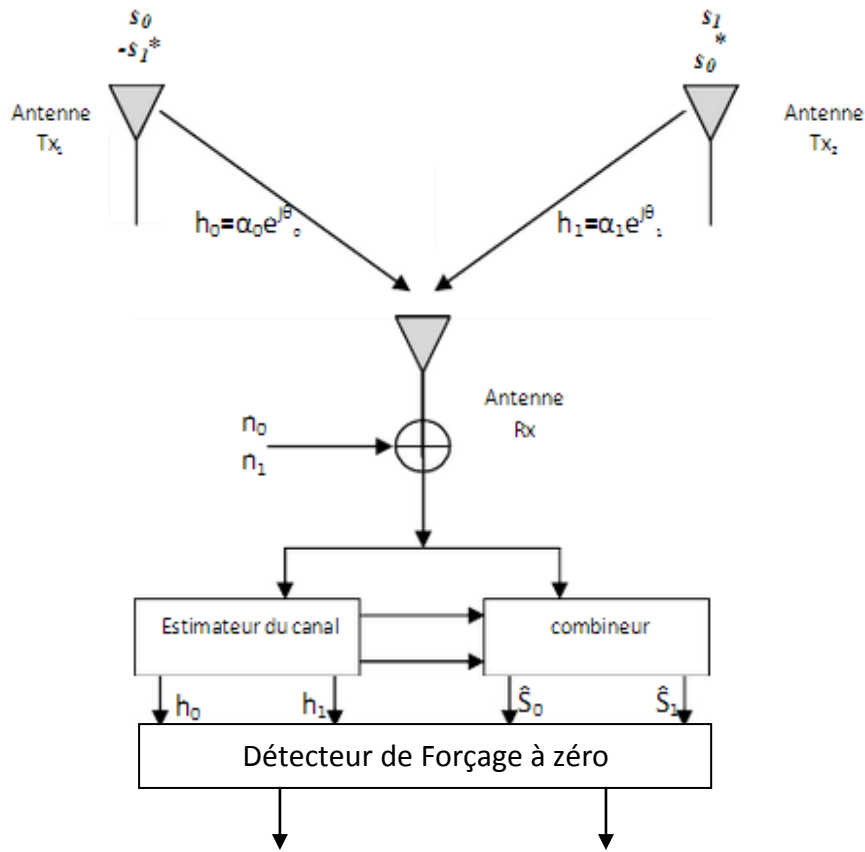


Figure II-4 : Schéma d'Alamouti avec une antenne émettrice et deux antennes réceptrices

	Antenne $T_{x_0}$	Antenne $T_{x_1}$
Temps $t$	$s_0$	$s_1$
Temps $t + T$	$-s_1^*$	$s_0^*$

Tableau II-1 : Schéma de transmission dans le temps

Les canaux au temps  $t$  sont définis par  $h_0(t)$  pour l'antenne  $T_{x_0}$  et  $h_1(t)$  pour l'antenne  $T_{x_1}$ . En faisant l'hypothèse que l'atténuation est constante pour la période donnée, on peut écrire

$$\begin{aligned}
 h_0(t) &= h_0(t + T) = h_0 = \alpha_0 e^{i\theta_0} \\
 h_1(t) &= h_1(t + T) = h_1 = \alpha_1 e^{i\theta_1}
 \end{aligned}
 \tag{II.6}$$

Où  $T$  est la durée entre le premier instant donné et le deuxième. Les signaux reçus peuvent donc être définis comme suit, où  $r_0$  et  $r_1$  sont les signaux reçus aux temps  $t$  et  $t+T$ ,  $n_0$  et  $n_1$  étant les variables aléatoires représentant le bruit et l'interférence au récepteur.

$$\begin{aligned} r_0 = r(t) &= h_0 s_0 + h_1 s_1 + n_0 \\ r_1 = r(t+T) &= -h_0 s_1^* + h_1 s_0^* + n_1 \end{aligned} \quad (\text{II.7})$$

Ou sous forme matriciel :

$$\begin{bmatrix} r_0 \\ r_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_0 & s_1 \\ -s_1^* & s_0^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_0 \\ h_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_0 \\ n_1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

$$r_a = Sh + n_a$$

Le code est orthogonal car :

$$S = \begin{bmatrix} s_0 & s_1 \\ -s_1^* & s_0^* \end{bmatrix} \text{ et } S^H = \begin{bmatrix} s_0^* & -s_1 \\ s_1^* & s_0 \end{bmatrix} \Rightarrow SS^H = (|s_0|^2 + |s_1|^2)I \quad (\text{II.9})$$

Avec  $S^H$  et l'hermitienne de  $S$  et  $I$  la matrice identité  $2 \times 2$

Si on calcule le conjugué de  $r_1$  dans (II.7) on peut récrire (II.8) sous la forme équivalent :

$$\begin{bmatrix} r_0 \\ r_1^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0 & h_1 \\ h_1^* & -h_0^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_0 \\ n_1^* \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

$$r = Hs + n$$

$$H = \begin{bmatrix} h_0 & h_1 \\ h_1^* & -h_0^* \end{bmatrix} \text{ et } H^H = \begin{bmatrix} h_0^* & h_1 \\ h_1^* & -h_0 \end{bmatrix} \Rightarrow H^H H = (|h_1|^2 + |h_0|^2)I = (\alpha_0^2 + \alpha_1^2)I \quad (\text{II.11})$$

### ➤ Schéma de combinaison au récepteur

Le module de combinaison montré dans figure II-4, forme les deux signaux suivant qui sont ensuite envoyé au détecteur

$$\begin{aligned} \hat{s}_0 &= h_0^* r_0 + h_1 r_1^* \\ \hat{s}_1 &= h_1^* r_0 - h_0 r_1^* \end{aligned} \quad (\text{II.12})$$

$$\begin{aligned} \hat{s} &= H^H r \\ &= H^H (Hs + n) \\ &= H^H Hs + H^H n \\ &= \begin{bmatrix} |h_0|^2 + |h_1|^2 & 0 \\ 0 & |h_0|^2 + |h_1|^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_0^* & h_1 \\ h_1^* & -h_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_0 \\ n_1 \end{bmatrix} \\ \hat{s}_0 &= (\alpha_0^2 + \alpha_1^2)s_0 + h_0^* n_0 + h_1 n_1^* \\ \hat{s}_1 &= (\alpha_0^2 + \alpha_1^2)s_1 + h_1^* n_0 + h_0 n_1^* \end{aligned} \quad (\text{II.13})$$

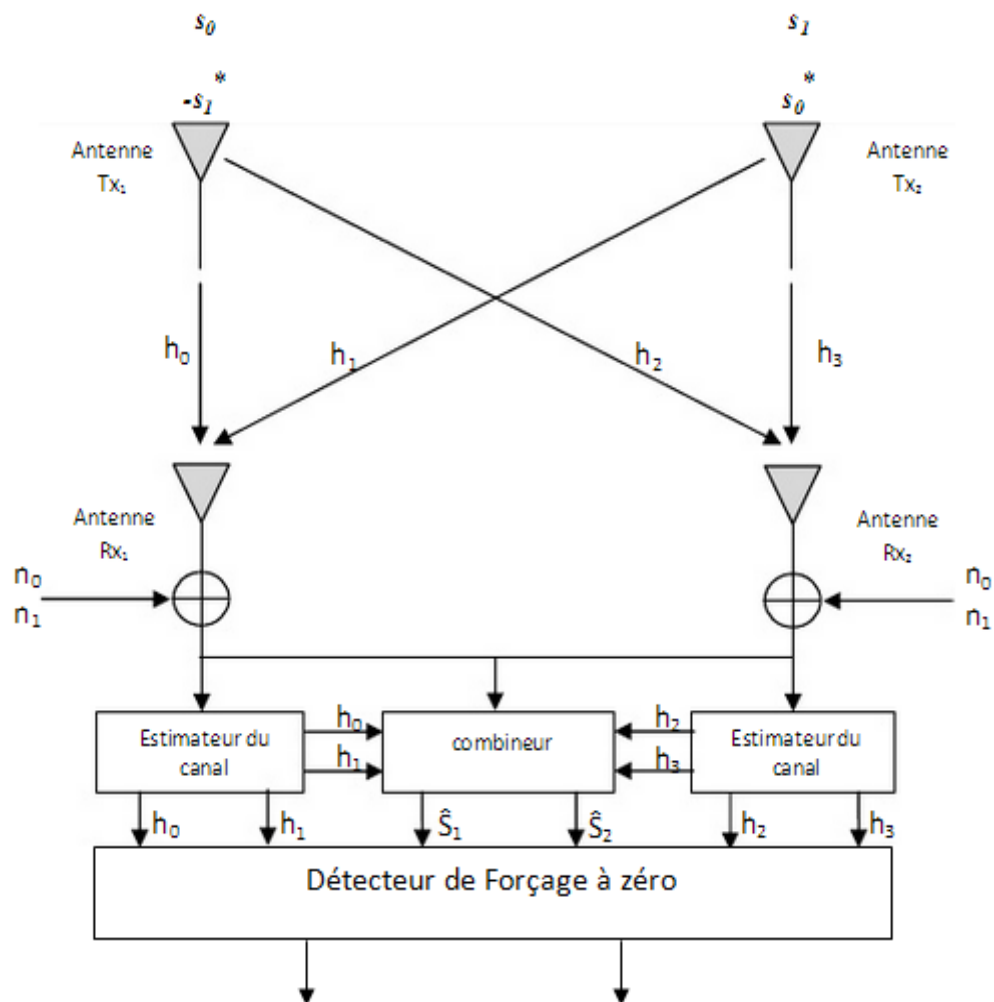
Les signaux combinés  $\hat{s}_0$  et  $\hat{s}_1$  sont envoyés au détecteur de forçage a zéro.

➤ **Règle de Critère de forçage à zéro**

En supposant l'équiprobabilité des symboles de  $s_i$  de constellation du type de modulation et la connaissance des canaux  $h_0$  et  $h_1$  à la réception, La détection par forçage à zéro (ou détection ZF) est basée sur l'inversion ou le pseudo inversion de la matrice.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \hat{s}_0 \\ \hat{s}_1 \end{bmatrix} &= (H^H H)^{-1} H^H \begin{bmatrix} r_0 \\ r_1 \end{bmatrix} \\ &= (H^H H)^{-1} H^H \left( H \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_0 \\ n_1 \end{bmatrix} \right) \\ &= \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \end{bmatrix} + (H^H H)^{-1} H^H \begin{bmatrix} n_0 \\ n_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{II.14})$$

• **Cas de deux antennes en émission deux antennes en réception.**



**Figure II-5:** Schéma d'Alamouti avec deux antennes émettrices

Considérant le cas de deux antennes en émission et autant en réception. On considère de plus deux périodes symbole.

	Antenne $Rx_0$	Antenne $Rx_1$
Temps $t$	$r_0$	$r_2$
Temps $t + T$	$r_1$	$r_3$

**Tableau II-2:** Signaux reçus aux niveaux des antennes réceptrices

	Antenne $Rx_0$	Antenne $Rx_1$
Antenne $Tx_0$	$h_0$	$h_2$
Antenne $Tx_1$	$h_1$	$h_3$

**Tableau II-3:** Canaux entre antennes émettrices et antennes réceptrices

Le schéma consiste en la transmission de 2 symboles différents  $s_0$  et  $s_1$  respectivement à l'antenne 1 et 2 pendant la première période symbole. Pendant la deuxième période symbole, les symboles  $-s_1^*$  et  $s_0^*$  sont transmis aux antennes 1 et 2 respectivement. La situation est résumée à Figure II-5.

Le codage et la séquence de symbole transmis reste le même que dans le cas d'un seul récepteur présentés dans le tableau II-1. Les signaux reçus aux niveaux des deux antennes réceptrices sont présentés dans le tableau II-2 et dans le tableau II-3 sont représentés les canaux entre antennes émettrices et réceptrices.

On en déduit le modèle suivant pour le signal reçu :

$$\begin{aligned}
 r_0 &= h_0 s_0 + h_1 s_1 + n_0 \\
 r_1 &= -h_0 s_1^* + h_1 s_0^* + n_1 \\
 r_2 &= h_2 s_0 + h_3 s_1 + n_2 \\
 r_3 &= -h_2 s_1^* + h_3 s_0^* + n_3
 \end{aligned} \tag{II.15}$$

Ou pour la première antenne :

$$\begin{bmatrix} r_0 \\ r_1^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0 & h_1 \\ h_1^* & -h_0^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_0 \\ n_1^* \end{bmatrix} \tag{II.16}$$

et pour la deuxième antenne :

$$\begin{bmatrix} r_2 \\ r_3^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_2 & h_3 \\ h_3^* & -h_2^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_2 \\ n_3^* \end{bmatrix} \tag{II.17}$$

$n_0, n_1, n_2, n_3$  étant les variables aléatoires représentant le bruit et l'interférence au récepteur.

Le combineur de Figure II-5 forme les deux signaux suivant qui sont ensuite envoyés au détecteur par forçage à zéro:

$$\begin{aligned}\hat{s}_0 &= h_0^* r_0 + h_1 r_1^* + h_2^* r_2^* + h_3 r_3^* \\ \hat{s}_1 &= h_1^* r_0 - h_0 r_1^* + h_3^* r_2^* - h_2 r_3^*\end{aligned}\quad (\text{II.18})$$

Ou sous forme matriciel

$$\begin{bmatrix} \hat{s}_0 \\ \hat{s}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0^* & h_1 \\ h_1^* & -h_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_0 \\ r_1^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_2^* & h_3 \\ h_3^* & -h_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_2^* \\ r_3^* \end{bmatrix}\quad (\text{II.19})$$

En substituant (II.16) et (II.17) dans (II.10) en obtiens :

$$\begin{aligned}\hat{s}_0 &= (a_0^2 + a_1^2 + a_2^2 + a_3^2) s_0 + h_0^* n_0 + h_1 n_1^* + h_2^* n_2 + h_3 n_3^* \\ \hat{s}_1 &= (a_0^2 + a_1^2 + a_2^2 + a_3^2) s_1 + h_1^* n_0 + h_0 n_1^* + h_3^* n_2 - h_2 n_3^*\end{aligned}\quad (\text{II.20})$$

### ➤ Règle de Critère de forçage à zéro

Si en combinant les équations (II.16) et (II.17) à intervalle de temps  $t$  et  $t+T$ ,

$$\begin{bmatrix} r_0 \\ r_2 \\ r_1^* \\ r_3^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0 & h_1 \\ h_2 & h_3 \\ h_1^* & -h_0^* \\ h_3^* & -h_2^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_0 \\ n_2 \\ n_1^* \\ n_3^* \end{bmatrix}\quad (\text{II.21})$$

$$H = \begin{bmatrix} h_0 & h_1 \\ h_2 & h_3 \\ h_1^* & -h_0^* \\ h_3^* & -h_2^* \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \hat{s}_0 \\ \hat{s}_1 \end{bmatrix} = (H^H H)^{-1} H^H \begin{bmatrix} r_0 \\ r_2 \\ r_1^* \\ r_3^* \end{bmatrix}\quad (\text{II.22})$$

### B. Les codes espace-temps en blocs de Tarokh

Le code d'Alamouti à deux antennes d'émission a été généralisé par Tarokh afin d'être appliqué à un nombre d'antennes d'émission plus élevé [7]. Tarokh a abouti à des codes espace-temps pour trois et quatre antennes d'émission. Cependant ces codes ont l'inconvénient d'avoir un rendement de code  $\mathcal{V}$  inférieur au rendement unitaire du code d'Alamouti.

Ces codes se nomment  $\mathcal{G}_3$  et  $\mathcal{G}_4$  pour les codes de rendement  $\mathcal{V} = 1/2$  pour respectivement trois et quatre antennes. Les codes  $\mathcal{H}_3$  et  $\mathcal{H}_4$  sont des codes de rendement  $\mathcal{V} = 3/4$ . Les matrices des codes  $\mathcal{G}_3$ ,  $\mathcal{G}_4$ ,  $\mathcal{H}_3$ ,  $\mathcal{H}_4$  sont respectivement les suivantes :

$$\overline{X_{\mathcal{G}_3}} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ -x_2 & x_1 & -x_4 \\ -x_3 & x_4 & x_1 \\ -x_4 & -x_3 & x_2 \\ x_1^* & x_2^* & x_3^* \\ -x_2^* & x_1^* & -x_4^* \\ -x_3^* & x_4^* & x_1^* \\ -x_4^* & -x_3^* & x_2^* \end{bmatrix}^T \quad (\text{II.23})$$

$$\overline{X_{\mathcal{G}_4}} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ -x_2 & x_1 & -x_4 & x_3 \\ -x_3 & x_4 & x_1 & -x_2 \\ -x_4 & -x_3 & x_2 & x_1 \\ x_1^* & x_2^* & x_3^* & x_4^* \\ -x_2^* & x_1^* & -x_4^* & x_3^* \\ -x_3^* & x_4^* & x_1^* & -x_2^* \\ -x_4^* & -x_3^* & x_2^* & x_1^* \end{bmatrix}^T \quad (\text{II.24})$$

$$\overline{X_{\mathcal{H}_3}} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \frac{x_3}{\sqrt{2}} \\ -x_2^* & x_1^* & \frac{x_3}{\sqrt{2}} \\ \frac{x_3^*}{\sqrt{2}} & \frac{x_3^*}{\sqrt{2}} & \frac{(-x_1 - x_1^* + x_2 - x_2^*)}{2} \\ \frac{x_3^*}{\sqrt{2}} & -\frac{x_3^*}{\sqrt{2}} & \frac{(-x_2 - x_2^* + x_1 - x_1^*)}{2} \end{bmatrix}^T \quad (\text{II.25})$$

$$\overline{X_{\mathcal{H}_4}} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \frac{x_3}{\sqrt{2}} & \frac{x_3}{\sqrt{2}} \\ -x_2^* & x_1^* & \frac{x_3}{\sqrt{2}} & -\frac{x_3}{\sqrt{2}} \\ \frac{x_3^*}{\sqrt{2}} & \frac{x_3^*}{\sqrt{2}} & \frac{(-x_1 - x_1^* + x_2 - x_2^*)}{2} & \frac{(-x_2 - x_2^* + x_1 - x_1^*)}{2} \\ \frac{x_3^*}{\sqrt{2}} & -\frac{x_3^*}{\sqrt{2}} & \frac{(-x_2 - x_2^* + x_1 - x_1^*)}{2} & -\frac{(x_1 + x_1^* + x_2 - x_2^*)}{2} \end{bmatrix}^T \quad (\text{II.26})$$

## II.5 Algorithmes de réception associés aux systèmes MIMO :

Il existe de nombreux algorithmes de réception envisageables pour récupérer les symboles lors d'une transmission multi-antennes. Les moins complexes sont les récepteurs

linéaires basés sur le critère de forçage à zéro (ZF) ou la minimisation de l'erreur quadratique moyenne (EQMM). L'algorithme de réception proposé pour le système V-BLAST original dans [23] essaie d'éliminer successivement les interférences dues aux émetteurs autres que celui dont on estime les symboles. Le détecteur optimal est basé sur le maximum de vraisemblance et se sert donc de toute l'observation dont il dispose pour récupérer l'information. Il existe enfin bon nombre d'algorithmes sous-optimaux basés sur le MV ou sur la distance euclidienne minimale. Le choix d'une technique repose sur deux critères : les performances doivent être les moins dégradées possibles par rapport à une détection optimale en termes de taux d'erreurs et la mise en œuvre doit être la moins complexe possible

### II.5.1 Critère de forçage à zéro

Le récepteur linéaire le plus simple est le récepteur basé sur le critère de forçage à zéro (ZF pour Zero-Forcing) qui inverse tout simplement la matrice de canal. Supposant que  $H$  est inversible, le vecteur de symboles estimés de taille  $n_T \times 1$  est alors donné par la relation:

$$\hat{s} = H^{-1}r \quad (\text{II.27})$$

Le récepteur ZF sépare ainsi parfaitement les symboles  $(s_i)_{i=1\dots n_T}$  transmis dans le même canal. Lorsque  $H$  est mal conditionnée, le récepteur ZF donne des résultats corrects pour des SNR élevés, mais pour de faibles SNR le bruit perturbe fortement les performances. En pratique, si  $H$  n'est pas carrée (i.e. si  $n_T \neq n_r$ ) le récepteur multiplie  $r$  à gauche par la pseudo-inverse  $H^+$  de la matrice de canal pour récupérer tous les symboles. Dans ce cas, le vecteur estimé s'écrit:

$$\hat{s} = H^+r = (H^*H)^{-1}H^*r \quad (\text{II.28})$$

Si un codeur est employé, on peut employer la redondance temporelle et spatiale pour retrouver les données [24].

### II.5.2 Erreur Quadratique Moyenne Minimale (EQMM)

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

$$\hat{s} = \left( H^*H + \frac{n_T}{SNR} \right)^{-1} H^*r \quad (\text{II.29})$$



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

### II.5.3 Récepteur à Maximum de Vraisemblance (MV)

Le récepteur qui apporte les meilleures performances en termes de taux d'erreur est le récepteur à maximum de vraisemblance. Cependant, ce récepteur possède aussi la plus grande complexité et celle-ci croît exponentiellement avec le nombre d'antennes émettrices. En supposant un bruit gaussien et un état de canal parfaitement connu côté récepteur, le récepteur MV donne les symboles estimés  $\hat{s}$  grâce à la formule

$$\hat{s} = \arg \min_s \|r - Hs\|^2 \quad (\text{II.30})$$

Où la recherche de la distance minimale s'effectue sur tous les mots de code  $s$  possibles. Il est important de noter que, si on note  $M$  la taille de la constellation, le récepteur doit calculer les distances pour un ensemble de vecteurs possibles de taille  $M N_T$ , et le temps de calcul devient vite prohibitif pour les constellations de grande taille, même pour un faible nombre d'antennes émettrices (par exemple, pour une 64-QAM et  $N_T = 3$ , le récepteur doit passer en revue 262 144 vecteurs différents) [24].

### II.5.4 Annulations successives d'interférences ordonnées (V-BLAST) :

Les trois récepteurs présentés jusqu'à présent présentent des avantages et des inconvénients : le MV est performant mais demande des calculs, le ZF est simple mais est sensible au bruit, et l'EQMM simple résiste mieux que le ZF au bruit mais n'élimine pas complètement les IES. C'est dans ce contexte que les laboratoires Bell ont développé l'algorithme Vertical-Bell Laboratories Layered Space-Time (V-BLAST) [25,26]. Ce récepteur contrairement aux précédents n'est pas linéaire. Il se base sur une égalisation (ZF ou EQMM) associée à un retour de décision dont le principe général est le suivant.

Le récepteur considère dans un premier temps le symbole sur l'antenne émettrice ayant le meilleur SNR puis procède à son estimation selon le critère choisi (MV, EQMM. . .) : la probabilité de se tromper sur ce symbole est a priori la plus faible. Sa contribution est ensuite

estimée puis retranchée du vecteur  $\mathbf{y}$  : les SNR des symboles restants sont alors améliorés. Cette manipulation est répétée jusqu'au dernier symbole.

En résumé, voici les étapes de cet algorithme aussi appelé Ordered Successive Interference Cancellation (OSIC) :

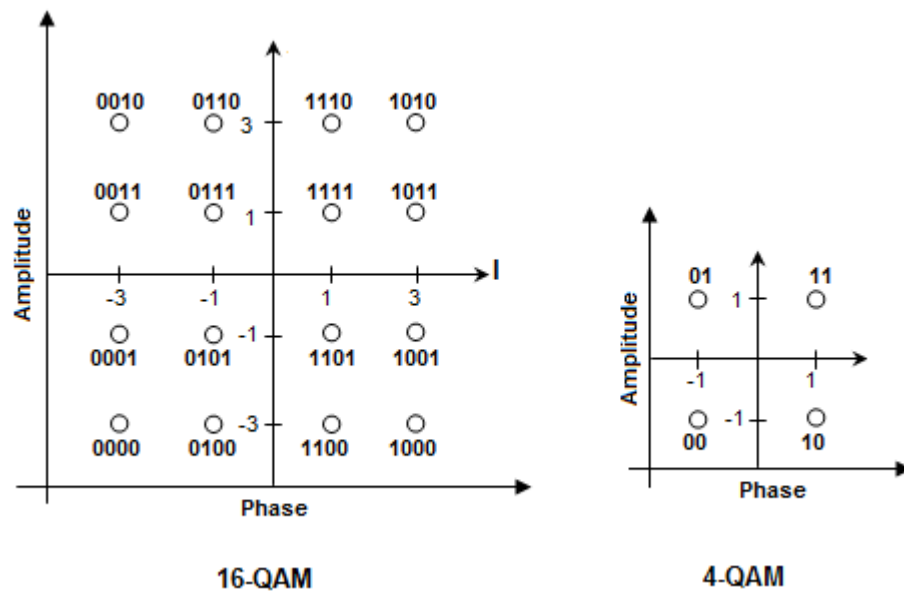
1. Choix du symbole  $s_i$  possédant le meilleur SNR.
2. Estimation du symbole  $s_i$  pour obtenir  $\hat{s}_i$ .
3. Calcul de la contribution de  $s_i$  en utilisant la colonne  $i$  de  $H$  et  $\hat{s}_i$ .
4. Soustraction de la contribution estimée.
5. La contribution du symbole étant supposée annulée, la colonne  $i$  de  $H$  est annulée.
6. Les étapes précédentes sont répétées jusqu'à ce que les  $n_T$  symboles soient estimés.

Le point faible de cette solution est la propagation des erreurs. En effet, si l'estimation d'un symbole est erronée alors celle de sa contribution est également fautive. Le prochain symbole ne voit pas son SNR amélioré et risque d'être faux aussi : l'erreur se propage aux symboles suivants. Cependant, les performances sont globalement améliorées sans nécessiter une charge importante de calculs

## II.6 La Technique de modulation :

La modulation est le processus par lequel une onde porteuse peut porter le message ou le signal numérique (série de uns et de zéros). Il y a trois méthodes de base à ceci: décalage d'amplitude (ASK : Amplitude Shift Keying), de fréquence (FSK : Frequency Shift Keying) et de phase (PSK : Phase Shift Keying), Les modulations ASK et PSK [10] peuvent être combinées pour créer la modulation d'amplitude en quadrature (QAM : Quadrature Amplitude Modulation) qu'on va travailler par la suite avec la 4-QAM et la 16-QAM (figure II-6). Le choix de la modulation s'effectue en fonction de la qualité du signal et du débit souhaités.

Dans le standard, deux stratégies de codage des constellations des modulations sont proposées : le codage de Gray et le codage dit "pragmatic". L'intérêt des différents codages de constellation pour une même modulation (appelé aussi par le terme anglophone mapping) est d'adapter celle-ci au canal de transmission et aux traitements en réception de façon à maximiser les distances entre symboles pour une meilleure détection. Cette méthode permet également d'augmenter la quantité d'information contenue dans chaque symbole .



**Figure II-6 :** Modulation d'amplitude en Quadrature 16-QAM et 4-QAM

## II.7 Conclusion :

Nous avons essayé dans ce chapitre de proposer une vue d'ensemble du domaine, nous avons présenté le codage spatio-temporel (CST) permet des communications plus sûres, il consiste à ajouter de la redondance aux données binaires émises afin d'augmenter la diversité spatiale et éviter les évanouissements propres au canal MIMO. En nous attardant principalement sur les différents types d'architectures et les différents types de codage les codes spatio-temporels en treillis (STT) et les codes spatio-temporel en bloc (STB). Nous nous sommes focalisé sur le code Alamouti. Afin d'améliorer la qualité de la transmission, Alamouti [7] et Tarokh [6] ont conçu des systèmes basés essentiellement sur la diversité, proposant un codage et un étiquetage conjoints.

Les antennes réceptrices reçoivent un mélange des contributions de toutes les antennes émettrices. Nous avons donc présenté plusieurs algorithmes, linéaires ou non, permettant de séparer les signaux et de retrouver l'information initiale. Les critères basés sur le forçage à zéro et la minimisation de l'erreur quadratique moyenne ont été passés en revue, avant d'aborder l'algorithme optimal basé sur le maximum de vraisemblance.

Pour l'instant, nous allons intéresser dans le prochain chapitre aux systèmes en couches qui présentent l'avantage d'augmenter l'efficacité spectrale.

## **Chapitre III**

# **Les techniques du Multiplexage Spatial**

# Chapitre 3

## Les Techniques du Multiplexage Spatial

### Sommaire

---

---

III.1	Introduction .....	40
III.2	Système MIMO à base de Multiplexage spatial .....	40
III.2.1	Architecture H-BLAST .....	41
III.2.2	Architecture D-BLAST .....	41
III.2.2	Turbo-BLAST .....	42
III.2.2	Architecture V-BLAST .....	43
III.2.2.1	Cas de V-BLAST de 8x8 antennes .....	45
III.3	Réception de V-BLAST .....	47
III.3.1	Récepteur ZF .....	47
III.3.2	Détection de V-BLAST .....	48
III.4	Conclusion.....	49

---

---

### III.1 Introduction :

Les systèmes de communication sans fil d'aujourd'hui exigent des débits élevés et faibles taux d'erreur binaire, BLAST (Bell Labs Layered Space-Time) est un système de communication MIMO, qui permet à plusieurs symboles à transmettre en même temps au sein de la même fréquence. Ainsi, en utilisant l'architecture BLAST, un débit de données élevé peut être atteint et améliore l'efficacité spectrale. Dans l'architecture BLAST, les caractéristiques de diffusion augmentent la précision de transmission en tenant compte de plusieurs chemins de diffusion comme distinct sous-canaux parallèles [27].

Ce chapitre porte sur quatre différents algorithmes BLAST à savoir D-BLAST (BLAST diagonale), H-BLAST (BLAST horizontal), Turbo-BLAST, et on se concentre sur V-BLAST (BLAST verticale), et ils ont été proposés par Foschini [23]. D-BLAST est la première architecture de ce système [22], D-BLAST est l'une des approches pour augmenter le débit de données et la capacité du système, et a une complexité des calculs [28]. Par la suite Foschini et Wolniansky [32] proposent deux schémas de codage plus réalistes, appelé V-BLAST et H-BLAST [22]. V-BLAST apparus pour atténuer la complexité de calcul de D-BLAST et pour l'augmentation de l'efficacité spectrale de la transmission. Le T-BLAST est construit par la combinaison du BLAST [29]. Le but de ces différentes architectures est d'améliorer les performances en termes de taux d'erreur binaire du système [30].

A la réception de nombreuses approches ont également été envisagées pour la séparation des signaux et la réception des symboles en provenance d'un canal MIMO, et une gamme complète d'algorithmes linéaires ou non est disponible. Dans ce chapitre on se base sur le critère du forçage à zéro (ZF) ; solution la plus simple mais aussi la moins performante. Ainsi que le récepteur à retour de décision V-BLAST qui améliore nettement les performances sans ordonnancement [31].

### III.2 Système MIMO à base de Multiplexage spatial :

Le multiplexage spatial permet de maximiser le débit d'information sur un canal MIMO. Cette technique a été introduite sous le nom de BLAST (Bell Labs Layered Space-Time) dans [26]. Le principe du multiplexage spatial est l'organisation en espace sans redondance d'une série d'informations. Le système transmet alors  $N_t$  fois plus de symboles utiles à chaque instant. Les antennes émettrices utilisent la même modulation et la même fréquence porteuse pour transmettre les symboles différents et indépendants sur les différentes

antennes. L'efficacité du système augmente donc en continuant à utiliser la même bande passante qu'un système classique. Les principales techniques de multiplexage spatial ont été développées par les laboratoires Bell. On peut distinguer différents types du système MIMO par multiplexage spatial, tels que D-BLAST, H-BLAST, V-BLAST ou Turbo-BLAST. Ce type de système MIMO est réalisé dans le but d'augmenter le débit de transmission (grâce au gain de multiplexage) [32].

### III.2.1 Architecture H-BLAST :

Cette architecture horizontale découpe directement la chaîne d'information en  $N_t$  sous-chaînes puis chacune est codée indépendamment. Après avoir été modulée, chaque sous-chaîne est transmise simultanément par son antenne (Figure III-1).

Le schéma III.2 fait ressortir cette architecture horizontale. Soit  $(b_1, \dots, b_k)$  les bits d'information à transmettre et  $(s_1^l, \dots, s_k^l)$  la  $l^e$  chaîne de symboles codés par le  $l^e$  codeur est transmise sur la  $l^e$  antenne [22].

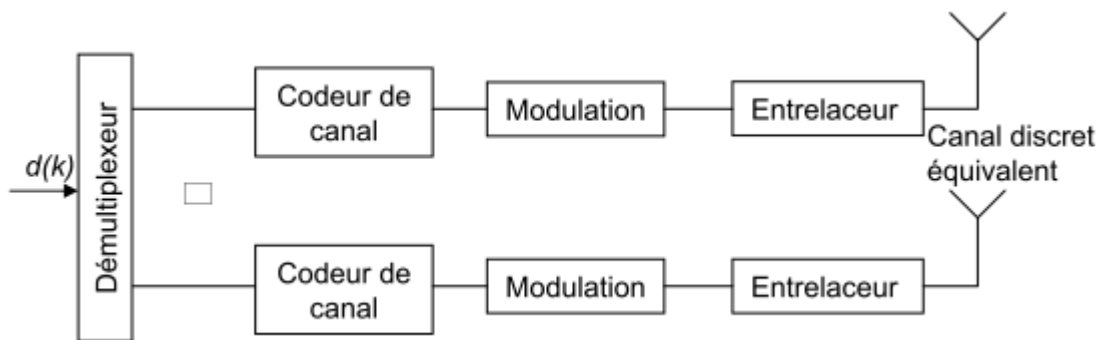


Figure III-1 : Architecture d'un transmetteur H-BLAST

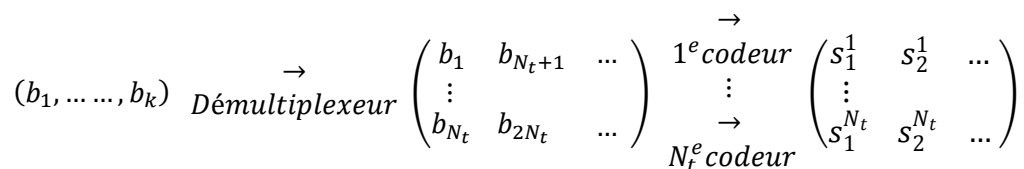
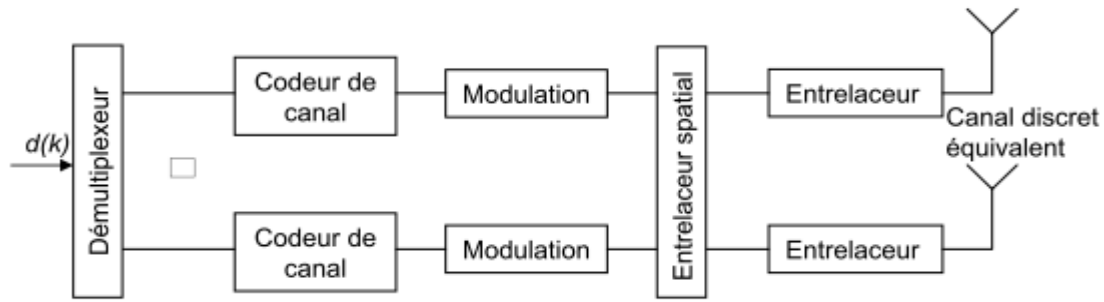


Figure III-2 : Schéma représentant le processus d'un émetteur H-BLAST

### III.2.2 Architecture D-BLAST :

Foschini a proposé dans [23] une architecture (figure III.3) à multiplexage spatial de manière à exploiter de façon optimale la diversité et la capacité. Dans cette architecture, les symboles sont détectés successivement antenne d'émission par antenne d'émission.



**Figure III-3** : Architecture d'un transmetteur D-BLAST

C'est une architecture diagonale nommée D-BLAST. La technique D-BLAST est décrite de manière plus théorique par Foschini en 1998 en considérant par la suite des cas plus réalistes [29]. Le flux de données est démultiplexé en entrée en  $N$  sous-flux ayant le même débit. Chaque sous-flux est ensuite codé (de la redondance peut être introduite suivant le codeur canal utilisé), mais il n'y a pas d'échanges d'informations entre ces codeurs. Puis les sous-flux sont modulés. L'association flux/antenne est périodiquement cyclique pour ne pas transmettre les  $N$  sous-flux vers la même antenne. Le système est plus résistant aux effets d'évanouissements du canal grâce au fait de transmettre un sous-flux en utilisant toutes les antennes possible.

Cette architecture permet d'obtenir un débit proche de la capacité mais elle possède une structure de codeur et décodeur plus complexe [32]. Le schéma (III.4) fait ressortir la complexité de cette architecture verticale et son manque d'efficacité due à une partie nulle de la matrice ralentissant ainsi la transmission [22] :

$$\begin{pmatrix} c_1^1 & c_1^1 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ c_1^{N_t} & c_2^{N_t} & \dots \end{pmatrix} \text{Entrelacement } s \rightarrow \begin{pmatrix} c_1^1 & c_1^2 & \dots & c_1^{N_t} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & c_2^1 & c_2^2 & \dots & c_2^{N_t} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & c_{N_t}^1 & c_{N_t}^2 & \dots & c_{N_t}^{N_t} \end{pmatrix}$$

**Figure III-4** : Schéma représentant le processus d'un émetteur D-BLAST

### III.2.2 Turbo-BLAST :

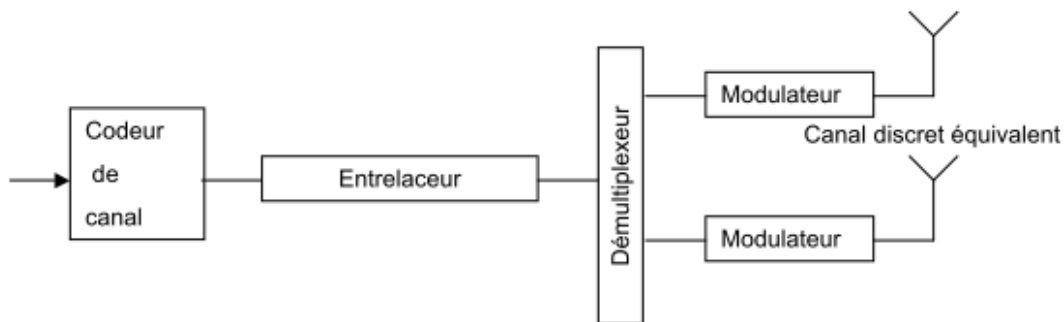
Le principe turbo appliqué au multiplexage spatial a été proposé dans [33] et [34]. La structure du transmetteur est exactement la même que celle du D-BLAST sauf que l'entrelaceur spatial n'ajoute pas de partie nulle dans la matrice [32].



### III.2.2 Architecture V-BLAST :

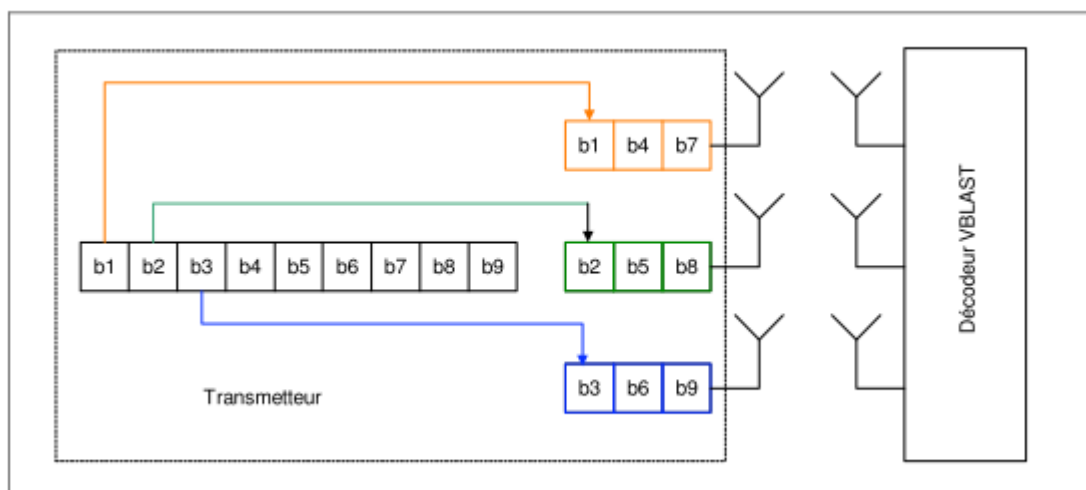
L'architecture V-BLAST (Vertical Bell Labs Layered Space-Time) [25], est la plus simple et la seule qui n'utilise pas de technique de codage, et [35] peut être vu comme une classe spéciale des codes de multiplexage spatial, son principe consiste à diviser le flux de données à l'entrée en plusieurs sous-flux, ces derniers sont transmis sur des antennes différentes. Cette architecture vise principalement à augmenter la capacité du système. Une description simple est donnée sur la figure (III.5).

Les antennes d'émission transmettent chacune un symbole différent, indépendamment de celui des autres antennes, mais en utilisant la même modulation et la même fréquence porteuse. La bande passante utilisée reste identique à celle d'un système classique, mais comme plusieurs symboles sont émis, l'efficacité spectrale augmente.



**Figure III-5** : Architecture d'un transmetteur V-BLAST.

La figure (III.6) illustre le démultiplexage et la modulation du code V-BLAST.



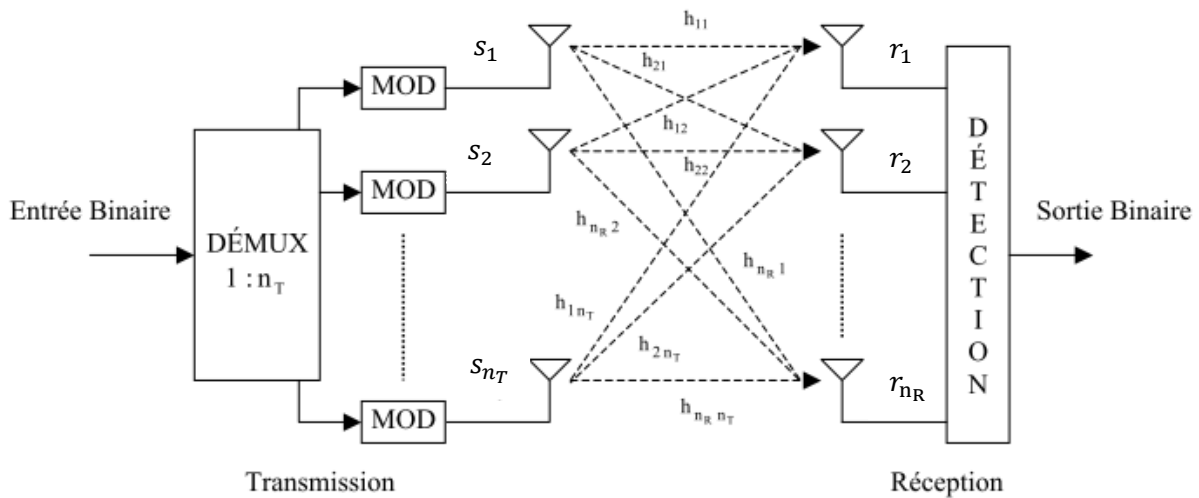
**Figure III-6** : Principe de l'architecture de modulation V-BLAST.

Les bits d'informations sont tout d'abord codés par un codeur de canal. Ensuite ces bits issus du codage sont alors entrelacés et le flux résultant est démultiplexé en  $N_t$  sous-flux attaquant chacun un modulateur. Les sous-flux de symboles résultants sont ensuite transmises sur l'antenne qui leur est associée. Soit  $(s_1^l, \dots, s_k^l)$  la  $l^e$  chaîne de symboles. La figure III.7 représente le processus que subit la chaîne binaire.

$$(b_1, \dots, b_k) \xrightarrow{\text{Démultiplexeur}} \begin{pmatrix} b_1 & b_{N_t+1} & \dots \\ \vdots & b_{2N_t} & \dots \\ b_{N_t} & b_{2N_t} & \dots \end{pmatrix} \begin{matrix} \rightarrow \\ \vdots \\ \rightarrow \end{matrix} \begin{matrix} 1^e \text{ modulateur} \\ \vdots \\ N_t^e \text{ modulateur} \end{matrix} \begin{pmatrix} s_1^1 & s_2^1 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ s_1^{N_t} & s_2^{N_t} & \dots \end{pmatrix}$$

**Figure III-7 :** Schéma représentant le processus d'un émetteur V-BLAST.

La figure (III.8) présente le schéma global de transmission et réception de V-BLAST :



**Figure III-8 :** V-BLAST Non Codé.

Le système complet comprend  $N_t$  antennes d'émission et  $N_r$  antennes de réception. Le coefficient  $h_{ji}$  est le gain complexe du trajet entre l'antenne d'émission  $i$  et l'antenne de réception  $j$ . Ces gains sont modélisés comme des variables aléatoires gaussiennes, centrées, complexes et indépendantes avec une variance égale à 0.5 pour chaque partie réelle et imaginaire.  $s_i$  Représente le symbole émis par l'antenne d'émission  $i$ . Le signal  $r_j$  reçu par l'antenne  $j$  peut par conséquent s'écrire de manière discrète:

$$r_j = \sum_{i=1}^{n_t} h_{ji} s_i + n_j \tag{III.1}$$

Où  $r_j$  est le bruit gaussien complexe additif sur l'antenne  $j$ . Les  $n_j$  sont considérés comme variables aléatoires gaussiennes centrées, complexes et indépendantes de variance  $0.5\sigma^2$  par dimension complexe :  $E[|n_j|^2] = \sigma^2$ . Les coefficients  $h_{ji}$  sont indépendants entre eux ce qui revient à supposer un espacement suffisant entre les antennes d'émission et de réception. On suppose que le récepteur connaît parfaitement les gains complexes des trajets et la variance du bruit.

Si l'on considère à présent l'ensemble des symboles reçus simultanément par les antennes c.à.d. on a synchronisation à l'émission et à la réception alors le système peut s'écrire sous la forme matricielle suivante:

$$r = Hs + n \quad (\text{III.2})$$

Où  $H$  est la matrice de canal de taille  $n_R \times n_T$  définie par l'ensemble des trajets:

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1n_T} \\ h_{21} & \cdots & h_{2n_T} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n_R1} & \cdots & h_{n_Rn_T} \end{bmatrix} \quad (\text{III.3})$$

Avec  $s$  est le vecteur émis de taille  $n_T \times 1$  et  $n$  le vecteur de bruit de taille  $n_R \times 1$  [29].

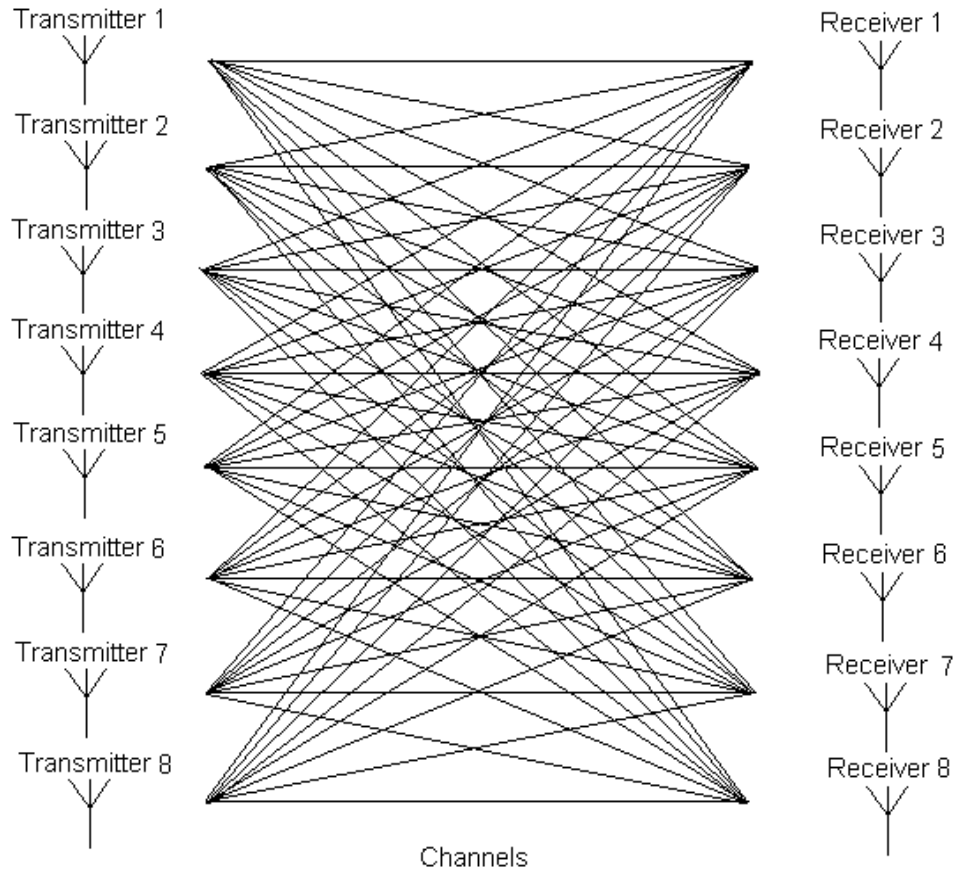
### III.2.2.1 Cas de V-BLAST de 8x8 antennes:

Dans un canal MIMO de  $8 \times 8$ , l'utilisation probable de la mise à disposition des 8 antennes d'émission peut être comme suit:

1. Considérons que nous avons une séquence de transmission, par exemple  $s_1, s_2, s_3, \dots, s_n$
2. Dans la transmission normale, nous envoyons  $s_1$  dans le premier intervalle de temps,  $s_2$  dans le second intervalle de temps, puis  $s_3$  et ainsi de suite.
3. Cependant, comme nous avons maintenant 8 antennes d'émission, nous pouvons regrouper les symboles en groupes de 8. Dans le premier intervalle de temps, envoyer  $s_1$  jusqu'à  $s_8$  à partir de la première jusqu'à la huitième antenne. En deuxième tranche de temps, envoyer  $s_9$  jusqu'à  $s_{16}$  à partir de la première jusqu'à la huitième antenne, envoyer  $s_{17}$  et  $s_{24}$  dans le troisième intervalle de temps et ainsi de suite.

4. Notez que lorsque nous regroupons deux symboles et de les envoyer dans un intervalle de temps, il suffit de  $\frac{n}{2}$  intervalles de temps pour terminer la transmission, le débit de données est doublé [36].

Dans la figure ci-dessous, le canal de l'émetteur  $i$  au récepteur  $j$  est présenté par  $h_{ij}$



**Figure III-9** : Cas de V-BLAST de 8x8 antennes

Les symboles sont transmis de la manière suivante (Tableau III.1), Où  $T$  dénote les émetteurs et  $s_i$  sont des symboles moduler.

	$T_1$	$T_1$	$T_1$	$T_1$	$T_1$	$T_1$	$T_1$	$T_1$
1 <sup>ier</sup> intervalle de temps	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_4$	$s_5$	$s_6$	$s_7$	$s_8$
2 <sup>iem</sup> intervalle de temps	$s_9$	$s_{10}$	$s_{11}$	$s_{12}$	$s_{13}$	$s_{14}$	$s_{15}$	$s_{16}$

**Tableau III-1** : Manière de transmission des symboles pour 2 intervalles de temps

Les vecteurs reçus peuvent être écrites dans l'équation de la matrice à partir de la formule III.2

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \\ r_5 \\ r_6 \\ r_7 \\ r_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} & h_{15} & h_{16} & h_{17} & h_{18} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} & h_{25} & h_{26} & h_{27} & h_{28} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} & h_{35} & h_{36} & h_{37} & h_{38} \\ h_{41} & h_{42} & h_{43} & h_{44} & h_{45} & h_{46} & h_{47} & h_{48} \\ h_{51} & h_{52} & h_{53} & h_{54} & h_{55} & h_{56} & h_{57} & h_{58} \\ h_{61} & h_{62} & h_{63} & h_{64} & h_{65} & h_{66} & h_{67} & h_{68} \\ h_{71} & h_{72} & h_{73} & h_{74} & h_{75} & h_{76} & h_{77} & h_{78} \\ h_{81} & h_{82} & h_{83} & h_{84} & h_{85} & h_{86} & h_{87} & h_{88} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \\ s_5 \\ s_6 \\ s_7 \\ s_8 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \\ n_4 \\ n_5 \\ n_6 \\ n_7 \\ n_8 \end{bmatrix} \quad (\text{III. 4})$$

### III.2.2.2 Règle de décision de forçage à zéro:

La détection par forçage à zéro (ou détection ZF) est basée sur l'inversion ou le pseudo inversion de la matrice.

$$\begin{bmatrix} \hat{s}_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \\ s_5 \\ s_6 \\ s_7 \\ s_8 \end{bmatrix} = (H^H H)^{-1} H^H \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \\ r_5 \\ r_6 \\ r_7 \\ r_8 \end{bmatrix} \quad (\text{III. 5})$$

## III.3 Réception de V-BLAST :

Il existe de nombreux algorithmes de réception envisageables pour récupérer les symboles lors d'une transmission multi-antennes. Les moins complexes sont les récepteurs linéaires basés sur le critère de forçage à zéro (ZF) ou la minimisation de l'erreur quadratique moyenne (MMSE). L'algorithme de réception proposé pour le système V-BLAST est connu sous le terme OSIC (Ordered Serial Interference Cancellation) [29], essaie d'éliminer successivement les interférences dues aux émetteurs autres que celui dont on estime les symboles[32]. Ils sont sous-optimaux en termes de TEB.

### III.3.1 Récepteur ZF :

Ce récepteur est le plus simple et aussi le moins performant. Il cherche à annuler les contributions des autres émetteurs sur chaque symbole, sépare ainsi parfaitement les symboles  $(s_i)_{i=1 \dots N_t}$  transmis dans le même canal. Ceci revient à inverser la matrice de transfert du canal :

$$\hat{s} = Ws = H^+ s = (H^H H)^{-1} H^H s \quad (\text{III.6})$$

Où  $H^+$  représente le pseudo-inverse, et  $W = H^+ = (H^H H)^{-1}$ .

Lorsque  $H$  est mal conditionné, son inversion multiplie le bruit et dégrade alors sérieusement les performances à faible SNR [37].

### III.3.2 Détection de V-BLAST :

Les récepteurs  $1, 2, \dots, N_r$  sont des récepteurs QAM conventionnels. Ces récepteurs opèrent aussi en canal commun. Le processus de traitement du signal à la réception utilise une combinaison des anciennes et nouvelles techniques pour séparer les signaux de manière efficace. Ainsi, une grande efficacité spectrale est atteinte et la capacité de Shannon est approchée à 90 %. En effet, la technique V-BLAST propose en plus d'une détection linéaire par annulation des interférences telles que proposée par les méthodes de détection linéaires, une soustraction des symboles déjà détectés. En utilisant cette technique les interférences émanant des symboles déjà détectés sont aussi soustraites du vecteur reçu générant ainsi un nouveau vecteur renfermant moins d'interférences.

Lorsque la soustraction des symboles est utilisée, l'ordre dans lequel les composantes du vecteur  $s$  sont détectées, devient important. A cet effet, il a été démontré qu'en détectant à chaque étape la composante ayant le plus grand SNR, c.à.d. le signal le plus fort est détecté en premier alors on réalise une détection avec un ordre optimal.

L'algorithme de détection V-BLAST peut être décrit comme suit [31] :

Ordonnancement des puissances des composantes du vecteur reçu. Si on suppose que  $\{K_1, K_2, \dots, K_{N_t}\}$  est l'ordre optimal de la détection, alors on peut écrire:

$$SNR_{(s_{k_1})} \geq SNR_{(s_{k_2})} \geq \dots \geq SNR_{(s_{k_{N_t}})}$$

Où  $SNR_{(s_{k_i})}$  désigne le  $SNR$  de la composante  $s_k$  du vecteur émis  $s$ .

**Étape 1:** En utilisant le vecteur annulant  $w_k$ , former la décision  $h$  telle que:

$$y_k = w_k^T \cdot r_1 \quad (III.7)$$

Où  $r_1 = r$  désigne le vecteur reçu.

**Étape 2:** Décider sur  $y_k$  pour obtenir  $\hat{s}_k$

$$\hat{s}_k = Q(y_k) \quad (III.8)$$

Où  $Q(.)$  désigne une opération de quantification, suivant la constellation utilisée.

**Étape 3:** Soustraction des symboles déjà détectés du vecteur reçu:

$$r_2 = r_1 - \hat{s}_k(H)_k \quad (\text{III.9})$$

Où  $(H)_k$  est la colonne  $k$  de la matrice canal  $H$ . Le processus est par suite réitéré jusqu'à la détection de tous les symboles.

Le calcul du vecteur annulant  $w_k$  dépend du critère de détection choisi. Les critères les plus fréquents sont le critère de forçage à zéro (Zero Forcing: ZF) ou le critère de minimisation de l'erreur quadratique moyenne (MMSE). Si ZF est choisi comme critère de détection, alors  $w_k$  est la ligne  $k$  de la matrice pseudo-inverse  $H^+$  donnée par (III.6) [37].

### III.4 Conclusion:

Ce chapitre porte sur l'étude de multiplexage spatial qui permet d'augmenter le débit d'information et qui est proportionnelle au nombre d'antennes d'émission sans augmenter la bande passante ou la puissance transmise. Nous avons présenté les différents types d'architectures de BLAST et nous choisissons l'architecture basée sur V-BLAST qui vise principalement à augmenter la capacité du système.

Les antennes réceptrices reçoivent un mélange des contributions de toutes les antennes émettrices. Nous avons donc présenté deux types d'algorithmes de réception, tel que ZF et V-BLAST, permettant de séparer les signaux et de retrouver l'information initiale, dans le but de faire augmenter le débit de plus en plus et d'avoir la meilleure qualité de signal à la réception.

Dans la suite de notre travail, nous allons nous pencher sur la simulation des capacités des différentes architectures SISO, MISO et MIMO. Puis nous allons présenter les résultats de simulation en implémentant les deux techniques présentées (STBC et V-BLAST).

## **Chapitre IV**

# **La Simulation des performances STBC et V-BLAST**



# Chapitre 4

## La Simulation des performances de STBC et V-BLAST

### Sommaire

---

---

IV-1	Introduction .....	52
IV.2	Le langage utilisé .....	52
IV.3	Capacité des systèmes MIMO .....	52
IV.4	Simulation d'un système STBC .....	52
IV.5	Simulation d'un système V-BLAST .....	59
IV.6	Comparaison entre système STBC et V-BLAST .....	62
IV.7	Conclusion .....	63

---

---

### **IV-1 Introduction :**

Avant de concevoir des systèmes de communication, l'évaluation de leurs performances s'avère nécessaire. Toutefois, le but de ce travail est d'arriver à réaliser une simulation qui traitera les performances des systèmes MIMO et vérifions qu'il répond aux objectifs fixés, commençant par effectuer une comparaisant entre des différentes capacités que nous allons vus dans le 1<sup>er</sup> chapitre, puis passant a réalisé les deux configurations MIMO, STBC et V-BLAST, pour pouvoir finalement effectuer une comparaison entre les deux systèmes. L'étude des performances de ces systèmes est réalisée en termes de capacité de transmission et aussi en termes de taux d'erreur binaire BER en fonction du rapport signal sur bruit SNR.

### **IV.2 Le langage utilisé :**

Le choix du bon environnement de programmation est très important pour le développement des projets. Cela se fait suivant plusieurs facteurs: la puissance de compilation, la facilité d'utilisation, la disponibilité de plusieurs fonctionnalités et la communication avec d'autres environnements, etc.

Afin de réaliser les différentes simulations de notre système, nous avons eu recours aux outils du logiciel MATLAB®. Ce dernier est un langage de calcul scientifique de haut niveau et un environnement interactif pour le développement d'algorithmes, la visualisation et l'analyse des données, ou encore le calcul numérique (MATLAB veut dire MATrix LABoratory).

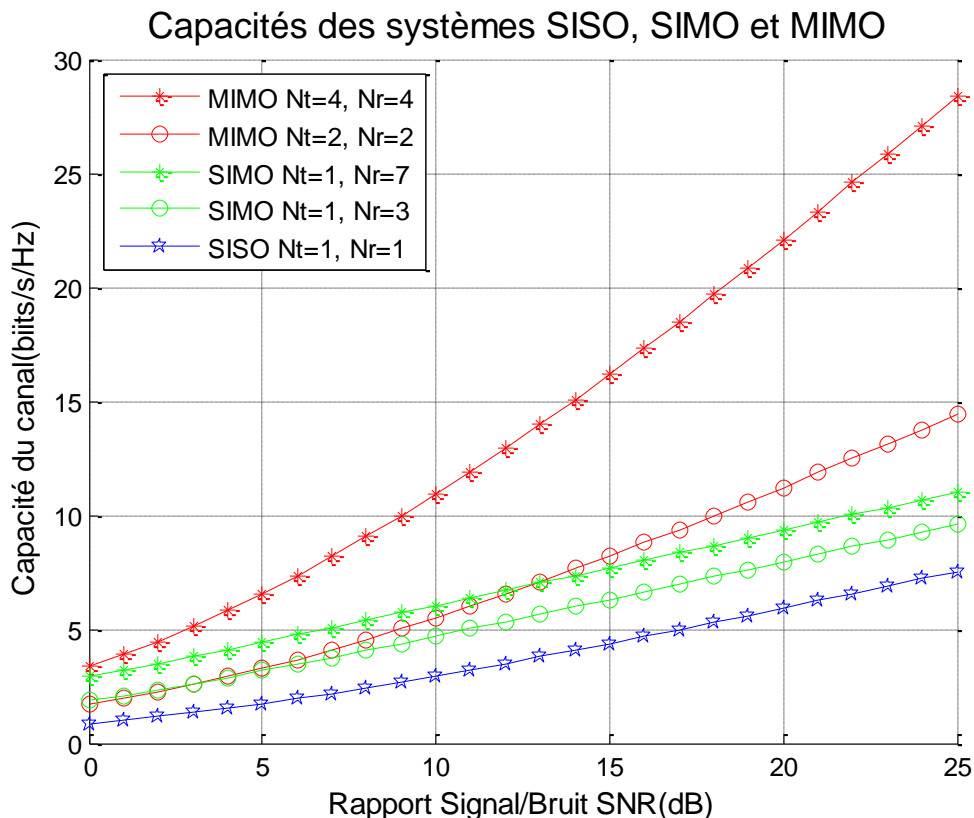
En utilisant MATLAB, nous pouvons résoudre des problèmes de calcul scientifique plus rapidement qu'avec les langages de programmation traditionnels ; car il n'est pas nécessaire d'effectuer les tâches de programmation de bas niveau, comme la déclaration des variables, la spécification des types de données et l'allocation de la mémoire.

### **IV.3 Capacité des systèmes MIMO :**

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

La capacité augmente donc beaucoup plus vite que dans les cas SISO et SIMO. La figure IV-1 représente l'espérance de la capacité en fonction du SNR pour plusieurs

valeurs de  $N_t$  et  $N_r$ . Un programme, effectué suivant la loi définie précédemment (dans le chapitre I), a été utilisé pour tracer ces courbes.



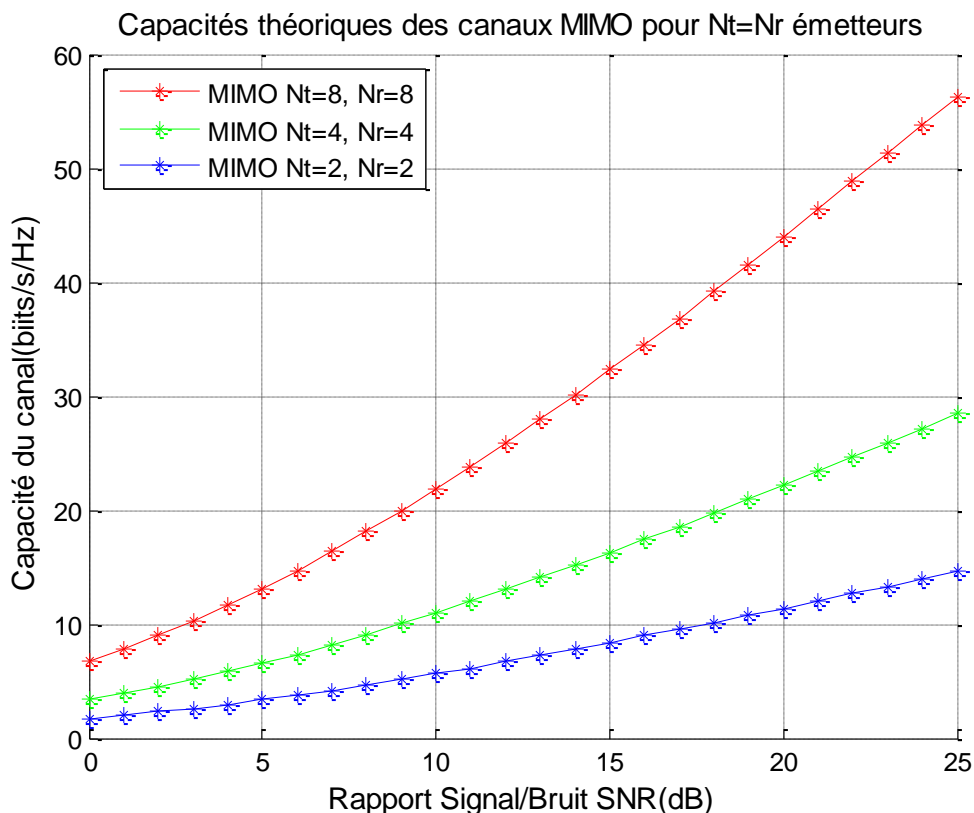
**Figure IV-1 :** Capacité des systèmes SIMO à 4 et 8 antennes par rapport au système SISO

- Dans le cas SISO ( $N_t = 1$  et  $N_r = 1$ ) la capacité varie de 0.87 à 7.54 bps/Hz environ. Elle reste faible et croît lentement avec le SNR, ce qui illustre bien les limitations des transmissions SISO. Malgré les techniques actuelles, qui permettent de tirer le maximum d'un canal SISO, sa capacité est une borne qui ne peut être dépassée et un système multi-antennes, même sous-exploité, obtiendra de meilleures performances.
- Les deux exemples SIMO ( $N_t = 1$  et  $N_r = 3$  et  $N_r = 7$ ) montrent les bornes supérieures des traitements sans multiplexage spatial. Le passage à trois antennes en réception permet de gagner 2.06 bps/Hz par rapport au SISO, ce qui n'est pas très important, en particulier à fort SNR. Avec  $N_r = 7$  le gain est d'environ 1,4 bps/Hz, ce qui est peu pour quatre antennes supplémentaires. Comme pour les systèmes SISO la capacité augmente

lentement, ce qui reste la principale limitation des systèmes SIMO, à fort SNR notamment.

- Les deux exemples MIMO ont le même nombre total d'antennes que les systèmes SIMO, de façon à faciliter les comparaisons ( $(N_t + N_r = 4 \text{ et } 8)$ ). Pour un SNR de 0 dB, le système MIMO avec ( $N_t = 2 \text{ et } N_r = 2$ ) a une capacité presque équivalente à celle du système SIMO avec quatre antennes. La capacité MIMO augmente ensuite beaucoup plus rapidement, pour finir avec un gain de plus de 50 % à 25 dB de SNR. Exactement les mêmes commentaires peuvent être faits sur les systèmes MIMO et SIMO à huit antennes. Nous pouvons aussi vérifier que la capacité du système MIMO à huit antennes est presque 3/2 fois de celle du système à quatre antennes.

Afin de prouver l'efficacité du concept multi-antennaire, la figure IV-2 montre plus précisément que la capacité des systèmes MIMO croît linéairement avec le nombre d'antennes émettrices et réceptrices, si celui-ci est égal ( $N_t = N_r$ ).

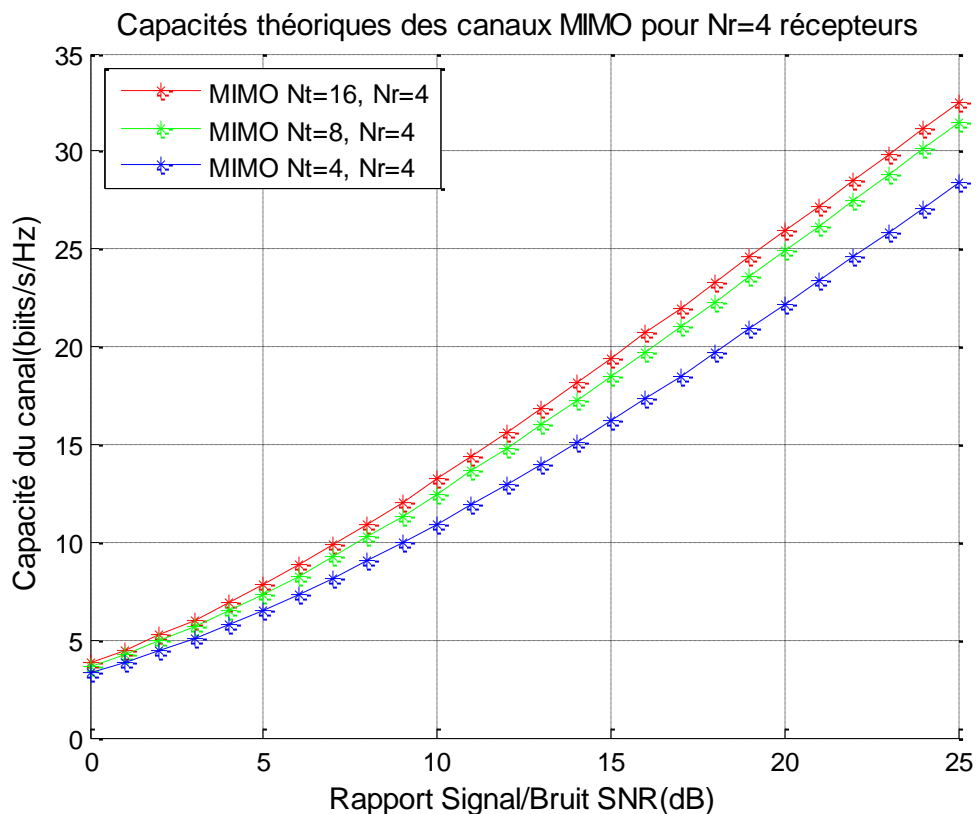


**Figure IV-2 :** Capacités des systèmes MIMO dans un canal de Rayleigh en fonction du nombre d'antennes pour ( $N_t = N_r$ )

Si on considère un nombre constant de récepteurs  $N_r$ , lorsque le nombre d'émetteurs  $N_t$  devient grand ( $1/N_t H H^* \rightarrow I_{N_t}$ ), la capacité est alors indépendante de  $N_t$  :

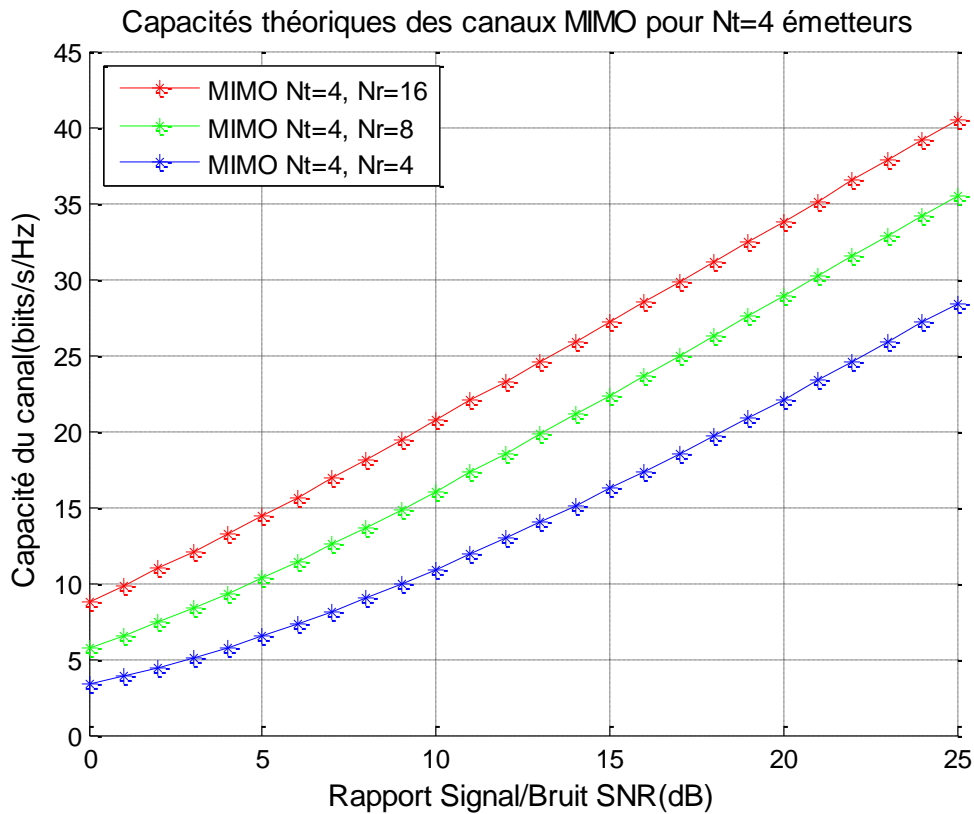
$$C = N_r \cdot \log(1 + \rho) \quad (\text{IV.3})$$

Il devient donc, comme le montre la figure (IV-3), parfaitement inutile d'augmenter le nombre d'antennes, puisque la capacité du système sature. Certains systèmes, tel le BLAST original [36], supposent d'ailleurs que le nombre d'antennes en réception est toujours au moins aussi grand que le nombre d'antennes à l'émission.



**Figure IV-3 :** Capacités des systèmes MIMO dans un canal de Rayleigh en fonction du nombre d'antennes émettrices pour 4 récepteurs ( $N_r = 4$ )

En revanche, pour un nombre d'antennes émettrices donné, la capacité des systèmes augmente théoriquement indéfiniment avec le nombre de récepteurs (figure IV-4). Ceci suppose cependant des conditions idéales, c'est-à-dire une parfaite décorrélation entre les signaux sur les récepteurs pour avoir des points de vue indépendants sur le canal, ce qui est impossible en pratique pour des raisons d'encombrement et de conditions de propagation souvent imprévisibles.



**Figure IV-4 :** Capacité théorique des systèmes MIMO dans un canal de Rayleigh en fonction du nombre de récepteurs pour un nombre d'antennes émettrices donné ( $N_t = 4$ )

#### IV.4 Simulation d'un système STBC :

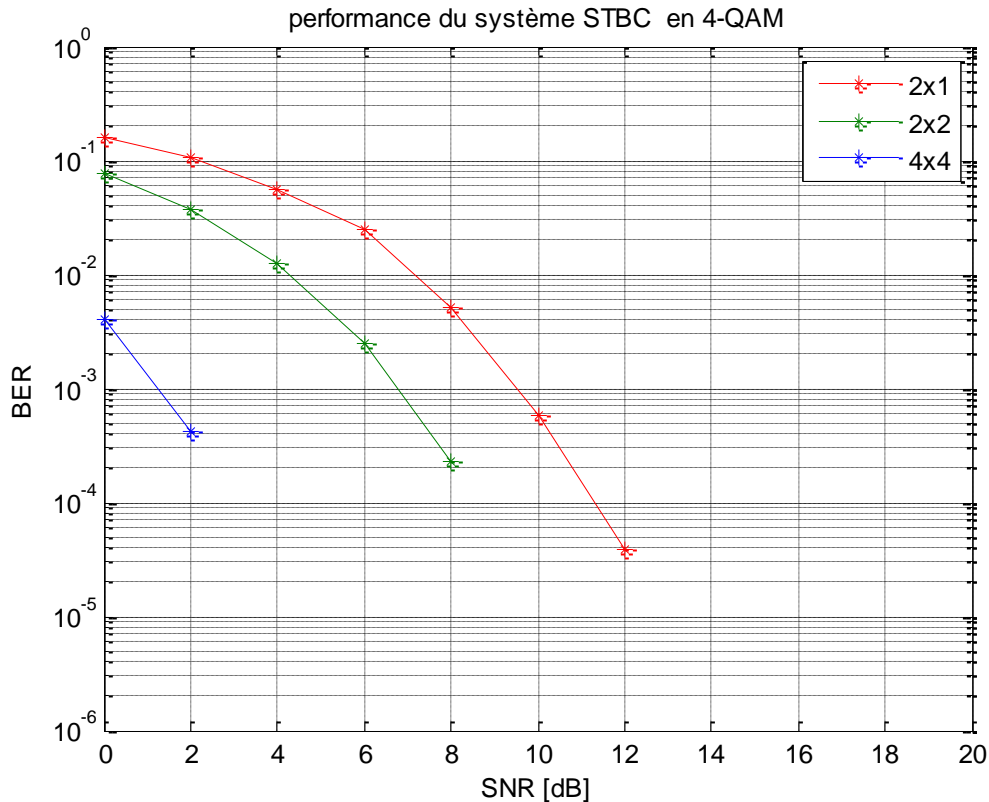
Les Codes d'espace-temps en blocs bien que capable de fournir des ordres de grande diversité ont également des sanctions à haut débit. Alamouti dans son article [7] montre que la diversité espace temps en émission est vraiment une bonne solution pour l'amélioration des performances. Après, Tarokh a abouti à des codes espace-temps pour trois et quatre antennes d'émission.

Le but de ces simulations est d'évaluer et de valider les performances du système dans différents architectures STBC (2x1 2x2 et 4x4) à travers la caractérisation des niveaux de Taux d'Erreur Bit (BER : Bit Error Rate) en fonction du rapport signal sur bruit (SNR).

Dans la figure IV-5, nous présentons les performances des codes espace-temps en blocs en modulation 4-QAM utilisant la détection par le forçage zéro ZF, nous avons considéré plusieurs configurations possibles d'antennes en émission et en réception, nous avons choisi

de simuler les deux cas du code d'Alamouti (cas d'une seule antenne et deux antennes de réception c.-à-d. cas d'Alamouti de 2x1 et 2x2).

Puis, il nous a paru intéressant de faire au moins une simulation sur le système STBC généralisé à plusieurs antennes en émission et en réception. Nous avons pris le cas de quatre antennes en émission et en réception. En regardant de près les performances obtenues entre le code d'Alamouti et le cas de STBC à 4x4 antennes.



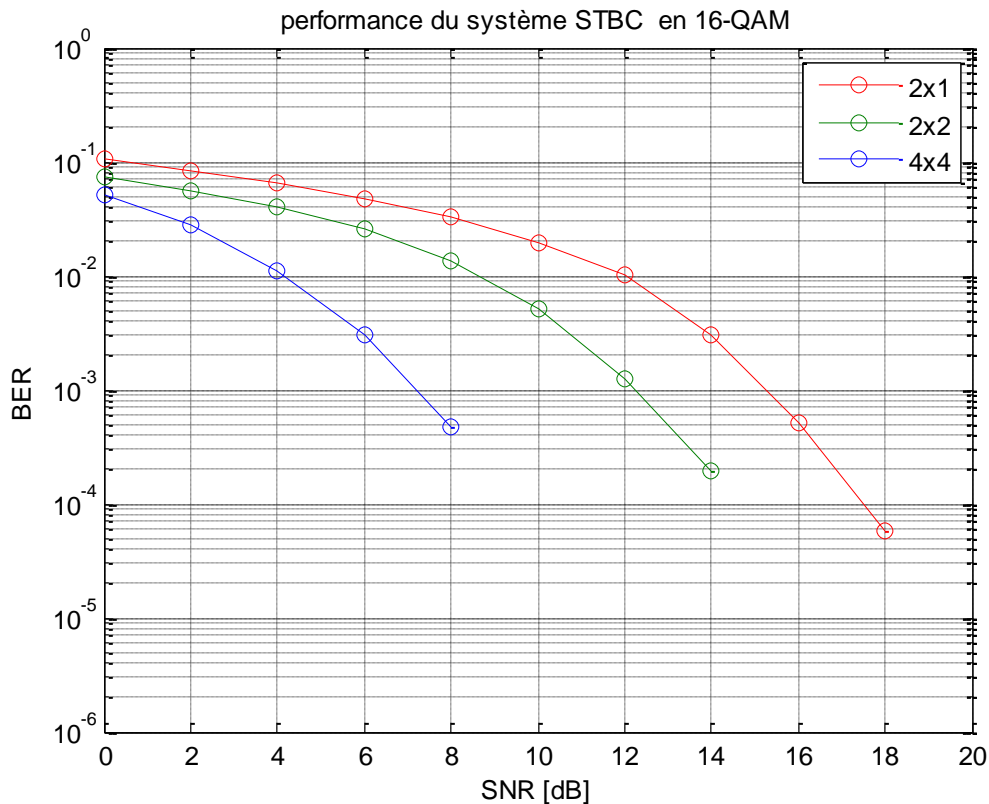
**Figure IV-5:** Performances des systèmes STBC en 4- QAM

Nous observons que les meilleures performances sont obtenues pour le système ayant une diversité importante c'est-à-dire le cas de 4x4 et nous retrouvons effectivement sur la figure un écart d'environ de 4.8 dB pour un BER  $10^{-3}$  entre le code Alamouti 2x2 et le cas de 4x4. De plus, la tendance des courbes laisse présager que plus le SNR augmente plus ce gain est important.

Les résultats confirment bien la théorie, en affichant des performances améliorées par l'Alamouti 2x2 et encore plus par le STBC 4x4 par rapport à l'Alamouti 2x1. Donc, on

constate que la performance s'améliore avec l'augmentation du nombre d'antennes d'émission et de réception.

Dans le cas de la technique de modulation 16QAM, la figure IV.6 représente les performances des trois configurations ; Alamouti 2x1 et 2x2 ainsi que le STBC 4x4.



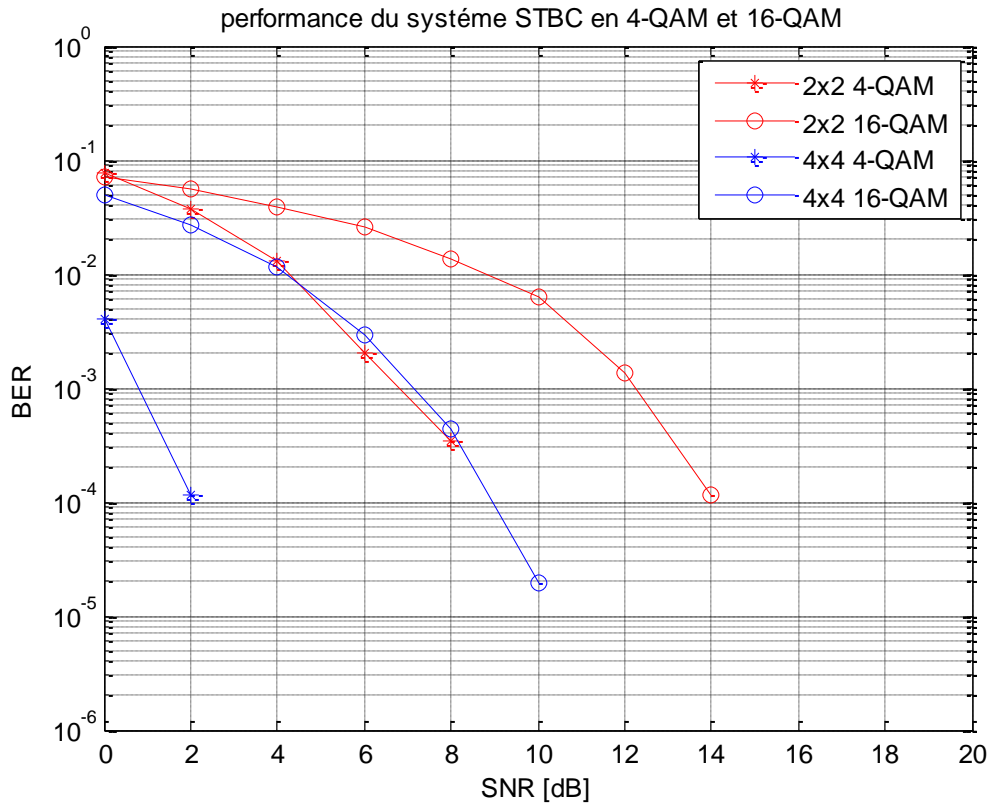
**Figure IV-6 :** Performances du système STBC en 16-QAM

Les mêmes remarques peuvent être faites pour ce cas. Nous pouvons voir, alors, que par rapport à l'Alamouti 2x1, la configuration 2x2 améliore considérablement le BER sur toute la plage de puissance qui garantit un gain au niveau de BER de  $10^{-3}$  de 3.1 dB.

Encore, l'apport du STBC 4x4 par rapport à l'Alamouti 2x2 s'avère plus significatif dans la plage des faibles puissances. Donc, pour garantir le même niveau de BER, le système en configuration 2x2 a besoin d'émettre à une puissance supplémentaire d'environ 5.6 dB par rapport un système en configuration 4x4. La contrepartie, aucune amélioration de l'efficacité spectrale.

Les performances de notre système pour les deux types de modulation (4-QAM et 16-QAM) dans les deux contextes MIMO sont représentées sur la figure IV.7 pour les techniques d'émission Alamouti 2x2 et STBC 4x4.





**Figure IV-7** : les performances du système STBC en 4-QAM ET 16-QAM

On constate une dégradation des performances quand le nombre d'états de la constellation utilisée augmente (de 4-QAM à 16-QAM). Ceci résulte de la diminution de la distance euclidienne entre les différents états pour des constellations de taille croissante. En effet, les performances de la modulation 16-QAM sont moins bonnes que celles en 4-QAM. Ainsi, en prenant comme exemple un niveau de BER égal à  $10^{-3}$  le gain en SNR est d'environ 6.3 dB entre le 16-QAM et le 4-QAM dans la configuration STBC 4x4 et d'environ 6,1 dB dans le cas en utilisant une configuration d'Alamouti 2x2.

La contrepartie étant une augmentation dans le débit utile. Bien que nous puissions atteindre un débit de données plus élevé en utilisant un niveau de modulation plus élevée.

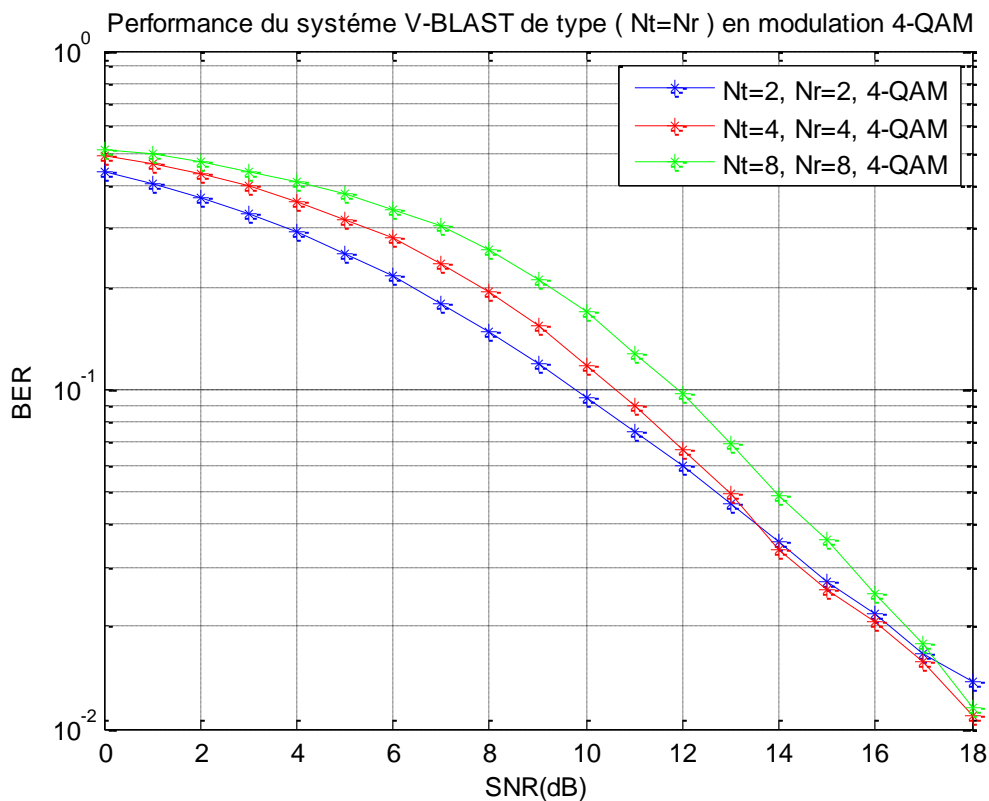
#### IV.5 Simulation d'un système V-BLAST :

Le schéma vertical du code espace-temps en couches de Bell-Labs (V-BLAST) peut être utilisé pour exploiter le potentiel des capacités fournies par plusieurs systèmes d'antenne d'émission. Dans les systèmes V-BLAST, la détection et le décodage sont effectués couche par couche d'une manière successive. Cette technique qui se base sur une élimination

successive des interférences par ordre d'énergie décroissante ne permet cependant pas d'utiliser toute la diversité spatiale d'un canal MIMO.

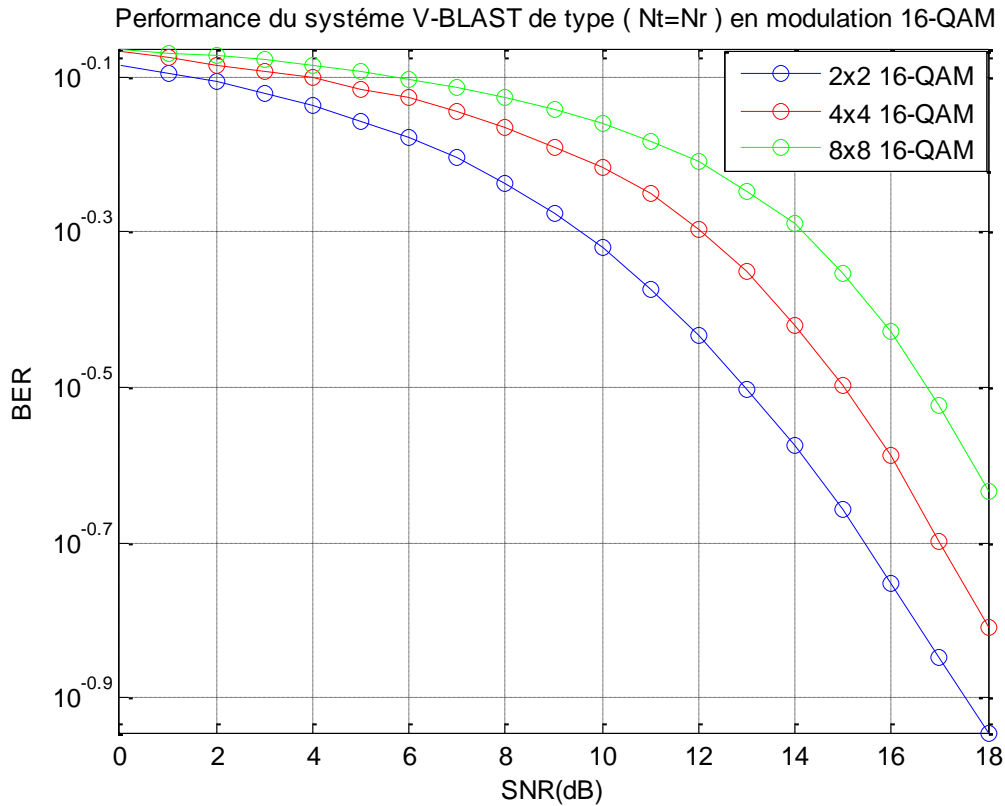
La deuxième série de simulations a consisté à quantifier l'apport des techniques multi-antennaires V-BLAST pour différentes configurations (2x2, 4x4 et 8x8) dans différentes techniques de modulation (4-QAM et 16-QAM) et en supposant le canal parfaitement estimé. Les résultats obtenus sont illustrés sur les figures IV.8 et IV.9.

En ce qui concerne l'apport du système V-BLAST utilisant la modulation 4-QAM, Nous remarquons, sur la figure IV.8, que pour garantir le même niveau de BER, le système en configuration 8x8 a besoin d'émettre à une puissance plus importante que lorsqu'il est en configuration 4x4 et beaucoup plus pour la configuration 2x2. Cette puissance d'émission peut être encore moins importante à forte SNR. Nous retrouvons effectivement sur la figure IV-8 un écart d'environ 2.2 dB pour un BER  $10^{-1}$  entre le cas de 2x2 et cas de 8x8. Ceci montre bien la sensibilité de ce type de détection aux interférences. Étant donné que le nombre d'antennes à l'émission avait diminué, les niveaux d'interférences diminuent aussi.



**Figure IV-8:** Performances du système V-BLAST en 4-QAM.

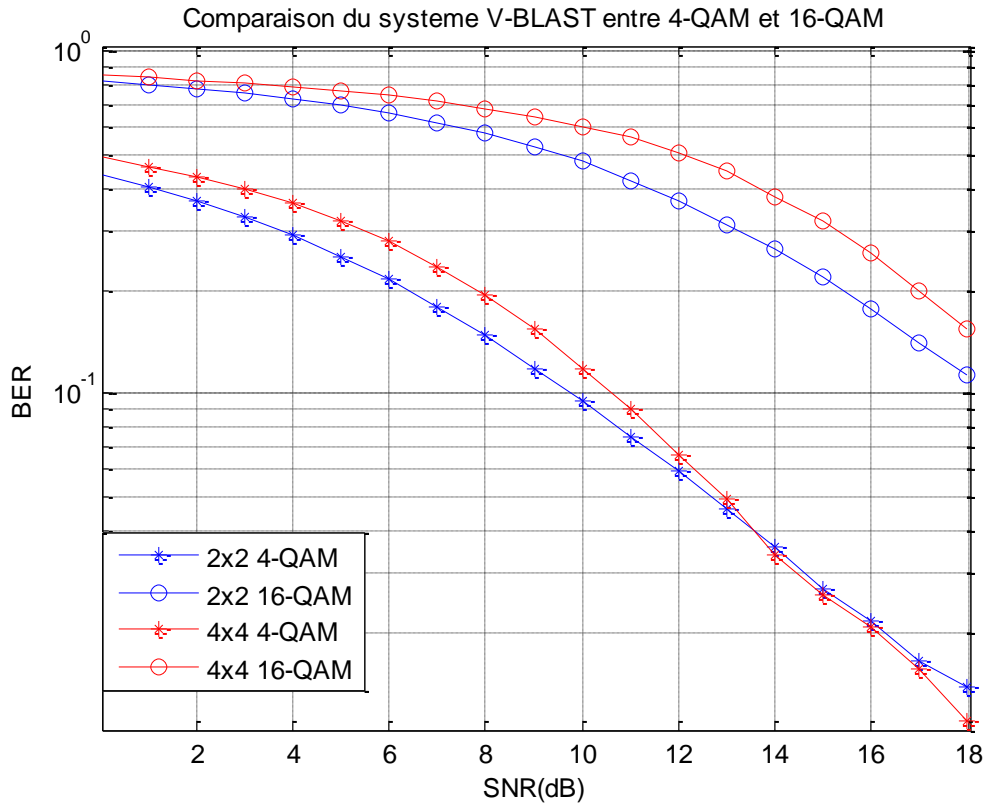
Les mêmes remarques peuvent être tirées pour le cas d'une modulation 16-QAM (Figure IV.9) que le cas précédent (pour 4-QAM). En effet, pour un BER égale à  $10^{-0.5}$ , le cas de V-BLAST 2x2 gagne un gain de 2 dB que le cas d'une configuration 4x4 et encore plus le cas d'une configuration 8x8 avec un gain d'environ 3.75 dB.



**Figure IV-9:** performance de système V-BLAST en 16-QAM.

La figure IV-10 montre une comparaison des systèmes V-BLAST en utilisant les deux types de modulation 4-QAM et 16-QAM. Les performances de la modulation 16-QAM sont moins bonnes que celles de la 4-QAM. Ceci justifie que cette dégradation est due à la diminution de la distance euclidienne entre les différents états pour des constellations de taille plus grande.

On peut effectivement augmenter le débit (en tant que vitesse de transmission) en augmentant la taille de la constellation. En effet, plus la taille de la constellation augmente plus les symboles émis ont des valeurs de plus en plus proches. Il est alors difficile au niveau du récepteur de discriminer entre 2 valeurs entachées d'erreurs dues au bruit. Les performances du système en termes de BER seront alors affectées.



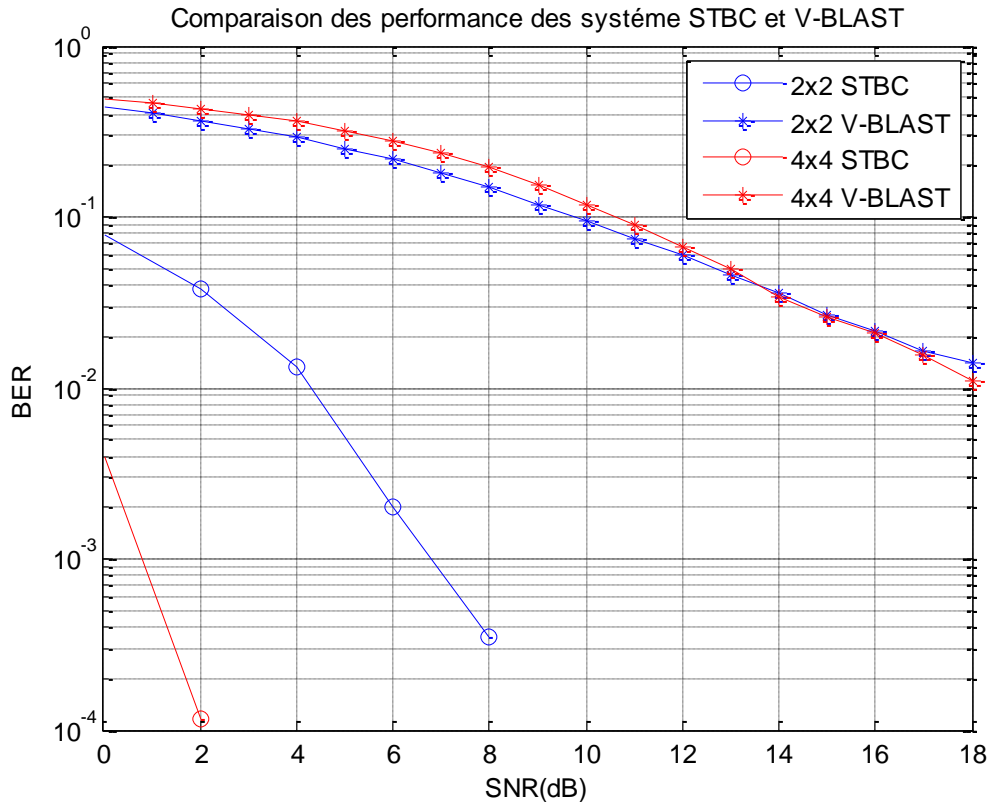
**Figure IV-10:** performance de système V-BLAST en 4-QAM et 16-QAM.

#### IV.6 Comparaison entre système STBC et V-BLAST :

Après avoir effectué des simulations sur les performances des deux systèmes (STBC et V-BLAST), maintenant nous pouvons faire une comparaison entre les deux systèmes.

Les simulations des deux techniques d'émission MIMO (STBC et V-BLAST) sont illustrées sur la figure IV-11. Nous avons prédestiné de simuler chacune des techniques en deux configurations différentes, le cas de 2 antennes d'émission et 2 antennes de réceptions et le cas de 4 antennes d'émission et 4 antennes de réceptions pour une technique de modulation 4-QAM.

En effet, nous pouvons voir l'apport significatif du codage spatio-temporel en bloc (STBC) pour les deux configurations 2x2 et 4x4 vis-à-vis la technique de multiplexage spatial (V-BLAST) et on constate une importante augmentation du gain en BER si on augmente le nombre d'antennes dans le cas STBC, contrairement au cas du code V-BLAST. La contrepartie étant une importante augmentation de débit utile par le V-BLAST avec un facteur de  $N_t$  fois par rapport au code STBC.



**Figure IV-11:** Comparaison des performances des systèmes STBC et V-BLAST en 4-QAM.

Pour quantifier l'apport des techniques multi-antennaires STBC et V-BLAST, le gain en SNR entre les configurations STBC 2x2 et V-BLAST 2x2 est relevé pour un niveau de BER fixé. Ainsi, en prenant comme exemple un niveau de BER égal à  $10^{-2}$  le gain en SNR est d'environ 13.8 dB. Ceci montre bien la sensibilité de ce type de détection aux interférences et justifie de la nécessité de codage spatio-temporel pour mieux exploiter cette diversité. Par contre si on veut une augmentation de débit de données, notamment à fort SNR, le système V-BLAST est rendu comme étant le meilleur choix.

#### IV.7 Conclusion :

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

De même le MIMO augmente la diversité en utilisant différentes techniques. En effet, nous avons enchainé avec une présentation des performances du multiplexage spatial et les codes espace-temps en bloc. Lors de cette dernière partie, nous nous sommes intéressés, plus particulièrement, aux codes V-BLAST et STBC en plusieurs configuration antennaires et différentes techniques de modulation.

La complexité des récepteurs des codes espace-temps en blocs est plus faible que celle des récepteurs à multiplexage spatial mais ces derniers permettent d'augmenter la capacité contrairement aux codes espace-temps en blocs qui cherchent à augmenter la diversité du système. Nous avons montré par simulation qu'une importante augmentation du gain en BER si on augmente le nombre d'antennes dans le cas STBC.

En revanche, une dégradation des performances du système en utilisant le V-BLAST. Finalement, nous avons prouvé une dégradation des performances quand le nombre d'états de la constellation utilisée augmente (de 4-QAM à 16-QAM). Ceci résulte de la diminution de la distance euclidienne entre les différents états pour des constellations de taille croissante.

# **Conclusion Générale**

## Conclusion générale

---

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

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

Outre les environnements de propagation qui doivent proposer de nombreux échos pour atteindre un ordre de diversité acceptable. Les antennes réceptrices reçoivent un mélange des contributions de toutes les antennes émettrices. En effet, on a également présenté plusieurs algorithmes, linéaires ou non, permettant de séparer les signaux et de retrouver l'information initiale, ainsi que l'architecture de code spatio-temporel.

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

D'autres systèmes MIMO sont exposé par la suit, notamment les systèmes basés sur le multiplexage spatial, telle l'architecture BLAST développée par les laboratoires Bell doivent cependant respecter bon nombre de contraintes, dont la bande étroite reste la principale.

La dernière partie a été consacrée à la simulation des capacités des différents schémas d'un système MIMO (SISO, SIMO, MIMO), ainsi les performances des deux configurations



STBC et V-BLAST ont été exposé et interprété en détail en utilisant les différentes techniques de modulation telles la 4-QAM et la 16QAM.

Les résultats de simulation ont montré que les techniques MIMO peuvent soit augmenter la capacité ou l'efficacité spectrale, soit améliorer la robustesse des systèmes sans fil. La comparaison des deux techniques, montre que les systèmes STBC perforés est meilleur que système V-BLAST et donne des meilleurs performances en terme de taux d'erreur binaire (BER) des données transmises avec une efficacité de la bande passante constante. En revanche, les systèmes V-BLAST restent le meilleur choix pour augmenter l'efficacité spectrale ou le débit des systèmes sans fil.

# **Bibliographie**

- [1] Mr. BAKHIR HADJALI, « Exploitation de localisation des techniques MIMO-OFDM pour la transmission des réseaux locaux sans fil », Mémoire pour l'obtention du Diplôme de magister en télécommunications, université Abou Bekr Belkaid en 2012.
- [2] Ould AHMED djiddou « Etude de la technique d'accès OFDM pour la norme IEEE802.16 dans le cas d'un canal MIMO » Thèse d'ingénieur en Télécommunications, en 2007.
- [3] Ahamat BADAWI Hamit et FOZIN Tedjeugang J. Collins « les antennes intelligentes MIMO » Thèse de Magister en Télécommunications, 2006.
- [4] I. E. Telatar, «Capacity of multi-antenna Gaussian channels », And and European Transactions on Telecommunications, 10(6):585–595, 1999.
- [5] G. J. Foschini and M. J. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas", Wireless Personal Communications, 6(3):311–335, march 1998.
- [6] V. Tarokh, N. Seshadri, and A. R. Calderbank, "Space-time codes for high data rate wireless communication: Performance criterion and code construction", IEEE Transactions on Information Theory, 44(2):744–765, March 1998.
- [7] S. M. Alamouti, "A simple diversity technique for wireless communications", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 16(8):1451–1458, October 1998.
- [8] Souhila ben Mehdi « étude et d'amélioration les techniques d'émission et de réception de ces systèmes MIMO dans un contexte multi porteuses OFDM » Thèse d'ingénieur en Télécommunications, l'institut d'Oran de quoi, + 2006
- [9] «comment-ca-marche-mimo»  
<http://www.01net.com/editorial/323147/comment-ca-marche-mimo/>.
- [10] ZERROUKI Hadj « Application de la technologie MIMO dans les réseaux Wi-Fi » Thèse de Magister en Télécommunications, Université de Tlemcen, juin 2006

- [11] Gesbert, D.; Shafi, M.; Da-shan Shiu; Smith, P.J.; Naguib, A.; “From theory to practice: an overview of MIMO space-time coded wireless systems” Selected Areas in Communications, IEEE Journal on Volume 21, Issue 3, April 2003 Page(s):281 – 302
- [12] Chiurtu, N.; Rimoldi, B.; Telatar, E.; “On the capacity of multi-antenna Gaussian channels”, Information Theory, 2001. Proceedings. 2001 IEEE International Symposium on 24-29 June 2001 Page(s):53.
- [13] Marius Stan «Analysis and performance evaluation of multi-antenna systems in ad-hoc networks» MASTER ISSI, filière IIS année 2005-06
- [14 «MIMO - Wikipedia, the free encyclopedia»  
<http://en.wikipedia.org/wiki/mimo>
- [15] «WiMAX\_MIMO»  
[www.worldlingo.com/ma/enwiki/fr/WiMAX\\_MIMO](http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/fr/WiMAX_MIMO).
- [16] «la-capacite-et-les-concepts-mimo »  
<http://wireless-techbook.com/bien-que/96-la-capacite-et-les-concepts-mimo.html>
- [17] R. Gautier, G. Burel, J. Letessier, and O. Berder. Blind estimation of scrambler offset using encoder redundancy. In Proceedings of IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, volume 1, pages 626–630, Pacific Grove (CA), USA, 2002.
- [18] G. Ungerboeck. Channel coding with multilevel/phase signals. IEEE Transactions on Information Theory, 28(1):55–67, January 1982.
- [19] V. Tarokh, S. Alamouti and P. Poon, "New detection schemes for transmit diversity with no channel estimation", IEEE International Conference on Universal Personal Communications, volume 2, pages 917-920, October 1998.
- [20] V. Tarokh, H. Jafarkhani and A. R. Calderbank, "Space-time block codes from orthogonal designs", IEEE Transactions on Information Theory, pages 1456-1467, July 1999.
- [21] H. Jafarkhani, «A quasi-orthogonal space-time block code », IEEE Transactions on Communications, vol. 49, no. 1, pp. 1–4, Jan. 2001.
- [22] Steredenn DAUMONT, « Techniques de demodulation aveugle en interception de signaux MIMO », Thèse soutenue à Supélec-rennes, décembre 2009.

- [23] G. J. Foschini. Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas. Bell Labs Technical Journal, pages 41–57, Autumn 1996.
- [24] Olivier BERDER, « Optimisation et stratégie d'allocation de puissance des systèmes de transmission multi-antenne », Mémoire pour obtenir le grade de docteur de l'université de Bretagne occidentale, 20 décembre 2002.
- [25] G. D. Golden, C. J. Foschini, R. A. Valenzuela, and P. W. Wolniansky. Detection algorithm and initial laboratory results using v-blast space-time communication architecture. Electronic Letters, 35(1):14–15, January 1999.
- [26] G. J. Foschini, G. D. Golden, R. A. Valenzuela, and P. W. Wolnianski. Simplified processing for wireless communication at high spectral efficiency. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 17(11):1841–1852, November 1999.
- [27] Apala Ray, « 2006012Performance of different BLAST Architectures » International Institute of Information Technology Bangalore, June 2008
- [28] « BER ANALYSIS OF V-BLAST MIMO SYSTEMS UNDER VARIOUS CHANNEL MODULATION TECHNIQUES IN MOBILE RADIO CHANNELS | Gurpreet Singh - Academia.edu »  
[http://www.academia.edu/2317479/BER\\_ANALYSIS\\_OF\\_VBLAST\\_MIMO\\_SYSTEMS\\_UNDER\\_VARIOUS\\_CHANNEL\\_MODULATION\\_TECHNIQUES\\_IN\\_MOBILE\\_RADIO\\_CHANNELS](http://www.academia.edu/2317479/BER_ANALYSIS_OF_VBLAST_MIMO_SYSTEMS_UNDER_VARIOUS_CHANNEL_MODULATION_TECHNIQUES_IN_MOBILE_RADIO_CHANNELS)
- [29] rapport-stage HIJAZI Hussein, « ETUDE DE LA PERFORMANCE DU TURBO BLAST », STAGE, 04/07/05
- [30] kora-ahmed-dooguy « ARCHITECTURE DE SYSTEMES MULTI-ANTENNES ET ESTIMATION DE CANAL », 16 novembre 2007.
- [31] TheseOlivierBerder Olivier BERDER, « Optimisation et stratégies d'allocation de puissance des systèmes de transmission multi-antennes », thèse doctorat, le 20 décembre 2002.
- [32] these\_wang Hongzhi WANG, « Architectures reconfigurables à base d'opérateur CORDIC pour le traitement du signal: Applications aux récepteurs MIMO », le 28 avril 2009.

[33] P.W.Wolniansky, G.J.Foschini, G.D.Golden et R.A.Valenzuela, « V-BLAST: an architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel ». 1998 URSI International Symposium on Signals, Systems, and Electronics, ISSSE 98., pages 295–300, 29 Sep-2 Oct 1998.

[34] « Six égaliseurs pour V-BLAST »

<http://www.dsplog.com/2009/04/21/six-equalizers-for-v-blast/>

[35] ZOUHEIR REZKI « Étude et optimisation des algorithmes de traitement de signal requis pour un système de communication MIMO», MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE, Le 14 OCTOBRE 2003.

[36] J. Hagenauer, and M. Witzke, «Space-Time-Coding and Multiple-Antenna (MIMO) Systems: Key Elements of Future Mobile Systems", University of München, Germany, August 2004.



