الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique



Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme
de Master en Génie Électrique

Option : **Télécommunication**

THEME

Analyse des performances d'un système MIMO a travers un canal Rayleigh

Proposé et dirigé par :

Mr. SOUMALI Chaabane **promoteur**

Mr. BOURAIOU Abd El Ouaheb **examinateur**

Mr. REBIAI Mohamed **examinateur**

Préparé et présenté par :

BENGHERBIA Walid

MEFTAHI Issam

Remerciement

*Tout d'abord, louange remerciement à « **Allah** » qui nous a guidé sur le droit chemin tout au long du travail et nous a inspiré les bons pas et les justes reflexes. Sans sa miséricorde, ce travail n'aura pas abouti.*

Avant tout développement sur cette expérience, il apparaît opportun de commencer ce manuscrit de thèse par des remerciements, à ceux qui nous a beaucoup appris au cours de cette thèse, et même à ceux qui ont eu la gentillesse de faire de cette thèse un moment très profitable.

*En tout premier lieu nous exprimons toutes nos gratitudes à notre encadreur Monsieur **SOUMALI CHAABANE** Pour l'effort fourni, les conseils prodigués, sa patience et sa persévérance dans le suivi.*

Nous adressons également nos remerciements, à tous nos enseignants, qui nous ont donné les bases de la science. Nous remercions très sincèrement, les membres de jury d'avoir bien voulu accepter de faire partie de la commission d'examinateur.

Finalement nous adressons nos remerciements les plus chaleureux à toutes les personnes qui ont aidé de près ou de loin par le fruit de leur connaissance pendant toute la durée de notre parcours éducatif.

Merci à tous …

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*A toi qu'il me manque beaucoup et je voudrais que tu sois là à mes cotés, mon papa Qu'***Allah** *t'accueille dans son vaste paradis.*

A ma très chère mère qui m'a toujours supporté moralement et financièrement pendant toutes mes longues années d'études et qu'aucune dédicace ne pourra compenser son sacrifice pour mon bien être et mon bonheur …

Ensuite à mes chers frères qui m'ont assisté dans ces moments difficiles, à toute les personnes de a famille ……

A mes amis ***Amine***, ***Hsino***, ***Krimo***, ***Lotfi***, ***Bika*** *et en particulierà celui avec qui j'ai partagé le même travail* ***Bengherbia Walid***.

Une spécial dédicace pour ***Nassim***, ***yasser*** , ***Nada*** ,***Farouk*** *et* ***Roufi*** *qui me sont chers*

A notre encadreur ***M.SOUMALI CHAABANE***

A Tous qui m'ont soutenu de prés ou de loin

ISSAM

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mes très chers parents qui étaient présents pour moi durant toute ma vie et qui n'ont jamais cessé de m'encourager, de me conseiller et qu'aucune dédicace ne pourra compenser leur sacrifices pour mon bonheur et mon bien être .....

A mes très chers frères et spécialement à ma petite chère sœur ***Zineb*** *que j'estime beaucoup*

A toute les personnes de la famille

A touts mes amis et en particulier à celui avec qui j'ai partagé le même travail ***MEFTAHI ISSAM***

A ma deuxième sœur qui m'a aidé pour l'achèvement de ce projet .

A notre encadreur ***M.SOUMALI CHAABANE***.

A Tous qui m'ont soutenu de prés ou de loin

Walid

الملخص:

إن أنظمة الاتصالات اللاسلكية فيا لمستقبل يحتم عليها تحسين خدماتها(تدفق, مصداقية) لتتماشى مع نظيرتها السلكية القائمة حاليا.

يعتبر مشكل التلاشي إحدى المعيقات التي تحد من استعمال نظام اللاسلكي و ذلك بسبب تأثيره علىالإرسال.

يكمن حل زيادة قدرة القناة في زيادة عدد الهوائيات في الاستقبال والإرسال وهو مايسمى تقنية متعدد إدخال متعدد إخراج (**MIMO**)

بعد شرح تفصيلي لنظام متعدد الإدخال و الإخراج **(MIMO)** تم عرض مقارنة بين القدرات المختلفة للأنظمة **SISO , SIMO, MISO,** و دلك لإظهار فائدة التي أضافها نظام **MIMO**في زيادة القدرة

كلمات مفتاحيه : MIMO, STBC, QPSK, QAM, Canal Rayleigh

Résumé

Les futurs systèmes de communication sans fil sont amenés à proposer une qualité de service (débit, fiabilité) qui soit comparable à celle des techniques filaires existantes, Une des limitations de la communication sans fil est l'évanouissement ("fading") qui affecte la transmission.

Une solution consiste à augmenter la capacité du canal peut-être réalisé en augmentant le nombre d'antennes impliqués à l'émission et à la réception : on parle alors de techniques **MIMO** (Multiple Input, Multiple Output).

Après une description du principe MIMO, une comparaison des capacités de canal des systèmes **SISO**, **SIMO** et **MISO** est présentée pour montrer le bénéfice qu'apporte un système **MIMO** sur l'augmentation de la capacité.

Mots clés : MIMO, STBC, QPSK, QAM , Canal Rayleigh

Abstract:

Future wireless communication systems are required to provide a quality service (speed, reliability) that is comparable to that of existing wired technologies, one of the limitations of the wireless communication is fading ("fading") that affects the transmission.

One solution is to increase the channel capacity-can is achieved by increasing the number of antennas involved in the transmission and reception: this is called **MIMO** (Multiple Input, Multiple Output).

A description of **MIMO**, a comparison of channel capacities of **SISO**, **SIMO** and **MISO** principle is presented to show the benefits brought by a **MIMO** system on increasing capacity.

Keywords: MIMO, STBC, QPSK, QAM , Canal Rayleigh

Table des matières

Table des matières :……..……I
Liste des Figures :……...IV
Liste des Tableaux :……..……..V
Liste des Abréviation :……..…….....VI
Introduction Générale :…….……..……1
Chapitre I : La technologie MIMO
I.1 Introduction : 3
I.2 Architecteur des systèmes MIMO : 3
I .2.1 Système SISO : (single input-single output) : 4
I.2 .2 Système MISO : (Multiple input-single output) : 5
I.2.3 système SIMO (single input-multiple-output) : 6
I.2 .4 Système MIMO (multiple input-multiple output) : 6
I.4 Principe de la technologie MIMO : 9
La diversité spatial : 9
Le multiplexage spatial MIMO : 10
Le MIMO Beamforming (formation de faisceau) : 10
I.5 .1 Le bruit : 10
I.5 .2 Modélisation du canal de la propagation : 11
a)Le modèle de canal gaussien : 11
b) Le modèle de Rayleigh : 11
I .6.Architectures et techniques MIMO : 12
I.7 Multiplexage Spatial : 13
Architecture H-BLAST 13
Architecture H-BLAST 14
Architecture D-BLAST 14
Les codes espace-temps : 15
Les codes temps-espaces (STC : space-time coding) : 15
I.8 Conclusion : 16
Chapitre II : Combinaison du système MIMO avec les différents types de multiplexages
II.1 Introduction: 17
II.2 Association MIMO-OFDM : 17

II.2.1 La technique OFDM: 17
II.2.3 : Schémas d'associationMIMO-OFDM 19
II.3 Association MIMO MC-CDMA : 22
II.3 .1 Présentation du MC-CDMA : 22
II.3 .2 Le système MCCDMA : 22
II.3 .3 AssociationMIMO-MCCDMA: 23
II.4 Conclusion : 25
Chapitre III : Diversité d'antennes et codage spatio-temporel
III.1 Introduction: 26
III.2 La diversité : 26
III.2 .1 Principe de la diversité : 26
III.2.2 La diversité spatial : 27
III.2.3 La diversité temporelle : 27
III.2.4 La diversité fréquentielles : 27
III.2.5 La diversité de polarisation : 28
III.3 Codage espace-temps : 28
III.3.1 Code spatio-temporelle en bloc STBC : 29
III.3.2 Coded'Alamouti : 29
Cas de deux antennes en émission une antenne en réception 29
Schéma de combinaison au récepteur 31
Cas de deux antennes en émission deux antennes en réception. 32
III.4 Généralisation de code espace-temps en bloc : 34
III.5 Détection de signal pour les systèmes à multiplexage spatial : 34
III.5.1 Détection de signal ZF (forçage à zéro) : 35
III.5.2 Détection de signal MMSE (erreur quadratique moyenne minimale) : 35
III.5.3 Détection de signal ML(Maximum de Vraisemblance) : 35
II.6 La Technique de modulation : 36
III.7 Conclusion : 36
Chapitre IV : conception des systèmes MIMO étude
IV.1 Introduction : 37
IV.2 Capacité de transmission : 37
IV.2.1 Capacités des systèmes SISO, SIMO, MISO et MIMO : 37

IV.2.2 Nombre de transmetteurs supérieur aux nombre de récepteurs en cas d'égalité ou inverse : 39
IV.3 Simulation d'un système STBC (2x1 2x2 et 4x3): 40
les performances du STBC (2.1, 2.2, 4.3) en QPSK : 41
les performances du STBC (2.1,2.2,4.3) en 16QAM : 43
IV.4 Comparaison entre système STBC en QPSK et 16QAM : 44
IV.5 Conclusion : 45
CONCLUSION GENERALE 46
Bibliographies 48

LISTE DE FIGURES

Liste des figures

Figure	Titre	Page
Figure I.1:	Évolution de la technique MIMO	4
Figure I.2:	système SISO	5
Figure I.3:	système MISO	5
Figure I.4:	système SIMO	6
Figure I.5:	Une représentation schématique d'un système MIMO en boucle Ouverte	7
Figure I.6:	Une représentation schématique du système MIMO boucle fermée	8
Figure I.7:	Principe de la technologie MIMO	9
Figure I.8:	Schéma d'un système de transmission MIMO	12
Figure I.9:	Architecture d'un émetteur H-BLAST	13
Figure I.10:	Processus d'un émetteur D-BLAST	14
Figure I.11:	Les familles de codes temps-espace	16
Figure II.1:	Schéma d'un système OFDM	18
Figure II.2:	Schéma bloc simplifié d'un émetteur-récepteur OFDM	18
Figure II.3:	Model du système MIMO-OFDM(Nt*Nr)	21
Figure II.4:	Système MIMO-VBLAST-MCCDMA en émission	23
Figure II.5:	Système MIMO-VBLAST-MCCDMA en réception	24
Figure III.1:	Principe de la diversité	27
FigureIII.2:	schéma du codage spatio-temporel	28
Figure III.3:	Schéma d'Alamouti avec une antenne émettrice et deux antennes réceptrices	30
Figure III.4 :	Schéma d'Alamouti avec deux antennes émettrices	32
Figure IV.1:	Capacités des systèmes SISO, SIMO, MISO et MIMO	37
Figure IV.2:	Capacités des systèmesMIMOdans un canal de Rayleigh en fonction dunombre d'antennes pour $N_t=N_r$	38
Figure IV.3:	Capacités des systèmes MIMO dans un canal de Rayleigh en fonction du nombre d'antennes pour $N_t>N_r$ **et** $N_t<N_r$	39
Figure IV.4 :	les performances du en Alamouti 2.1 QPSK	41
Figure IV.5 :	les performances du en Alamouti 2.2 QPSK	41
Figure IV.6 :	Performances des systèmes STBC (4.3) en QPSK	42
Figure IV .7 :	les performances du en Alamouti 2.1 16QAM	43
Figure IV.8 :	les performances du en alamouti 2.2 16QAM	44

Liste des tableaux

Tableau **Titre** **Page**

TableauII.1 : Paramètres d'un système OFDM dans le standard IEEE 802.16a.....19

Tableau III.1: Schéma de transmission dans le temps…….....30

Tableau III.2: Signaux reçus aux niveaux des antennes réceptrices……....32

Tableau III.3: Canaux entre antennes émettrices et antennes réceptrices……....33

Acronymes et Abréviations

ASK	Amplitude Shift Keying
AWGN	Additive White Gaussian noise
BBAG	Bruit Blanc Additif Gaussien
BER	Bit Error Rate
BLAST	Bell Laboratories Layered Space Time
CDMA	Code Division Multiple Access
CST	Codage Spatio-Temporel
D-BLAST	Diagonal Bell Labs Advanced Space Time
DS	Direct Sequence
FFT	Faste Fourier Transforme
FIR	Finite Impulse Response
FSK	Frequency Shift Keying
H-BLAST	Horizontal-Bell Labs Advanced Space Time
IAM	Multiple access interferences

IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IFFT	Inverse Fast Fourier Transfor
MIMO	Multiple Input-Multiple Output
MISO	Multiple Input-Single Output
MC- CDMA	Multi-Carrier Code Division Multiple Access
MC-DS-CDMA	Multicarrier Direct Sequence CDMA
MC-CDMA	Multicarrier CDMA
MMSE	Minimum Mean Square Error
ML	Maximum Likelihood
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OSTBC	Orthogonal STBC
PSK	Phase Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift keying
STB	Spatio Temporal en Bloc
SNR	Signal Noice Rate

STTC	Space- Time Trellis Coding
STBC	Space-Time Block Codes
SISO	Single Input-Single Output
SIMO	Single Input-Multiple-Output
STC	Space-Time Coding
STBC	Space-Time Block Coding
STTC	Space- Time Trellis Coding
V-BLAST	Vertical-Bell Labs Advanced Space Time
WIMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
ZF	Zero Forcing

INTRODUCTION GENERALE

Aujourd'hui, les systèmes de communication sans fil sont de plus en plus présents dans notre vie quotidienne et ils tendent à remplacer l'utilisation excessive des câbles .Cette technologie a contribué à l'augmentation de la production et le renforcement de la sécurité au travail dans différents industries.

Au cours des dernières années, les systèmes de communication sans fil ont réalisé une véritable révolution. En raison de leur faible coût relatif, et à cause des exigences dues au milieu de propagation (dans des endroits où l'emploi de câbles semble être difficile), la connexion radio a été mise en place, et les systèmes de communication sans fil ont gagné une grande popularité.

Cependant, les réseaux sans fil classiques fonctionnent à ou près de leurs limites en raison de la grande demande, ce qui a ouvert la porte à l'introduction des communications coopératives où des relais viennent se placer entre l'émetteur et le récepteur pour les aider a améliorer la fiabilité de la transmission.

La technologie **MIMO** (Multiple- Input Multiple-Output) est reconnue comme une bonne solution dans le développement des réseaux sans fil à large bande. Cette technique est très attrayante pour les communications numériques, permettant l'augmentation des débits de données et/ou l'amélioration des performances du système.

Dans notre travail on va essayer d'abord de toucher les fondements de ce sujet et puis en deuxième partie on va faire des simulations en utilisant l'outil **MATLAB** pour montrer les performances de cette technique en termes de capacité de canal et de taux d'erreur par bit (**BER**).

Le présent manuscrit est structuré autour de quatre chapitres. Le premier de ces chapitres introduit de façon générale la technologue **MIMO** où on va essayer de toucher les fondements de ce sujet telle que l'architecteur les caractéristiques et le principe de la technologie **MIMO** ; Pour finir, les modèles de canaux utilisés au cours de cette étude, à savoir le canal de Rayleigh et le canal GAUSSIEN, sont détaillés.

Le deuxième chapitre consiste à étudier les associations **MIMO-OFDM, MIMO-MC CDMA** nous considérons d'abord la technique **OFDM**, nous rappelons l'historique et nous nous intéressons aux technique de l**'OFDM** ; Ensuite nous le troisième chapitre est consacré aux diversités d'antenne et le codage spatiotemporelle.

Au cours de quatrième chapitre nous allons faire la simulation de système **MIMO** en utilisant l'outil '**MATLAB**' pour tracer les courbes du la capacité du canal et le taux d'erreur par bit (**BER**) puis faire des comparatifs et commentaires.

Chapitre I

La Technologie MIMO

I.1 Introduction :

Les technologies actuelles en matière de réalisation de composants électroniques et en particulier de microprocesseur permettent de développer des équipements de taille et de poids de plus en plus réduits , cela a permis l'apparition d'objets informatique portables de plus en plus puissants tels que les ordinateurs portables et les assistants personnels ainsi que la communication entre ces équipements qui est de type sans-fil.

Les systèmes **MIMO** introduisent une nouvelle forme de diversité connue sous le nom de diversité spatiale, cette technique cherche à exploiter les phénomènes d'évanouissement et de multi-trajets longtemps considérés comme des handicaps. En effet, le récepteur reçoit et combine plusieurs copies d'un même signal envoyées à partir de plusieurs antennes et subissant des évanouissements indépendants. Par conséquent, le récepteur prend la bonne décision permettant de reconstituer le message d'origine sans erreur. En résumé, l'utilisation de plusieurs antennes au niveau des systèmes **MIMO** peut servir à améliorer la fiabilité de transmission en réduisant la probabilité d'erreur (gain en diversité) et à augmenter le débit de transmission (gain de multiplexage) [1].

Donc ce chapitre donne une introduction aux systèmes à antennes multiples **MIMO** point à point. Nous présentons les principaux résultats de la théorie de l'information qui ont permis de calculer la capacité des systèmes **MIMO** et qui ont ainsi prouvé les avantages de cette technologie. Nous introduisons par la suite les principales techniques de transmission qui permettent de s'approcher le plus possible de cettecapacité.

I.2 Architecteur des systèmes MIMO[2] :

MIMO trouve son origine dans les travaux qui ont été effectués dans les laboratoires par **BELL JACK HIVERS**et**JACK SALZ** à la fin de 1970. La base de **MIMO** était la diversité.

La diversité est une technique de traitement du signal pour améliorer les performances d'un système et de surmonter les effets du phénomène des trajets multiples. Il existe différents types de diversité de l'espace ou de multiplexage spatial. **MIMO** trouve son origine dans la diversité d'espace ou de multiplexage spatial où plusieurs antennes sont utilisées soit à l'émetteur ou au récepteur d'établir soit la diversité de transmission ou deréception.

Finalement **GERARD J. FOSCHINI** a établi la base pour **MIMO** et utilisé cette technique pour améliorer le rendement de système bien que l'origine de **MIMO** remonte à la fin de 1970 , mais la modulation **MIMO** sophistique et de compréhension a été créé prés de 1990lorsque BellLAboratoriesLayeredSpace Time (**BLAST**) technique a été proposée par **FOSCHINI.**

Avec l'avènement de formation de faisceau des antennes intelligentes, pré-codage et la diversité de codage **MIMO** évolué comme base pour presque tous les systèmes modernes de communication. Commercialement Lospen Wireless Inc a développé la première technologie **MIMO-OFDM** en 2001. Depuis lors **MIMO** a trouvé sa place dans presque toutes les technologies 3G et4G.

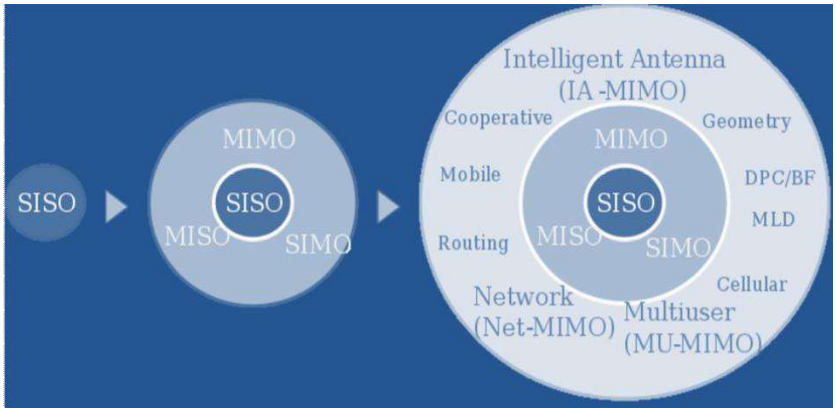


Figure I. 1: Évolution de la technique MIMO[2].

I .2.1 Système SISO : (single input-single output) :

il s'agit d'un système conventionnel typique où il y seulement une seule antenne de transmission et seule une antenne de réception. Comme il n'y a qu'une seule sortie et d'entrée unique, la complexité du système est ainsi réduite, mais nous devons faire des compromis sur le coût et le compromis des performances. Lacouverture et la capacité peuvent être obtenues en utilisant la diversité dans le temps ou fréquence, mais nous ne pouvons pas avoir une diversité d'espace car elle implique l'utilisation de plusieurs antennes à l'émetteur ou au récepteur. Le canal sans fil pour un système **SISO** peut être modélisé facilement par un canal à bruit blanc gaussien additif (**AWGN**). En général, un système **SISO**a moins de capacité de canal qu'un système **MIMO**.[2]

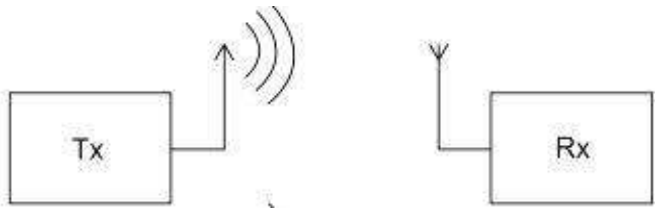


Figure I.2 : système**SISO**[2].

I.2 .2 Système MISO : (Multiple input-single output) :

Dansun système **MISO** nous avons plusieurs antennes d'émission et une antenne de réception unique. Dans cette technique de communication, la diversité est désignée comme diversité de transmission. Ici, les antennes utilisées à l'émetteur sont spatialement séparées par une certaine quantité et des mesures de corrélation.Plusieurs copies des mêmes données sont transmises par les antennes et les copies ou reproductions arrivent à la seule antenne de réception Pendant leur voyage, les copies souffrent des déficiences des trajets multiples telles que la réflexion, la diffusion, la diffraction et la réfraction. L'utilisation de plusieurs antennes à l'émetteur peut augmenter la complexité mais contribue de façon que la probabilité qu'un signal reçu est de fondu est réduit de manière significative. Ainsi, la probabilité que chacune des répliques transmissibles est affectée est réduite.

Cette technique présente l'avantage que les multiples antennes et une redondance de codage est déplacé de l'équipement utilisateur mobile à la station de base et ces technologies sont plus simples et moins coûteux à mettre en œuvre. Le temps de codage de l'espace est utilisé pour générer la redondance. **ALAMOUTI** a élaboré les premiers codes de deux antennes. La copie du signal est transmise non seulement à partir d'une antenne différente, mais aussi à un autre moment devenant ainsi analogue à l'espace et du temps[2].

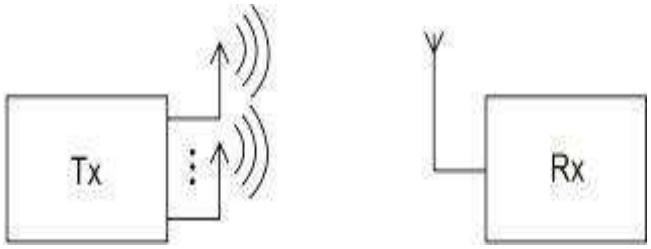


Figure I.3 :système **MISO**[2].

I.2.3 système SIMO (single input-multiple-output) :

Dans ce système une antenne est unique est utilisée dans l'émetteur et plusieurs antennes au niveau du récepteur. Dans la théorie de la communication, il est connu comme la diversité de réception. Ici, une seule copie du signal transmis arrive à multiples antennes de réception. La complexité d'un système **SIMO** est plus que **SISO** mais très semblable à **MISO**. Le récepteur dans ce cas doit être sensible à un certain niveau au cours de laquelle nous avons besoin d'un taux d'erreur binaire (**TEB**) spécifié. Ainsi, la complexité du récepteur est augmentée. Chacune des antennes de réception présente certain espacement entre eux qui est une fonction de la longueur d'onde du signal transmis et également une mesure de la corrélation entre les antennes au niveau du récepteur.

Concentrons-nous sur un exemple simple où nous avons deux antennes de réception. En raison des différentes voies de transmission, le récepteur voit deux signaux différemment fanées. En utilisant la méthode appropriée dans le récepteur, le rapport signal sur bruit peut maintenant être augmenté.[2]

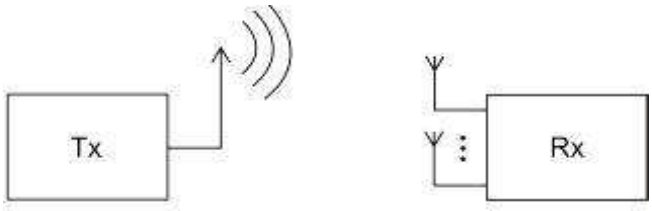


Figure I.4 :système**SIMO** [2].

I.2 .4 Système MIMO (multiple input-multiple output) :

Les systèmes **SISO**, **MISO** et **SIMO** sont essentiellement le fondement et l'origine de la technique **MIMO** (multiple input-multiple output). FOSCHINI et d'autres à Bell Labs ont pensés à utiliser plusieurs antennes sur les deux côtés du modèle de communication de base à savoir l'émetteur et le récepteur. Avec succès ils ont réalisé de meilleures performances que la diversité à l'émetteur et le récepteur. Cela a augmenté la capacité du canal (bits par utilisation du canal) et amélioré le débit avec le taux attendu. La complexité est si peu supérieure à **SISO** mais le fait que le compromis est acceptable découle du fait que la complexité est inférieure à la performance réalisée en retour. La technologie **MIMO** constitue une percée dans la conception de systèmes de communication sans fil.

La diversité de transmission + diversité de réception = système MIMO. (I.1)

En d'autres termes, si un lien de rétroaction existe dans un système **MIMO** il est nommé comme un système en boucle fermée et si il n'ya pas de lien de retour, alors les système **MIMO** est le système en boucle ouverte.[2].

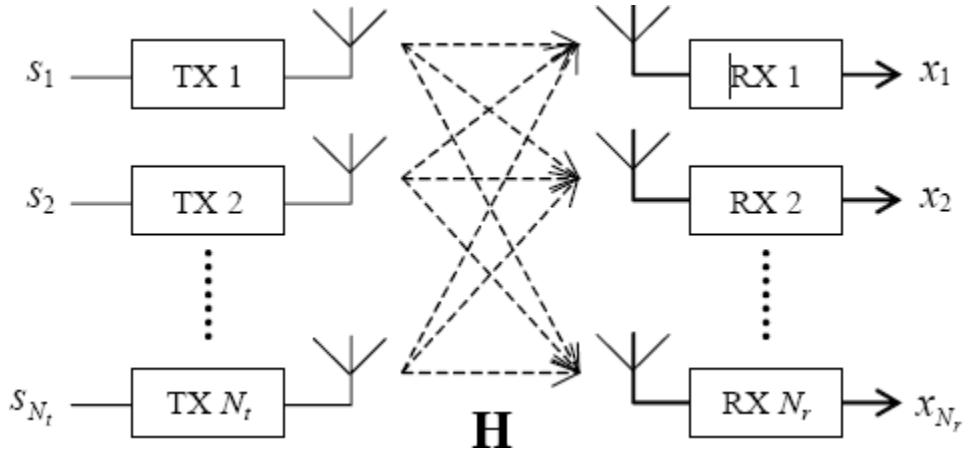
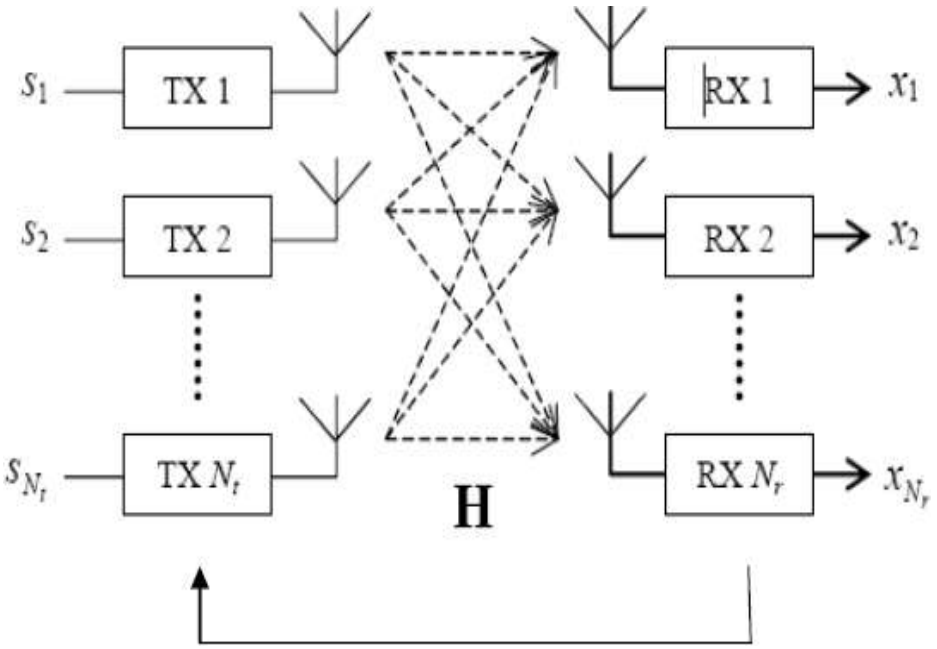


Figure I.5: Une représentation schématique d'un système **MIMO** en boucle ouverte[2].

Un système **MIMO** en **boucle ouverte** est celui qui ne mesure les statistiques du canal et est moins préoccupé par le comportement du canal. Il doit tout simplement encoder et traiter les données et les envoyer au récepteur par le canal. Il n'y aurait aucune information transmise sur la voie montante, comme indiqué sur la figure ci-dessus.

Un système **MIMO** en boucle fermée est un système qui surveille en permanence la réponse du canal sous la forme d'informations d'état du canal (**CSI**). Techniquement le **CSI** est essentiellement la valeur de la matrice de propagation à tout instant t.[2]



FigureI.6: Une représentation schématique du système **MIMO** boucle fermée **[2]**

I.3 Les caractérisation des dispositifs des systèmes MIMO :

Le canal qui nous intéresse pour les liaisons sans fil est le canal radio-mobile. Il peut être caractérisé par un milieu de propagation : l'air, par des obstacles mobiles (personnes, véhicules) ou immobiles (relief, bâtiments). L'onde électromagnétique, vecteur de l'information sur ce médium, est créée par le transmetteur pour une transmission dans l'air. Malheureusement, le canal n'est pas transparent pour l'onde **EM** et va interagir avec cette dernière.

La connaissance du canal de propagation est primordiale pour dimensionner un système de communication et optimiser les algorithmes de traitement des signaux de communications numériques. Pour ceci, un certain nombre de modèles de canal de propagation a été développé pour faciliter la simulation et un certain nombre de mesures a été réalisé dans différentes configurations de propagation [3].

L'onde **EM** se diffuse dans un milieu et perd une partie de son énergie au fur et mesure de sa propagation jusqu'à s'évanouir complètement. La réception du signal ne peut se faire que si une partie de l'onde arrive à être captée par l'antenne du terminal en réception.[3]

I.4 Principe de la technologie MIMO :

La technologie permet de régler ce problème. Le principe de la technologie **MIMO** consiste à émettre dans un même canal des signaux transmis sur des antennes différentes. A la réception aussi et avec un certain nombre d'antennes et des traitements adéquats, il s'agit de simuler cette réception dans une même bande de n canaux différents [4].

Le flux est divisé en différents flux de même fréquence qui sont envoyés à travers trois émetteurs à trois récepteurs. Un algorithme permet ensuite d'identifier les différents flux en vue de les restituer en un seul flux .cet algorithme utilise la réflexion des signaux sur les murs, le sol, etc.[4]

Alors que ces réflexions pourraient être considérées comme mauvaises; la technologie **MIMO** profite de ces différents canaux pour améliorer la rapidité de la transmission des données. On peutconsidérer Trois catégories de **MIMO**[4]:

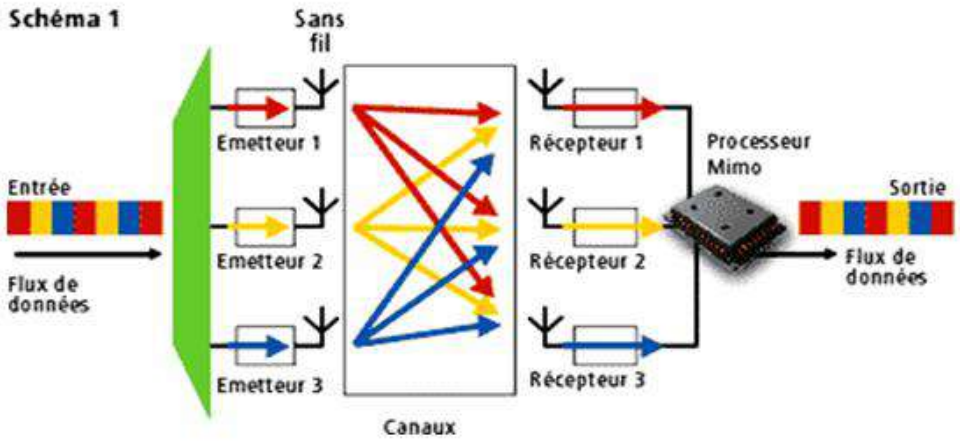


Figure I.7 : Principe de la technologie **MIMO**[4]

- **La diversité spatial :**

On transmet simultanément un même message sur différentes antennes à l'émission. Les signaux reçus sur chacune des antennes de réception sont ensuite remis en phase et sommés de façon cohérente. Cela permet d'augmenter le ratio **S/B** (grâce au gain de diversité) de la transmission.

Pour que cette technique soit efficace il faut que les sous-canaux MIMO soient décorrelés les uns des autres [5] .

- **Le multiplexage spatial MIMO :**

Chaque message est découpé en sous messages. On transmet simultanément les sous-messages différents sur chacune des antennes d'émission. Les signaux reçus sur les antennes de réception sont réassemblés pour reformer le message entier d'origine.

Comme pour la diversité **MIMO** les sous-canaux de propagation doivent être décorrelés. Le multiplexage **MIMO** permet d'augmenter les débits de transmission (grâce au gain de multiplexage). Les techniques de diversité et de multiplexage **MIMO** peuvent être conjointement appliquées. Par exemple pour un système **MIMO** 5 x 5 (c'est-à-dire 5 antennes d'émission et 5 antennes de réception), on peut configurer un sous-système **MIMO** 2 x 3 pour faire du multiplexage et un sous-système **MIMO** 2 x 3 pour faire du multiplexage et un sous-système **MIMO** 3 x 3 pour faire de la diversité **MIMO**[4].

- **Le MIMO Beam forming(formation de faisceau) :**

Le réseau d'antennes MIMO est utilisé pour orienter et contrôler le faisceau d'onde radio (amplitude et phase du faisceau).On peut ainsi créer des lobes constructifs / destructifs et optimiser une transmission entre l'émetteur et la cible Les techniques de beam forming permettent à la fois d'étendre une couverture radio (d'une station de base ou d'un point d'accès par exemple) et de limiter les interférences entre utilisateurs et la pollution électromagnétique environnante (en ciblant le récepteur visé).[3]

I.5 Canal :

Un canal de communications est un médium physique qui est utilisé pour la transmission d'un signal à partir d'un transmetteur jusqu'au récepteur. Il est également possible de procéder via des ondes électromagnétiques dans le sans fil. Quelque soit le mode de transmission, une constante demeure, c'est que des perturbations.

I.5 .1Le bruit :

Le bruit regroupe tous les signaux interférant avec une communication .Les communications alentours sont par conséquent du bruit, même si le terme d'interférent lui est

préféré Hormis ces interférents, le bruit peut provenir de perturbations atmosphériques (pluie pour certaines gammes de fréquences) ou cosmiques (éruptions solaires).

Ces bruits que l'on peut qualifier d'externes au système de communication sont complétés par des bruits internes, comme le bruit thermique propre au récepteur, ou le bruit degrenaille.[6]

I.5 .2 Modélisation du canal de la propagation :

Pour intégrer le modèle dans des simulations, la réponse impulsionnelle ***h (τ, t)*** est utilisée comme celle d'un filtre FIR Finité Impulse Response). Ainsi, à condition que la réponse du canal soit linéaire et invariante dans le temps (ou du moins sur un intervalle de temps suffisamment long par rapport aux données à envoyer), alors la sortie ***y(t)*** du filtre canal vaut le produit de convolution entre l'entré x(t) la réponse impulsionnelle [6].

h(t) : $\boldsymbol{y(t) = [x * h](t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau).h(t-\tau,t)\,d\tau}$ **(I.2)**

a)Le modèle de canal gaussien :

Le canal **GAUSSIEN** pour les communications sans fil est le canal statistique le plus simple du point de vue de la mise en œuvre, mais pas forcément le plus réaliste. Il modélise uniquement le bruit thermique du récepteur comme une variable aléatoire gaussienne de densité de probabilité $p_X(x)$ et s'ajoute au signal utile. La variable aléatoire est appelée le bruit blanc additif gaussien (**BBAG**). Le bruit est dit blanc car il perturbe de façon identique tout le spectre avec une densité spectrale de puissance mono-latérale constante N_0(W/Hz).

Le bruit est alors entièrement défini statistiquement par sa moyenne $\mu_b$nulle et sa varianceσ^2_b.[6]

$$p_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_b^2}} . exp\left[-\frac{(x-\mu_b)^2}{2\sigma_b^2}\right] \textbf{(I.3)}$$

b) Le modèle de Rayleigh :

Le modèle de Rayleigh est utilisé dans la simulation de systèmes de type indoor car il tient compte des trajets multiples et permet donc de modéliser les phénomènes à petite échelle. Le modèle de Rayleigh représente les trajets multiples comme un unique coefficient complexe (une atténuation et un déphasage), variant dans le temps[7].

L'atténuation du canal **β = |h|** est alors représentée comme une variable aléatoire suivant une loi de Rayleigh définie par sa densité de probabilité $p_B(\beta)$ de paramètre σ

$$PB(\beta) = \frac{\beta}{\sigma^2} . exp^{\left[\frac{-\beta^2}{2.\sigma^2}\right]} \qquad \forall \beta \geq 0. \qquad \textbf{(I.4)}$$

I .6.Architectures et techniques MIMO :

Plusieurs architectures ont ainsi été développées parallèlement, allant du multiplexage spatial aux codes spatio-temporels et proposant toutes une amélioration incroyable des performances des systèmes de transmission. Cependant, cette technologie multi-antennes ne fonctionne pas dans tous les milieux et doit respecter bon nombre de contraintes. Elle est de plus en pleine expansion avec les innovations affluentes. Cette partie a donc pour objectif d'une part de lever quelques restrictions propres à ces systèmes spatio-temporels et d'autre part d'optimiser leurs performances.[5]

Considérons un système MIMO avec *Nt* émetteurs et *Nr* récepteurs :

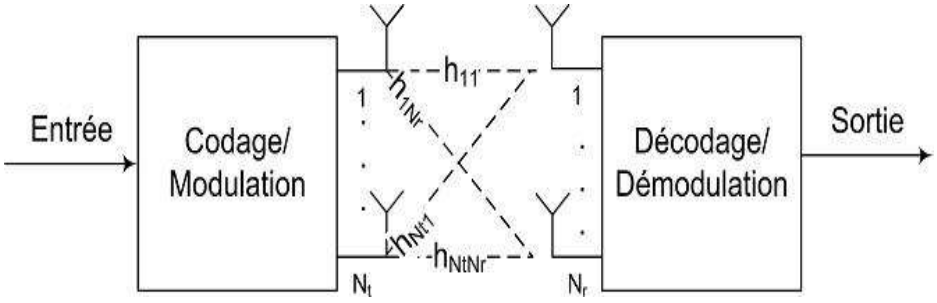


Figure I.8 : Schéma d'un système de transmission **MIMO**[5]

Le canal de transmission est supposé ici non-sélectif en temps et en fréquence, ainsi le trajet entre la m^a antenne émettrice et la n^e antenne réceptrice est représenté par le coefficient d'atténuation complexe H_{nm}. **On** appelle $S_m(k)$: le signal transmis sur la m^e antenne à l'instant k, le symbole reçu sur la n^a antennes s'écrit alors:

Les points étudiés sont :

$$y(k) = Hs(k) + b(k) \qquad \textbf{(I.5)}$$

$$\boldsymbol{H} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{h_{11}} & \cdots & \boldsymbol{h1_{Nt}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \boldsymbol{h_{Nr1}} & \cdots & \boldsymbol{h_{NrNt}} \end{pmatrix}, \boldsymbol{y} = (\boldsymbol{y_1} \dots \boldsymbol{y_{Nr}})^{\boldsymbol{T}} \quad \textbf{(I.6)}$$

$$\boldsymbol{s} = (\boldsymbol{s_1} \dots \boldsymbol{s_{Nt}})^{\boldsymbol{T}}, \boldsymbol{b} = (\boldsymbol{s_1} \dots \boldsymbol{s_{Nr}})^{\boldsymbol{T}} \quad \textbf{(I.7)}$$

I.7. Multiplexage Spatial :

Le principe du multiplexage spatial est l'agencement sans redondance de la séquence d'information suivant l'axe spatial. Le système transmet alors ***Nt*** fois plus de symboles utiles par unité de temps qu'un système **SISO**. Un tel système a été proposé par FOSCHINI en 1996, l'architecture de ce premier système **MIMO**, est appelé **D-BLAST**. Par la suite FOSCHINI et WOLIANSKY proposent deux schémas de codage plus réalistes, appelé V-BLAST et **H-BLAST**. Pour pouvoir être décodés, ces codes **BLAST** doivent utiliser au moins autant d'antennes en réception qu'en émission.[8]

- **Architecture H-BLAST**

Cette architecteur horizontale découpe directement la chaîne d'information en $\boldsymbol{N_t}$ sous-chaînes, puis chacune est codée indépendamment. Après avoir été modulée, chaque sous-chaîne est transmise simultanément par son antenne. Le schéma suivant fait ressortir cette architecture horizontale. Soit ($\boldsymbol{b_1, \dots, b_k}$) les bits d'information à transmettre et ($\boldsymbol{c^l_1, \dots, c^l_k}$) là $\boldsymbol{l^e}$ chaîne de symboles codés par le $\boldsymbol{l^e}$ Codeur est transmise sur là $\boldsymbol{l^e}$ antenne.[8]

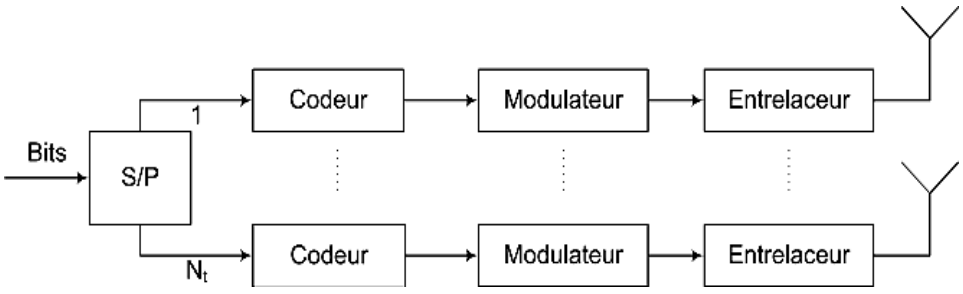


Figure I .9: Architecture d'un émetteur **H-BLAST**[8]

- **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. Le schéma suivant fait ressortir cette architecture horizontale. Soit ($b_1, \ldots, b_k$) les bits d'information à transmettre et ($c^l_1, \ldots, c^l_k$) la l^e chaîne de symbole codés par le l^e codeur est transmise sur là l^e antenne. [8].

$$(b_1, \ldots, b_k) \xrightarrow[\text{Démultiplexeur}]{} \begin{pmatrix} b_1 & b_{Nt+1} & \cdots \\ \vdots & & \\ b_{Nt} & b_{2Nt} & \cdots \end{pmatrix} \begin{matrix} \xrightarrow{1^e codeur} \\ \vdots \\ \xrightarrow{N_t^e codeur} \end{matrix} \begin{pmatrix} c_1^1 & c_2^1 & \cdots \\ \vdots & & \\ c_1^{N_t} & c_2^{N_t} & \cdots \end{pmatrix} \qquad \textbf{(I.8)}$$

L'architecture **V-BLAST** est la plus simple et la seule qui n'utilise pas de technique de codage. En effet, cette architecture verticale est simplement composée d'un démultiplexeur, permettant de diviser la chaîne binaire en N_t sous-chaîne munies chacune d'un modulateur. Les sous-chaînes de symboles résultantes sont ensuite transmises sur l'antenne qui leur est associée.

- **Architecture D-BLAST**

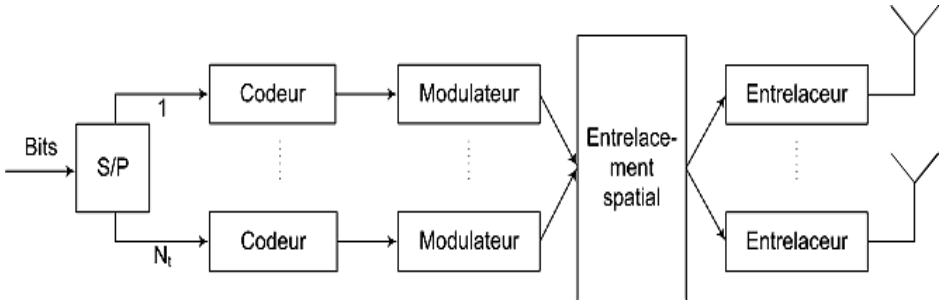


Figure I .10 : Processus d'un émetteur **D-BLAST** [8].

Comparé aux autres structures, le **D-BLAST** possède une structure plus complexe. Comme pour l'**H-BLAST**, chaque sous-chaîne est codée indépendamment, mais au lieu de transmettre les symboles d'une sous-chaîne sur une même antenne, ils sont transmis successivement par chacune des **Nt** antennes. Dans cette architecture, les symboles codés d'une sous-chaîne occupent une diagonale de la matrice de transmission. Cette structure permet de mieux résister aux atténuations du canal, cependant la complexité de son décodage la rend peu attrayante[8]

- **Les codes espace-temps :**

Les techniques **MIMO** utilisent conjointement deux types de diversité : la diversité d'émission qui utilise plusieurs antennes d'émission et la diversité de réception qui utilise plusieurs antennes de réception. La diversité de réception est peut être la solution la plus évidente puisqu'elle consiste à recombiner les répliques spatiales d'un même signal (le canal est supposé connu du récepteur). La diversité d'émission s'est imposée peu à peu par l'idée du déploiement de réseaux d'antennes côté station de base, et non plus côté terminal. Les contraintes sont alors plus faibles(encombrement, espacement, topologie des antennes). Néanmoins, le problème posé par la diversité d'émission est d'envoyer le signal en parallèle sur ***Nt*** .***Nr*** sous-canaux avec une superposition des ondes au récepteur créant des interférences, c'est-à-dire : chaque antenne de réception reçoit une combinaison pondérée de ***Nt*** signaux transmis. Le décodeur est alors plus complexe dans le cas **MISO** que dans le cas **SIMO**. La capacité du canal est également décroissante selon ***Nt.*** La répartition de la puissance sur ***Nt*** antennes à l'émission est également pénalisante. Cependant, l'ordre de diversité à nombre d'antennes égal est exactement le même[9]**.**

- **Les codes temps-espaces (STC : space-time coding) :**

Apparus afin d'améliorer la fiabilité de la transmission dans un contexte de diversité d'émission. La figure suivante 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

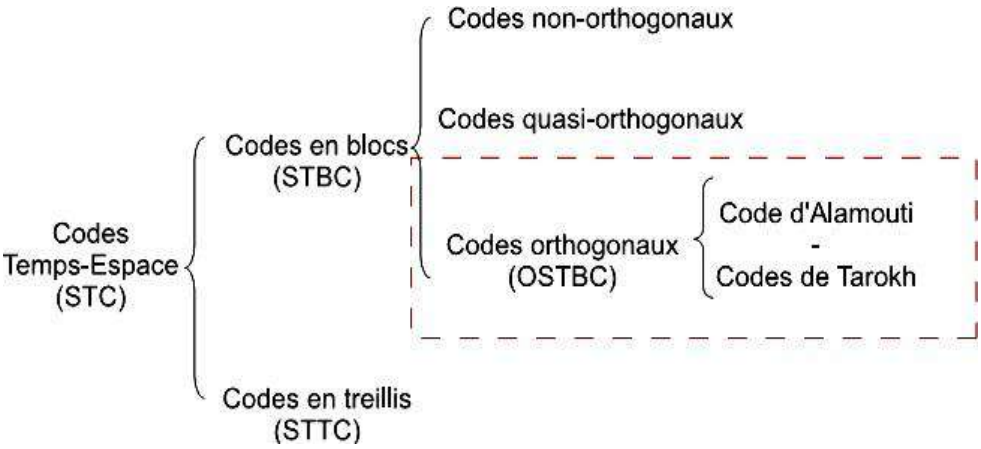


Figure I.11 : Les familles de codes temps-espace.[9].

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 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.[6]

I.8 Conclusion :

Les techniques de diversité et plus particulièrement : la diversité spatiale inhérente aux **MIMO**, s'avèrent très efficaces pour réduire l'impact des différents problèmes tels que la limitation de la bande fréquentielle du canal, les évanouissements et les trajets multiples, sur les performances des systèmes.

Les systèmes **MIMO** induisent un gain de diversité, qui correctement exploité peut permettre d'améliorer les performances du système en termes de qualité de service (**QoS**) et de débit de transmission

Chapitre II

Combinaison du système MIMO avec les différents types de multiplexages

II.1 Introduction:

La technologie **MIMO** (Multiple Input - Multiple Output) connaissent un essor important ces dernières années. La dimension spatiale permet de réaliser du multiplexage pour répondre aux fortes contraintes de débit des applications multimédia. Cette dimension spatiale peut également être exploitée pour profiter de la diversité, auquel cas on favorise la robustesse de la liaison. On utilise pour cela des techniques de codage appropriées comme le codage temps-espace.

La combinaison du **MIMO** et de **l'OFDM** permet d'exploiter les avantages des deux méthodes : la robustesse de la liaison sur des canaux sélectifs en fréquence pour **l'OFDM** et la robustesse sur des canaux non corrélés en espace pour les **MIMO** avec codage . Pour différentes configurations des systèmes multi-antennaires **SISO SIMO** et **MIMO**. Une étude comparative est réalisée entre ces dernières

Des systèmes d'accès multiples par division de code à porteuses multiples (**MC-CDMA**) ont récemment été introduits dans les systèmes **CDMA** existants afin d'améliorer la sécurité, le débit de transmission des données et de minimiser les interférences entre symboles (**ISI**). Le **CDMA** subit de graves évanouissements dus à la propagation par trajets multiples, ce qui nuit grandement à ses performances. En transmettant des formes d'onde identiques à séquence directe (**DS**) à bande étroite utilisant la diversité de fréquences, en parallèle avec un certain nombre de sous-canaux, les évanouissements par trajets multiples pourraient être minimisés.

Dans ce chapitre nous proposons d'étudier l'association à la technique **MIMO OFDM ,** ainsi que l'association à la technique **MIMO MCCDMA**.

II.2 Association MIMO-OFDM :

II.2.1 La technique OFDM:

Les accès multiples sont des techniques efficaces de partage de ressources de communication en temps et en bande passante, de manière optimale afin d'augmenter la capacité d'un réseau de communication en nombre d'utilisateurs ; cette technique doit être mise en œuvre sans créer d'interférences d'accès multiples (**IAM**) est l'orthogonalité entre les signaux des différents utilisateurs. [10]

Elle procède donc à un recouvrement mutuel des différentes sous-porteuses d'une manière orthogonal, cette orthogonalité permet une utilisation optimale des ressources spectrales et facilite l'implémentation numérique. L'un des problèmes majeurs en télécommunication est l'adaptation de l'information à transmettre au canal de propagation. Étant donné, la présence de canaux sélectifs en fréquences, on a recours à l'utilisation de modulations multi-porteuses dans laquelle un bloc d'information est modulé par une transformée de Fourier. Ainsi cette technique a connu un vif succès ces dernières années et est en phase de normalisation dans différents standards sans fils (**IEEE802.11a, WiMAX, LTE, DVB**). La technique **OFDM** a la grande particularité de transformer un canal multi- trajet large bande en un ensemble de sous-canaux mono-trajet très simples à égaliser. De plus, l'utilisation ingénieuse de redondance cyclique à l'émission permet de réduire la complexité des terminaux grâce à l'utilisation d'algorithmes à base de **FFT** rapides [10].

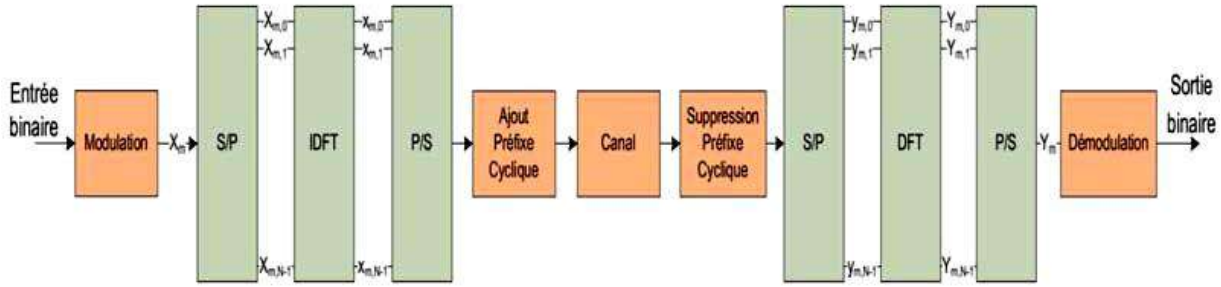


Figure II.1 : Schéma d'un système **OFDM** [10]

II-2-2 Schéma bloc d'un Système OFDM :

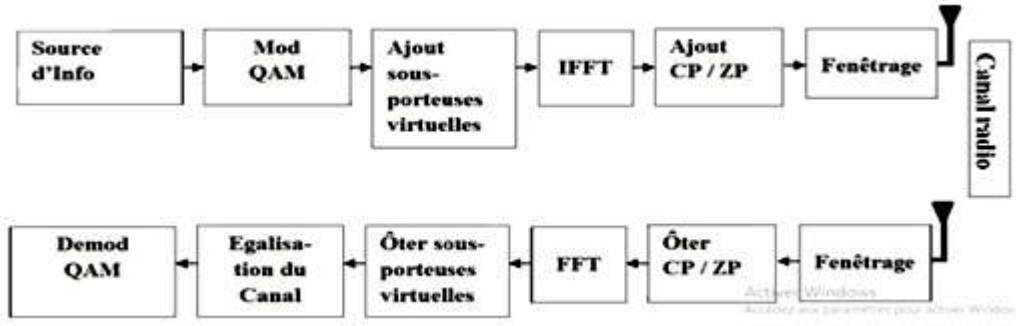


Figure II.2 : Schéma bloc simplifié d'un émetteur-récepteur **OFDM** [11]

La **figure II.2** illustre le schéma bloc simplifié d'un système de communication utilisant **l'OFDM** La source d'information génère des bits aléatoires. Ces bits sont modulés selon la modulation **QAM**.

Les sous porteuses virtuelles et les pilotes sont ajoutés avant d'appliquer **l'IFFT**. Le **Tableau II.1** fournit le nombre de sous porteuses virtuelles le nombre de pilotes ainsi que le nombre de porteuses utiles utilisés selon le standard **IEEE 802.16 [11]**

Tableau II.1 : Paramètres d'un système **OFDM** dans le standard **IEEE 802.16a**. [11]

La taille de la FFT	256
Nombre de sous-porteuses informatives	192
Nombre de sous-porteuses virtuelles	56
Nombre de pilotes	8

II.2.3 : Schémas d'association MIMO-OFDM

La combinaison des systèmes **MIMO** avec **l'OFDM** est considérée comme une solution prometteuse d'augmentation de la capacité des systèmes de communications sans fil et de résistance aux phénomènes de trajets multiples .En effet cela résulte en une diversité à la fois temporelle, fréquentielle et spatiale minimisant la possibilité d'évanouissement de plusieurs canaux indépendants.

Nous considérons un système **MIMO** utilisant la modulation **OFDM**, où l'émetteur et le récepteur sont munis respectivement de **M** et **N** antennes émettrices et réceptrices [12-13].

La modulation **OFDM** a pour principe de repartir le flux binaire à haut débit sur un ensemble de P sous-porteuses transmettant chacune des débits réduite **La figure II.3** décrit le schéma d'une transmission **MIMO / OFDM .**

L'émission comprend les étages suivants :

- Conversion série-parallèle de taille P afin d'obtenir des blocs de P symboles.

- Transformée de Fourier inverse de taille P.
- Insertion d'un intervalle de garde de taille D en début de bloc où la fin du bloc est recopiée.

L'insertion de l'intervalle de garde a deux objectifs. Le premier est d'absorber **l'IES** apportée par le canal de propagation et de rendre le canal non sélectif en fréquence pour chaque sous porteuse. Pour cette raison, la taille de l'intervalle de garde doit être choisie plus grande que l'étalement maximal des retards. Le deuxième objectif est de rendre cyclique la convolution entre le signal **OFDM** et le canal. Pour cela, la fin du signal est recopiée dans l'intervalle de garde. Le signal **OFDM** devient ainsi cyclique d'où le nom du préfixe cyclique. Dans le schéma **OFDM**, c'est l'ajout de cette extension cyclique à chaque bloc qui permet de prendre en compte le caractère sélectif du canal. [14]

- En réception, les opérations duales suivantes sont effectuées Conversion parallèle série.
- Conversion série parallèle de taille **P** afin d'obtenir des blocs de ($\mathbf{P + \Delta}$) symboles.
- Suppression de l'intervalle de garde correspondant aux Δ premiers échantillons du bloc.
- Transformée de Fourier directe de taille **P**.

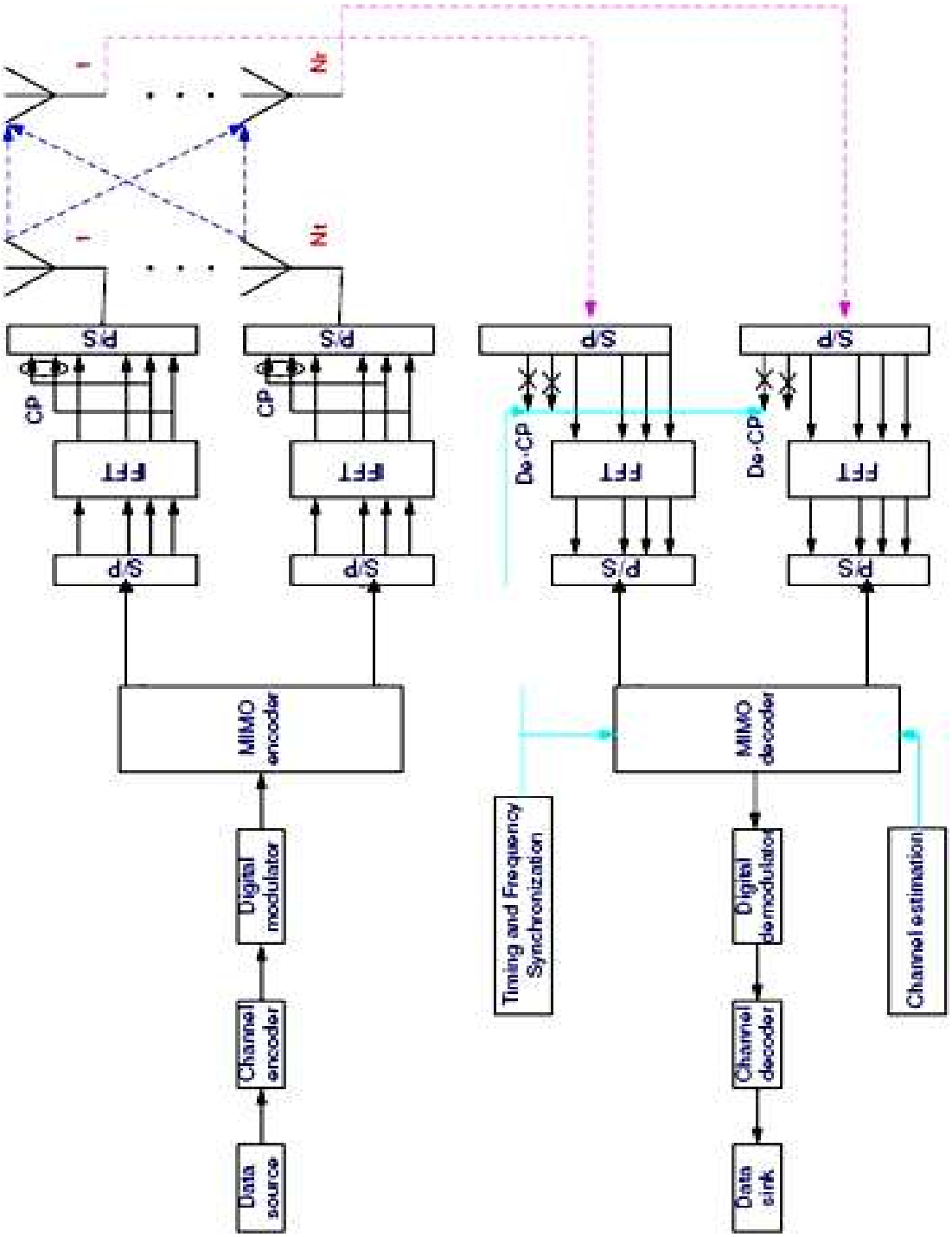


Figure II.3: Model du système **MIMO-OFDM** (**Nt*Nr**).[14]

II.3 Association MIMO MC-CDMA :

II.3 .1 Présentation du MC-CDMA :

La technique associant les modulations multi porteuses de type **OFDM** et la technique d'accès à répartition de codes **CDMA** a été exposée pour la première fois par Yee, Linnartz et Fettweis en 1993 par Fazel et Papke lors de la même conférence [15]. La technique **MC-CDMA** [16] réalise un étalement des données dans le domaine fréquentiel depuis son apparition en 1993, le **MC-CDMA** a fait l'objet de nombreuses analyses techniques notamment par Hara et Kaiser . Sa supériorité par rapport aux autres techniques combinant la technique d'accès **CDMA** avec la modulation **OFDM** a été démontrée sur liaison descendante où l'étalement des données se fait sur les différentes sous-porteuses grâce à une séquence d'étalement de type Walsh-Hadamard permettant de tirer a partir de canal.

II.3 .2 Le système MCCDMA :

Le **MC-CDMA** (accès multiple par division de code multi-porteuse) est utilisé dans les systèmes électroniques et de communication pour améliorer les performances sur des liaisons par trajets multiples. C'est une méthode de modulation qui utilise la transmission multi-porteuse.**MC-CDMA** formé en combinant multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (**OFDM**) avec accès multiples par répartition du code.**MC-CDMA** est la forme combinée de **CDMA** et **OFDMA**. Il offre l'avantage de combiner **CDMA** avec une robustesse naturelle à la fréquence sélective offerte par **OFDM** .

La mise en œuvre de la technique de modulation **MC** est connue sous le nom de **CDMA** à porteuses multiples. [17]

Nous distinguons deux grandes familles de systèmes d'étalement à porteuses orthogonales **MCCDMA** :

- Système de type **MC-DS-CDMA** (Multi carrier Direct Sequence **CDMA**).
- Système de type **MCCDMA** (Multi carrier **CDMA**).

II.3 .3 Association MIMO-MCCDMA:

Le but de cette association est, d'une part, d'exploiter les performances de ces deux techniques, en augmentant le débit de transmission par le multiplexage spatial tout en bénéficiant de la souplesse, de l'efficacité de la technique **CDMA** et de la diversité spatiale à la réception. D'autre part, cette association permet de combattre la sélectivité fréquentielle du canal par la modulation **OFDM**.

Nous commençons d'abord par présenter la chaîne associant le multiplexage spatial à la technique **MCCDMA**. Par la suite, les performances de cette nouvelle chaîne sont analysées en introduisant un codeur de canal au système **MIMO- MCCDMA**. En effet ce codeur de canal permettra une meilleure exploitation des trois formes de diversité : spatiale à l'émission, temporelle et fréquentielle.

Les figures suivantes présentent des schémas descriptifs du système **MIMO- VBLAST-MCCDMA** en émission et en réception :

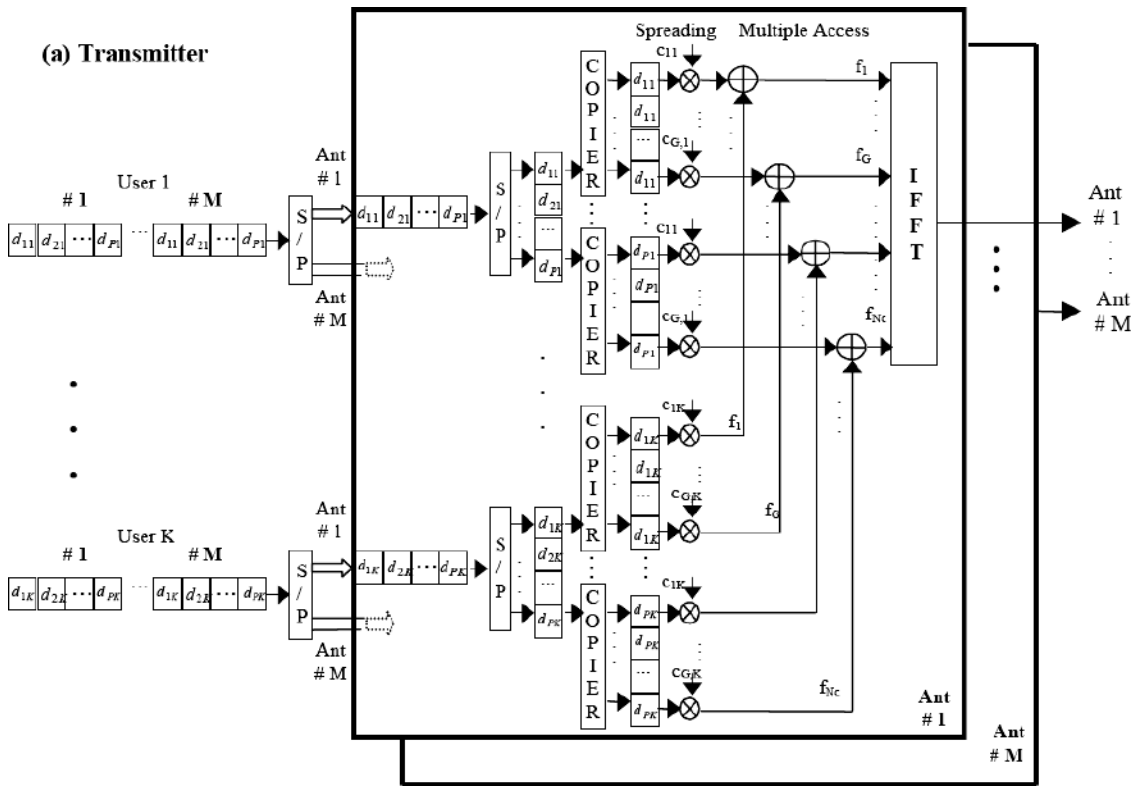


Figure II.4 : Système **MIMO-VBLAST-MCCDMA** en émission**. [18]**

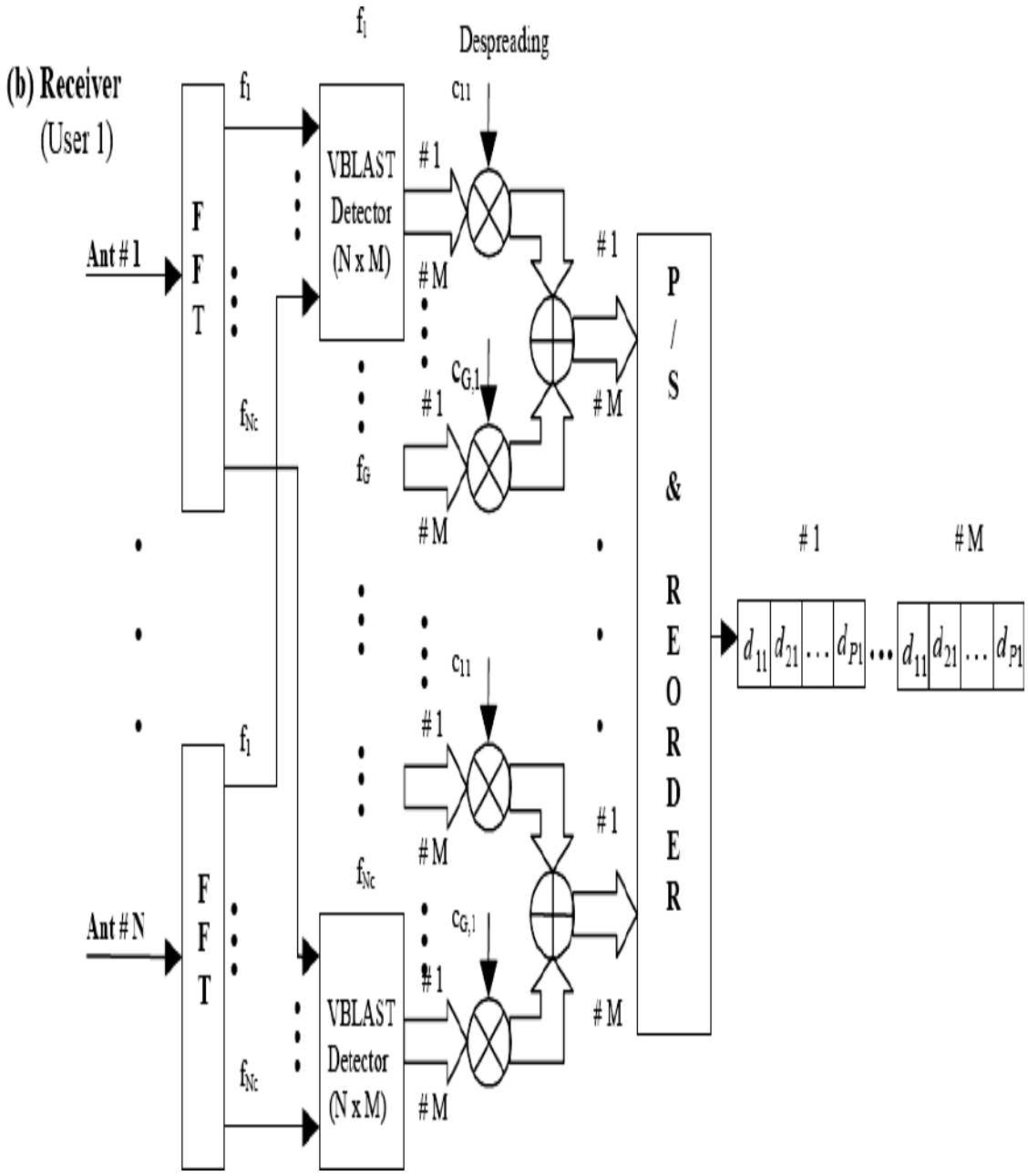


Figure II.5 : Système **MIMO-VBLAST-MCCDMA** en réception**.[18]**

En réception, le signal est une superposition des symboles transmis, bruités et atténués par les multi-trajets, compliquant la tâche des récepteurs traditionnels.

II.4 Conclusion :

Le déploiement de nouveaux réseaux cellulaires requiert toujours de transmettre des données à haut débit et par suite nécessite une grande efficacité spectrale vue la largeur de bande maximale qu'on pourrait utiliser. Dans la littérature, plusieurs solutions ont été présentées ayant chacune une efficacité spectrale. Généralement, ces solutions sont basées sur l'**OFDM** avec la technique d'accès multiple **CDMA**. Néanmoins, la solution de combinaison de technique d'étalement et de porteuses multiples présente aussi des avantages.

On a dressé une description assez détaillée du canal de transmission ainsi que de la transmission à porteuses multiples **OFDM** et de la technique de transmission d'accès multiple à travers des codes d'étalement **CDMA**.

Chapitre III

Diversité d’antennes et codage spatio-temporel

III.1 Introduction:

En présence de multi-trajets, l'évanouissement à petite échelle dégrade la performance des systèmes de transmission. Pour lutter contre cet évanouissement, il est nécessaire de répéter la même information sur différentes liaisons de transmission en supposant qu'il existe une forte probabilité d'avoir au moins l'une de ces liaisons qui ne subisse pas de forte atténuation.

Le récepteur est capable de recevoir plusieurs versions du signal émis à travers différents canaux. Pour avoir un bon gain de diversité, l'évanouissement dans un canal devrait être non corrélé par rapport aux autres canaux et la puissance moyenne disponible dans chaque canal devient quasi-identique. En réception, les signaux traversant ces canaux sont combinés d'une certaine manière afin de réduire l'évanouissement

Ce chapitre présente les différentes familles des codes spatio-temporels : les codes spatio-temporels en bloc (**STB**). Un code **ST** est caractérisé par son rendement, son ordre de diversité et son gain de codage.

III.2 La diversité :

Les techniques de diversité se révèlent comme un outil très important pour combattre les évanouissements. Il existe en littérature quatre types de diversité exploitée en transmissions numériques telles que la diversité temporelle, fréquentielle, spatiale et la diversité de polarisation

III.2 .1 Principe de la diversité :

Le principe de base de la diversité est que le récepteur doit disposer de plusieurs versions du signal transmis, reçues sur des canaux indépendants. La **Figure III.1** illustre deux signaux à évanouissements indépendants et le signal combiné en sortie du combineur. Si les deux signaux sont indépendants, il y a alors peu de chance qu'ils s'évanouissent au même moment. Nous voyons bien que le signal combiné possède un rapport signal sur bruit (**SNR**) moyen supérieur comparé à celui reçu par chaque antenne : en d'autres termes les évanouissements sont moins importants. Pour réaliser une bonne diversité, il faudra une bonne combinaison d'antennes pour avoir des signaux à évanouissement indépendants, mais aussi une bonne technique de combinaison de signaux permettant de maximiser le **SNR** moyen à la sortie [19]

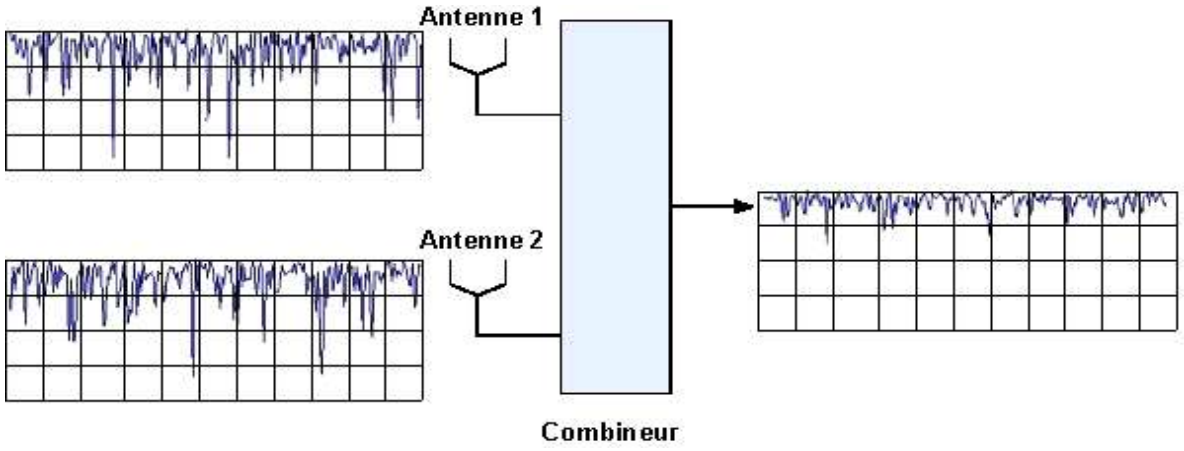


Figure III.1: Principe de la diversité **[19]**

III.2.2 La diversité spatial :

Dans ce cas, le récepteur traite des versions indépendantes du signal, obtenues à partir de capteurs judicieusement disposés. La distance minimale à respecter entre capteurs de l'ordre d'une fois la longueur d'onde du signal pour le mobile. Elle peut atteindre plus de dix fois la longueur d'onde pour une station de base de façon à garantir un évanouissement indépendant. Contrairement à la diversité temporelle et de fréquence, la diversité spatiale ne réduit pas le débit de transmission mais elle requiert plus de complexité et d'espace.

III.2.3 La diversité temporelle :

L'information est répétée dans le temps à intervalle plus grand que le temps de cohérence du canal (durée minimale séparant deux évanouissements selon un certain degré de décorrélation). Le désavantage de la diversité temporelle est évidemment le retard induit par la diversité, ce qui réduit le débit de transmission.

III.2.4 La diversité fréquentielles :

La diversité en fréquence consiste à transmettre le même signal à deux fréquences porteuses différentes pour obtenir deux versions à évanouissements indépendants du même signal **[20]**.

C'est un mécanisme délicat à mettre en œuvre à cause de la difficulté de générer plusieurs signaux à émettre mais aussi de combiner les signaux reçus à différentes fréquences

simultanément.

On a le même désavantage de la diversité de fréquence que celui de la diversité temporelle. On perd l'efficacité spectrale qui est liée au débit de transmission.

III.2.5 La diversité de polarisation :

L'idée de la diversité de polarisation est d'introduire une paire d'antennes verticale et horizontale au récepteur afin de capter le signal radioélectrique qui contient les deux composantes de polarisation. Avec cette technique de diversité, la transmission d'un signal avec une certaine polarisation peut s'effectuer avec une dépolarisation par le moyen de propagation en deux polarisations orthogonales avec des variations d'évanouissements indépendants

III.3 Codage espace-temps :

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. [21]

L'architecture générale du codage spatio-temporel (**CST**) est représentée sur la **figure III.2**, Le codage ajoute de la redondance aux données binaires émises afin d'augmenter la diversité spatiale et éviter les évanouissements propre au canal radio mobile. [21]

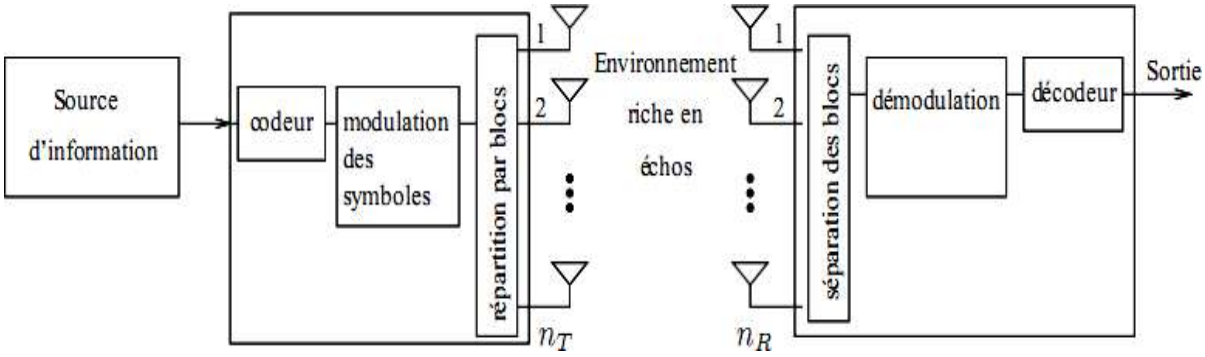


Figure III.2*:* schéma du codage spatio-temporel [21]

III.3.1 Code spatio-temporelle en bloc STBC :

Espérant réduire la complexité exponentielle du décodeur dévolu aux **CSTT**, ALAMOUTI a proposé un schéma simple de diversité d'émission [22] étendu par la suite par TAROHK [23].

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.

III.3.2 Code d'Alamouti [19] :

- **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 III.3.** Séquence de transmission et encodage Supposant qu'en veux 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 et sont simultanément transmis de la première et de la deuxième antenne. Dans le second intervalle ces $-s^*_0$ et s^*_1 et ainsi de suite **Tableau III.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.

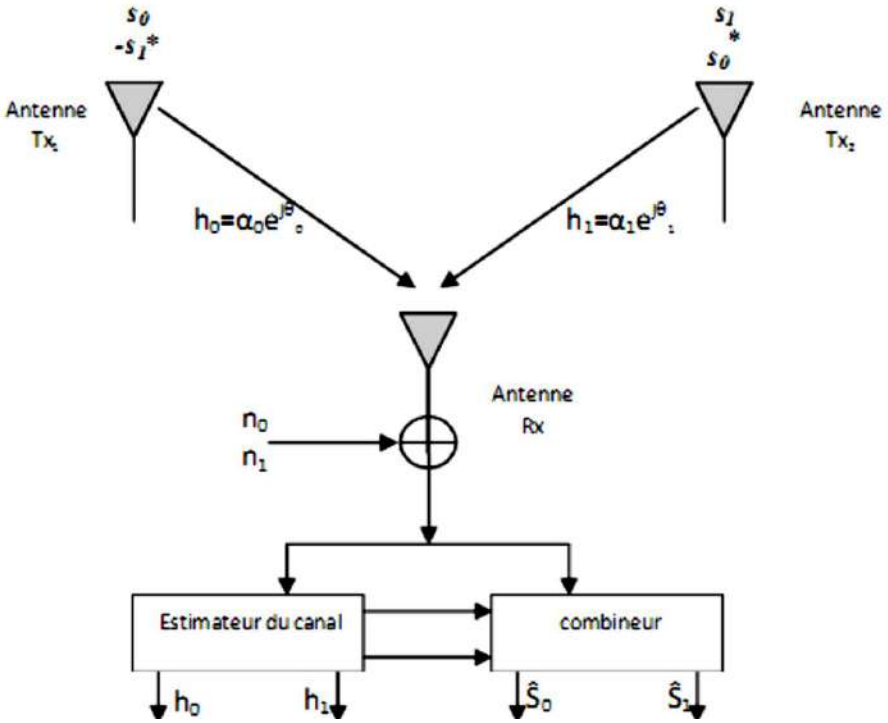


Figure III.3 : Schéma d'Alamouti avec une antenne émettrice et deux antennes réceptrices [19]

Tableau III .1 *:* Schéma de transmission dans le temps [19]

	Antenne T_{x0}	Antenne T_{x1}
Temps t	s_0	s_1
Temps t+T	$-s^*_0$	s^*_1

Les canaux au temps t sont définis par $h_0(t)$ pour l'antenneT_{x0} et $h_1(t)$ pour l'antenne T_{x1} . En faisant l'hypothèse que l'atténuation est constante pour la période donnée, on peut écrire

$$h_0(t) = h_0(t+T) = h_0 = a_0 e^{i\theta_0} \quad \textbf{III.1}$$

$$h_1(t) = h_1(t+T) = h_1 = a_1 e^{i\theta_1} \quad \textbf{III.2}$$

Où *T* est la durée entre le premier instant donné et le deuxième. Les signaux reçus peuvent donc être définis comme suit, $r_0$où r_1 et 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.

$$r_0 = r(t) = h_0 s_0 + h_1 s_1 + n_0 \quad \textbf{III.3}$$

r_1=r(t+T) $= -h_0 s^*_1 + h_1 s^*_0 + n_1$ **III.4**

Ou sous forme matriciel :

$$\begin{bmatrix} r_0 \\ r_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_0 & s_1 \\ -s^*_1 & s^*_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_0 \\ h_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_0 \\ n_1 \end{bmatrix} \quad \textbf{III.5}$$

r_n=Sh+n_a **III.6**

Le code est orthogonal car :

$$S = \begin{bmatrix} s_0 & s_1 \\ -s^*_1 & s^*_0 \end{bmatrix} \text{ et } S^H = \begin{bmatrix} s^*_0 & -s_1 \\ s^*_1 & s_0 \end{bmatrix} \Rightarrow SS^H = (|s_0|^2 + |s_1|^2)I \quad \textbf{III.7}$$

Avec S^H et l'hermitienne de S et la matrice identité 2× 2

Si on calcule le conjugué de r_1 dans (III.1 et III.2) on peut récrire (III .3 et III.4) sous la forme équivalant :

$$\begin{bmatrix} r_0 \\ r^*_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0 & h_1 \\ h^*_1 & -h^*_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_0 \\ n^*_1 \end{bmatrix} \quad \textbf{III.8}$$

r = Hs+n **III.9**

$$H = \begin{bmatrix} h_0 & h_1 \\ h^*_1 & -h^*_0 \end{bmatrix} \text{ et } H^H = \begin{bmatrix} h_0 & h_1 \\ -h^*_1 & h^*_0 \end{bmatrix} \Rightarrow H^H H = (|h_1|^2 + |h_2|^2)I = (a_0{}^2 + a_1{}^2)I \quad \textbf{III.10}$$

- **Schéma de combinaison au récepteur**

Le module de combinaison montré dans **figure III.3** forme les deux signaux suivant qui sont ensuite envoyé au détecteur

$$\begin{aligned} \hat{s_0} &= h^*_0 r_0 + h_1 r^*_1 \\ \hat{s_1} &= h^*_1 r_0 + h_0 r^*_1 \end{aligned} \quad \textbf{III.11}$$

$$\begin{aligned} \hat{s} &= H^H r \\ &= H^H (Hs + n) \\ &= H^H Hs + H^H n \\ &= \begin{bmatrix} (|h_0|^2 + (|h_1|^2 & 0 \\ 0 & (|h_0|^2 + (|h_1|^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0 \\ s^*_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h^*_0 & h_1 \\ h^*_1 & -h_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_0 \\ n^*_1 \end{bmatrix} \\ \hat{s_0} &= (a_0{}^2 + a_1{}^2)s_0 + h^*_0 n_0 + h_1 n^*_0 \\ \hat{s_1} &= (a_0{}^2 + a_1{}^2)s^*_1 + h^*_1 n + h_0 n^*_0 \end{aligned} \quad \textbf{III.12}$$

Les signaux combinés$\hat{s_0}$ et $\hat{s_1}$ sont envoyés au détecteur de forçage a zéro.

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

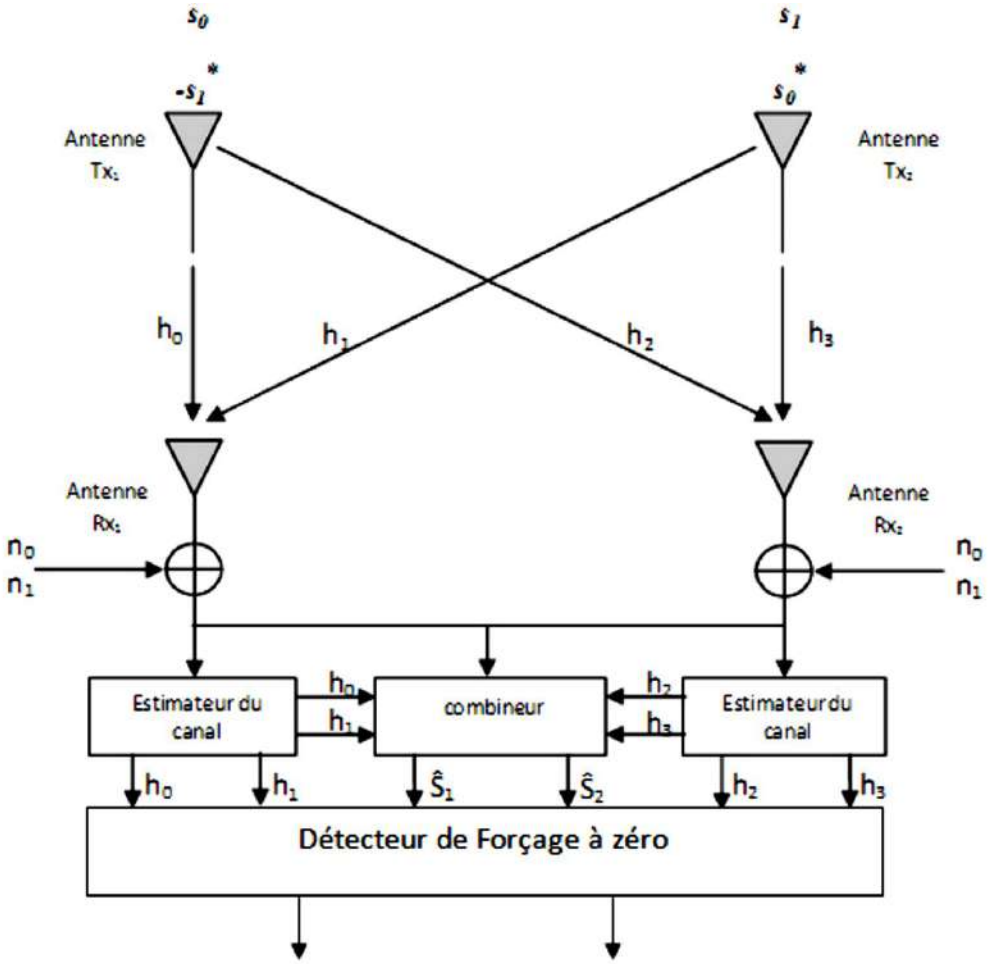


Figure III.4: Schéma d'Alamouti avec deux antennes émettrices [19]

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

Tableau III.2 : Signaux reçus aux niveaux des antennes réceptrices [19]

	Antenne $\boldsymbol{R_{x0}}$	Antenne $\boldsymbol{R_{x1}}$
Temps t	r_0	r_2
Temps t+T	r_1	r_3

Tableau III .3*:* Canaux entre antennes émettrices et antennes réceptrices [19]

	Antenne $\boldsymbol{R_{x0}}$	Antenne $\boldsymbol{R_{x1}}$
Antenne $\boldsymbol{T_{x0}}$	h_0	h_2
Antenne $\boldsymbol{T_{x1}}$	h_1	h_3

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 $\boldsymbol{s^*_1}$ et $\boldsymbol{s^*_0}$ sont transmis aux antennes 1 et 2 respectivement. La situation est résumée à la **Figure III.4**

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

On en déduit le modèle suivant pour le signal reçu :

$$\begin{aligned} r_0 &= h_0 s_0 + h_1 s_1 + n_0 \\ r_1 &= -h_0\, s^*_1 + h_1\, s^*_0 + n_1 \\ r_2 &= h_2 s_0 + h_3 s_1 + n_2 \\ r_3 &= -h_2\, s^*_1 + h_3\, s^*_0 + n_3 \end{aligned} \qquad \textbf{III.13}$$

Ou pour la première antenne :

$$\begin{bmatrix} r_0 \\ r^*_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0 & h_1 \\ h^*_1 & -h^*_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_0 \\ n^*_1 \end{bmatrix} \qquad \textbf{III.14}$$

et pour la deuxième antenne :

$$\begin{bmatrix} r_2 \\ r^*_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_2 & h_3 \\ h^*_3 & -h^*_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_2 \\ n^*_3 \end{bmatrix} \qquad \textbf{III.15}$$

n_0, n_1, n_2, n_3 étant les variables aléatoires représentant le bruit et l'interférence au récepteur.
Le combineur de **Figure III .4** forme les deux signaux suivant qui sont ensuite envoyés au détecteur par forçage à zéro:

$$\widehat{s_0} = h^*_0 r_0 + h_1 r^*_1 + h^*_2 r^*_2 + h_3 r^*_3$$
$$\widehat{s_1} = h^*_1 r_0 - h_0 r^*_1 + h^*_3 r^*_2 - h_2 r^*_3 \qquad \textbf{III.16}$$

Ou sous forme matriciel

$$\begin{bmatrix}\widehat{s_0}\\ \widehat{s_1}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}h^*_0 & h_1\\ h^*_1 & -h_0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}r_0\\ r^*_1\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}h^*_2 & h_3\\ h^*_3 & -h_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}r_2\\ r^*_3\end{bmatrix} \qquad \textbf{III.17}$$

En substituant (III.14) et (III.15) dans (III.8) en obtiens :

$$\widehat{s_0} = (a_0{}^2 + a_1{}^2 + a_2{}^2 + a_3{}^2)s_0 + h^*_0 n_0 + h_1 n^*_1 + h^*_2 n_2 + h_3 n^*_3$$
$$\widehat{s_1} = (a_0{}^2 + a_1{}^2 + a_2{}^2 + a_3{}^2)s_1 + h^*_1 n_0 + h_0 n^*_1 + h^*_3 n_2 + h_2 n^*_3 \qquad \textbf{III.18}$$

III.4 Généralisation de code espace-temps en bloc :

Les codes temps-espace en blocs ou en anglais Space-Time Block Codes (**STBCs**) sont historiquement les premiers codes temps-espace présentés dans la littérature. Le principe des **STBCs** est de diviser les séquences binaires d'entrée constituées de nP bits de manière à former P signaux d'une constellation à M = 2n états. Des combinaisons linaires de ces signaux et de leurs conjugués sont ensuite réparties dans une matrice nT ×T où nT est le nombre d'antennes d'émission et T le nombre de temps symbole nécessaire à l'envoi d'un mot de code. Le signal **MIMO** envoyé à l'instant t avec t = 1, T correspond à la te colonne du mot de code.[23]

III.5 Détection de signal pour les systèmes à multiplexage spatial :

Le principe du multiplexage spatial est l'organisation en espace sans redondance d'une série d'informations. Le système transmet alors 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) [21].

III.5.1 Détection de signal ZF (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 × 1 est alors donné par la relation:[24]

$$\hat{S} = H^{-1}r \qquad \textbf{III.19}$$

Le récepteur **ZF** sépare ainsi parfaitement les symboles transmis dans le même canal. Lorsque 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 n'est pas carrée (i.e. si) le récepteur multiplie à gauche par la pseudo-inverse de la matrice de canal pour récupérer tous les symboles. Dans ce cas, le vecteur estimé s'écrit:

$$\hat{S} = H^{+}r = (H^{*}H)^{-1}H^{*}r \qquad \textbf{III.20}$$

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

III.5.2 Détection de signal MMSE (erreur quadratique moyenne minimale) :

L'égaliseur **MMSE** est basé sur la minimisation de l'erreur quadratique moyenne, donnée par :

$$W = \arg\min_{W} E\ [\|W^{H}\ y - s\|^{2}] \qquad \textbf{III.21}$$

En présence de bruit, la matrice à inverser est toujours définie positive et donc inversible. Ce récepteur est donc moins sensible au bruit que l'égaliseur ZF mais ces deux égaliseurs deviennent équivalents en l'absence de bruit.[24]

III.5.3 Détection de signal ML(Maximum de Vraisemblance) :

L'égaliseur **ML** est optimal en termes de **BER**. Cette méthode consiste à comparer tous les signaux pouvant être reçus aux signaux réellement reçus, afin de sélectionner le plus vraisemblable d'entre eux[24]

$$\hat{S} = \arg\min_{S}\|y - Hs\|^{2} \qquad \textbf{III.22}$$

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 vas travaillez par la suit avec la **4-QAM** et la **16-QAM**. Le choix de la modulation s'effectue en fonction de la qualité du signal et du débit souhaités [24].

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 déférents 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 maximaliser les distances entre symboles pour une meilleure détection. Cette méthode permet également d'augmenter la quantité d'information contenue dans chaque symbole [24].

III.7 Conclusion :

Nous avons exprimé l'effet d'utilisation d'antennes multiples, et en troisième partie, on a vu le codage dans les systèmes **MIMO**, spécialement le codage spatio-temporel qui sera utilisé dans notre simulation sujet au cœur du prochain chapitre.

Donc ce chapitre a fourni un recueil d'outils théoriques dont la maîtrise est nécessaire à la conception de schémas de transmission pour les systèmes **MIMO**.

Chapitre IV

Conception des systèmes MIMO étudié

IV.1 Introduction :

Avant de concevoir des systèmes de communication, l'évaluation de leurs performancess'avère nécessaire. Toutefois, le but de ce travail est d'arriver à réaliser une simulation quitraitera les performances des systèmes **MIMO** et vérifions qu'il répond aux objectifs fixés,commençant par effectuer une comparaison entre des différentes capacités que nousallons vus dans le 1^{er}chapitre, puis passant a réalisé les deux configurations **MIMO**, **STBC**(2x1 2x2 et 4x3) , pour pouvoir finalement effectuer une comparaison entre les systèmes **STBC.**

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 Capacité de transmission :

Cette partie de simulation s'intéresse à l'étude de l'impact du nombre d'antennes sur les courbes de débits. Ceci dans le but d'observer l'intérêt de la diversité spatiale.

Les sous canaux considérés sont totalement décorrelés, tout en réduisant les niveaux de puissance, les gains en termes de débits binaires utiles sont très significatifs.

Nous montrons cette influence par la présentation des tracés des courbes de capacité **C=f(SNR)** en fonction du nombre d'antennes aux transmetteurs et aux récepteurs

IV.2.1Capacités des systèmes SISO, SIMO, MISO et MIMO :

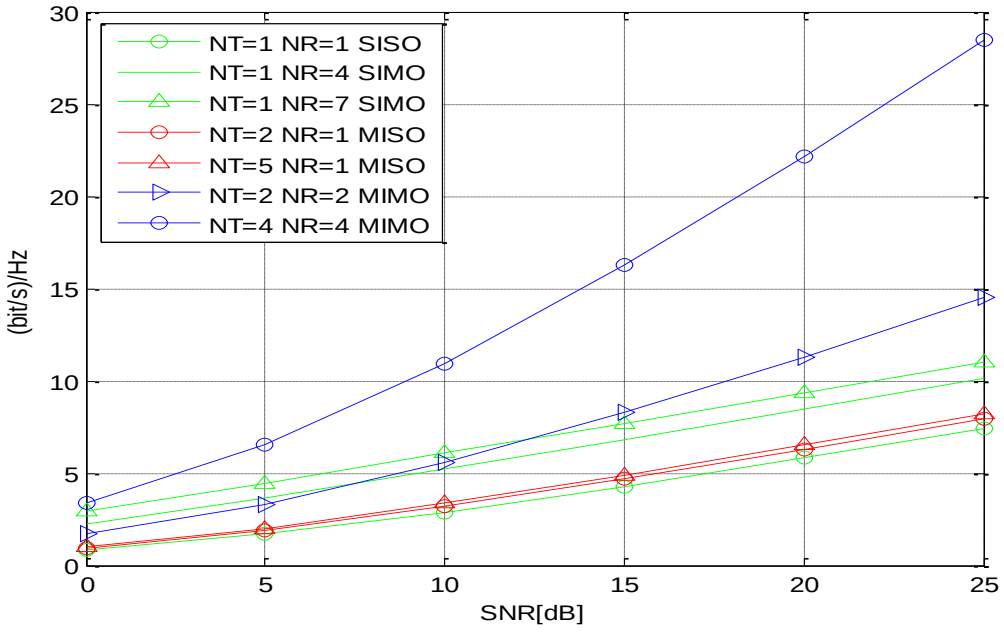


Figure IV.1: Capacités des systèmes **SISO, SIMO, MISO et MIMO**

- Dans le cas **SISO (N_t =1 et N_r=1)** la capacité varie de 0.9 à 7.5 **bps/Hz** environ.

Elle reste faible et croît lentement avec le **SNR**, ce qui illustre bien leslimitations des transmissions **SISO**. Malgré les techniques actuelles, qui permettentde tirer le maximum d'un canal **SISO**, sa capacité est une borne qui ne peut êtredépassée et un système multi-antennes, même sous-exploité, obtiendra de meilleuresperformances.

- Les deux exemples **MISO** (N_t =2 et N_t =5 et N_r=1) la capacité varie de 0.9 à 7.7 **bps/Hz**, Avec $N_t = 2$ le gain est presque nulle, ce qui est peu pour trois antennes supplémentaires, on a remarquons que la capacité dans le cas **SISO** et le cas **MISO** presque le même et augmente lentement.

Les deux exemples**SIMO** (N_t =1 et N_r=4 etN_r=7) la capacité varie de 2.2 à 10.2 bps/Hz montrent les bornes supérieures des traitements sans multiplexage spatial.

- Le passage à quatre antennes en réception permet de gagner 1.45 **bps/Hz** par rapport au **SISO**, ce qui n'est pas très important, en particulier à fort **SNR**.

AvecN_r =7 le gain est d'environ 1 **bps/Hz**, ce qui est peu pour trois 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 et 8). Pour un **SNR** de 0 dB,le système **MIMO** avec (N_t =2 et etN_r =2) a une capacité presque équivalente à celledu système SIMO avec quatre antennes. La capacité **MIMO** augmente ensuitebeaucoup 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.

VI.2.2 Nombre de transmetteurs supérieur aux nombre de récepteursen cas d'égalité ou inverse :

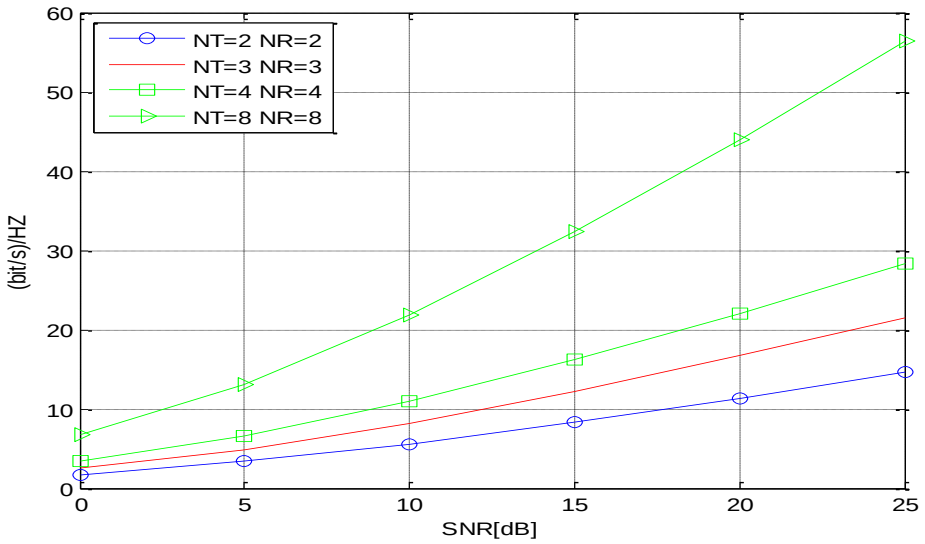


Figure IV.2 : Capacités des systèmes **MIMO** dans un canal de Rayleigh en fonction dunombre d'antennes pour$\boldsymbol{N_t = N_r}$

Afin de prouver l'efficacité du concept multi-antennaire, la **figure IV.2**montre plusprécisément que la capacité des systèmes **MIMO** croît linéairement avec le nombred'antennes émettrices et réceptrices, si celui-ci est égal ***Nt = Nr***

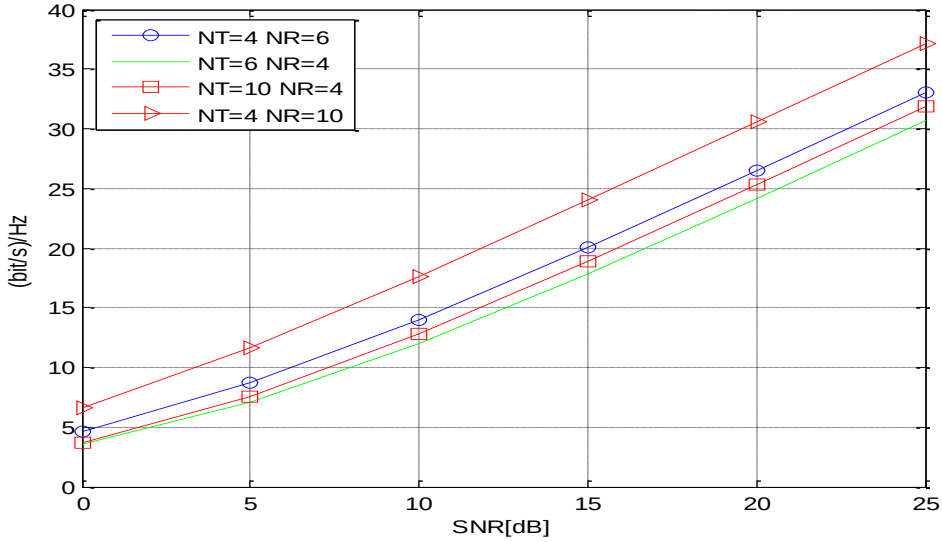


Figure IV.3 : Capacités des systèmes **MIMO** dans un canal de Rayleigh en fonction du nombre d'antennes pour $\boldsymbol{N_t > N_r}$**et** $\boldsymbol{N_t < N_r}$

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, supposent d'ailleurs que le nombre d'antennes en réception est toujours au moins aussi grand que le nombre d'antennes à l'émission

En revanche, pour un nombre d'antennes émettrices donné, la capacité des systèmes augmente théoriquement indéfiniment avec le nombre de récepteurs **figure IV.3.**

Ceci suppose cependant des conditions idéales, c'est-à-dire une parfaite dé corrélationentre 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 depropagation souvent imprévisibles.

On conclu dans le cas de **Nt = Nr** et **Nt < Nr** devient la capacité plus élevé et le débit plus rapide par rapport le cas de **Nt > Nr**.

IV.3 Simulation d'un système STBC (2x1 2x2 et 4x3):

Les Codes d'espace-temps en blocs bien que capable de fournir des ordres de grandediversité ont également des sanctions à haut débit. Alamouti dans son article montre que ladiversité espace temps en émission est vraiment une bonne solution pour l'amélioration desperformances. Après, Tarokh a abouti à des codes espace-temps pour trois et quatre antennesd'émission.

Le but de ces simulations est d'évaluer et de valider les performances du système dans différentsarchitectures **STBC** (2x1 2x2 et 4x3) à travers la caractérisation des niveaux de Taux d'Erreur Bit

(**BER** : Bit Error Rate) en fonction du rapport signal sur bruit (**SNR**).

- ✓ **les performances du STBC (2.1,2.2, 4.3) en QPSK :**

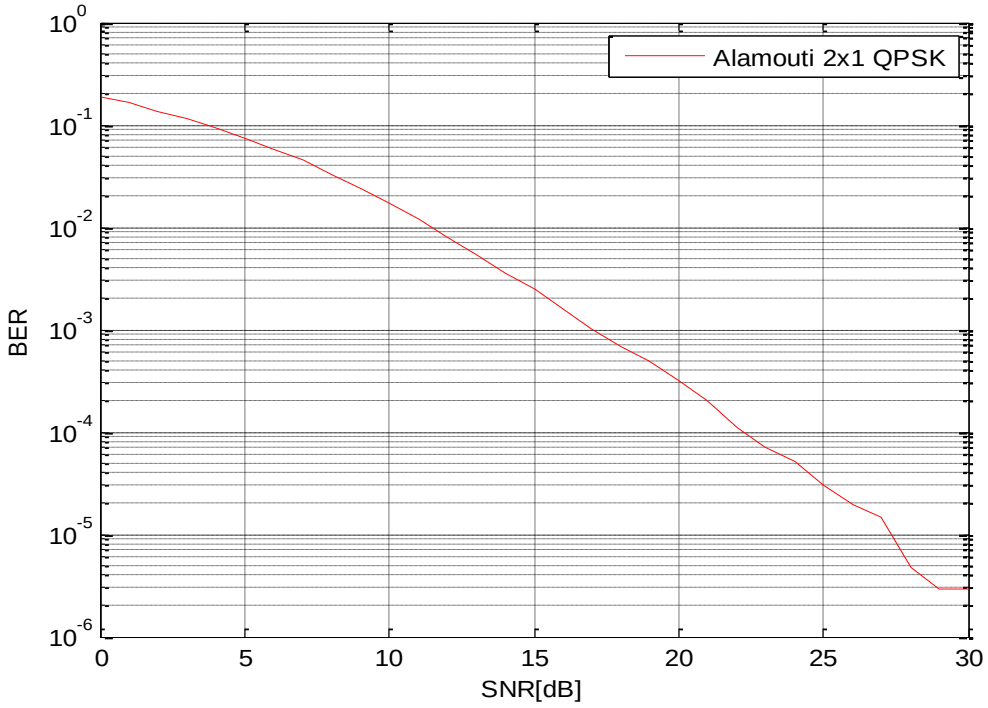


Figure IV.4 : les performances du en Alamouti 2.1 **QPSK**

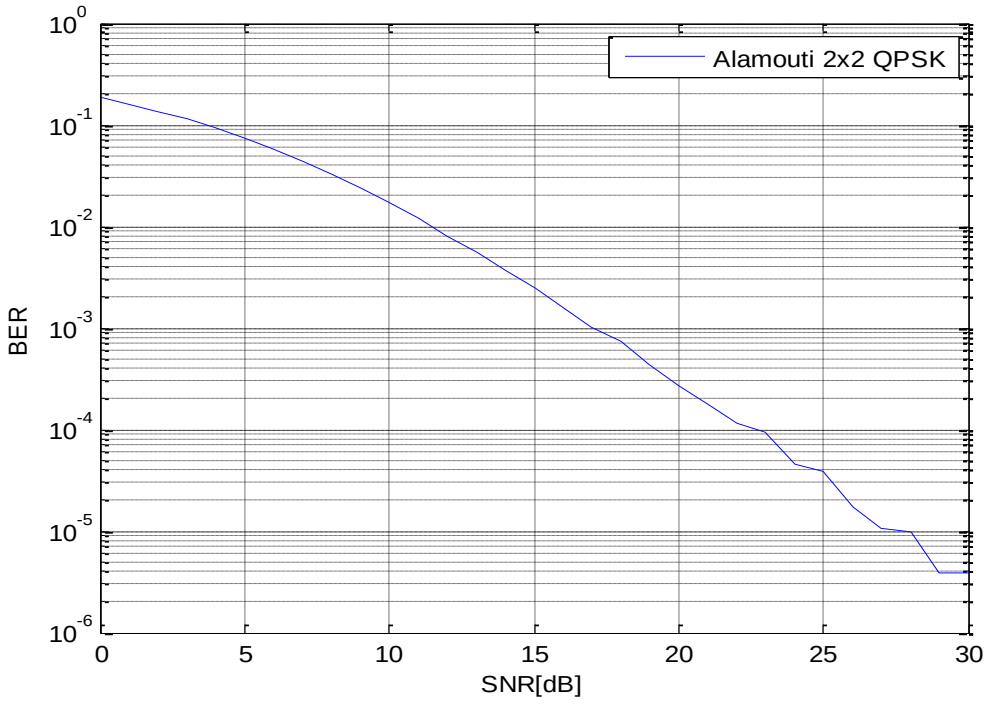


Figure IV.5 :les performances du en Alamouti 2.2 **QPSK**

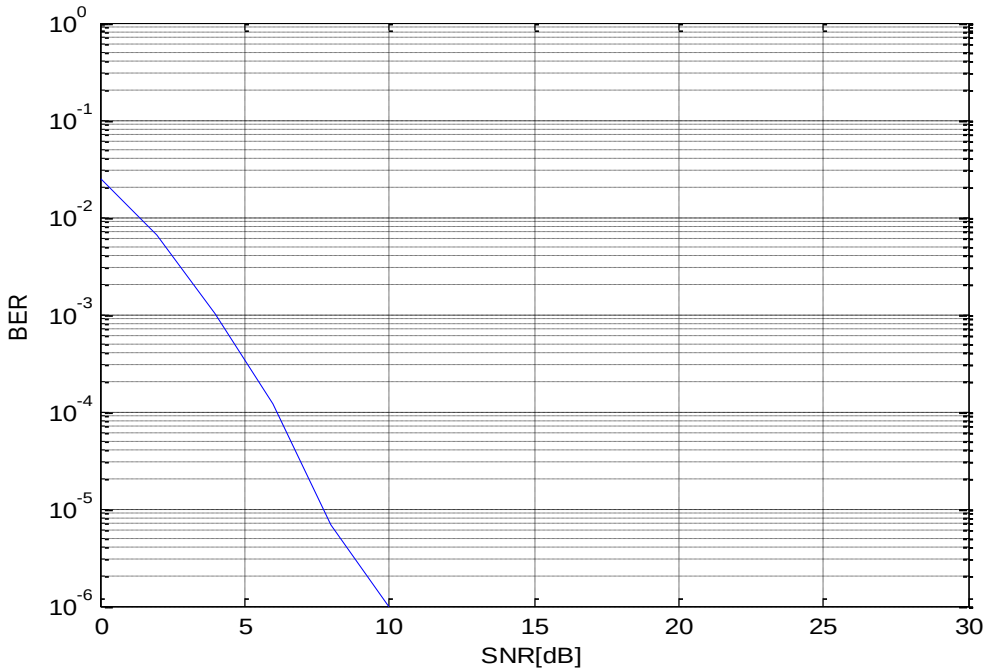


Figure .IV.6 : Performances des systèmes **STBC** (4.3) en **QPSK**

Dans les**figuresIV.4, IV.5 et IV.6**, nous présentons les performances des codes espace-temps en bloc sen modulation **QPSK** 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 quatreantennes en émission et trois en réception. En regardant de prés les performances obtenues entre le code d'Alamouti et le cas de **STBC** à 4x3 antennes.

Nous observons que les meilleures performances sont obtenues pour le système ayant unediversité importante c'est-à-dire le cas de 4x3 et nous retrouvons effectivement sur les **figuresIV.4, IV.5 et IV.6 ,**un écart d'environ de 15.5 dB pour un 10^{-4}**BER** entre le code Alamouti 2x2 et le cas de 4x3 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** 4x3 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.

- ✓ **les performances du STBC(2.1,2.2,4.3) en 16QAM :**

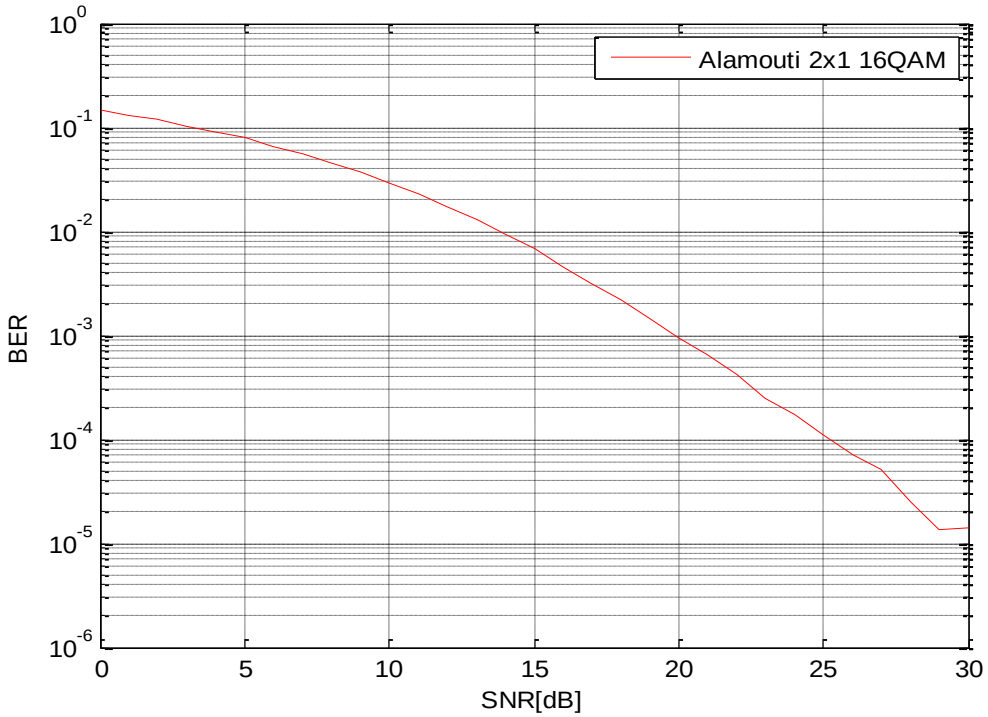
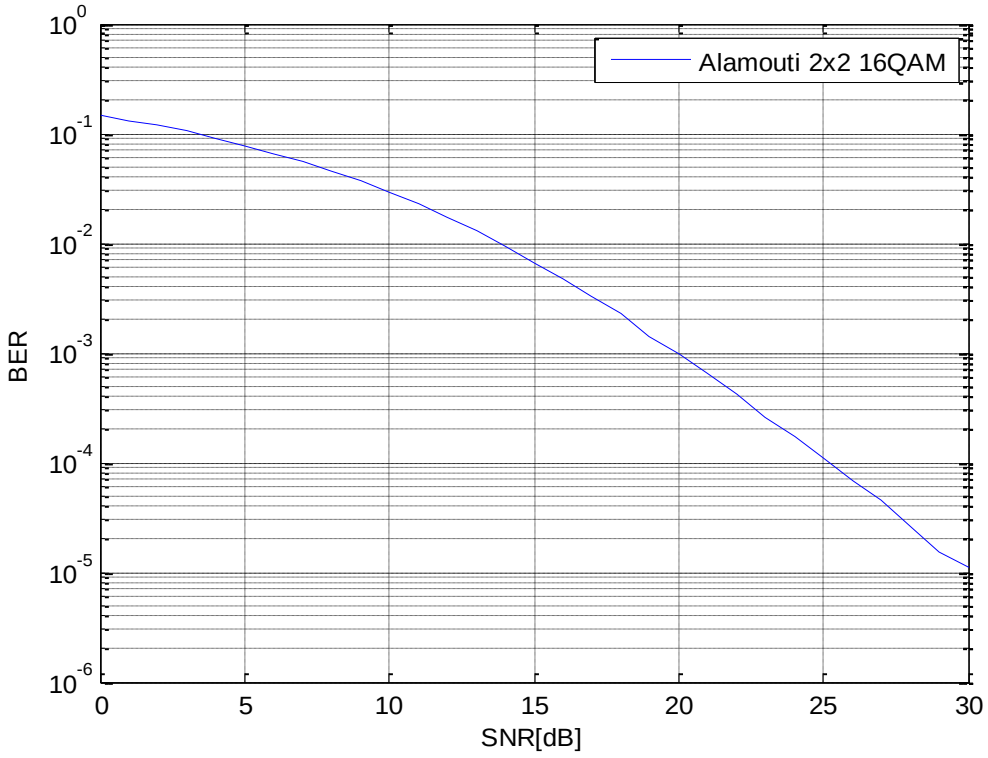


Figure IV.7 :les performances du en Alamouti 2.1 **16QAM**



FigureIV.8 : les performances du en alamouti 2.2 **16QAM**

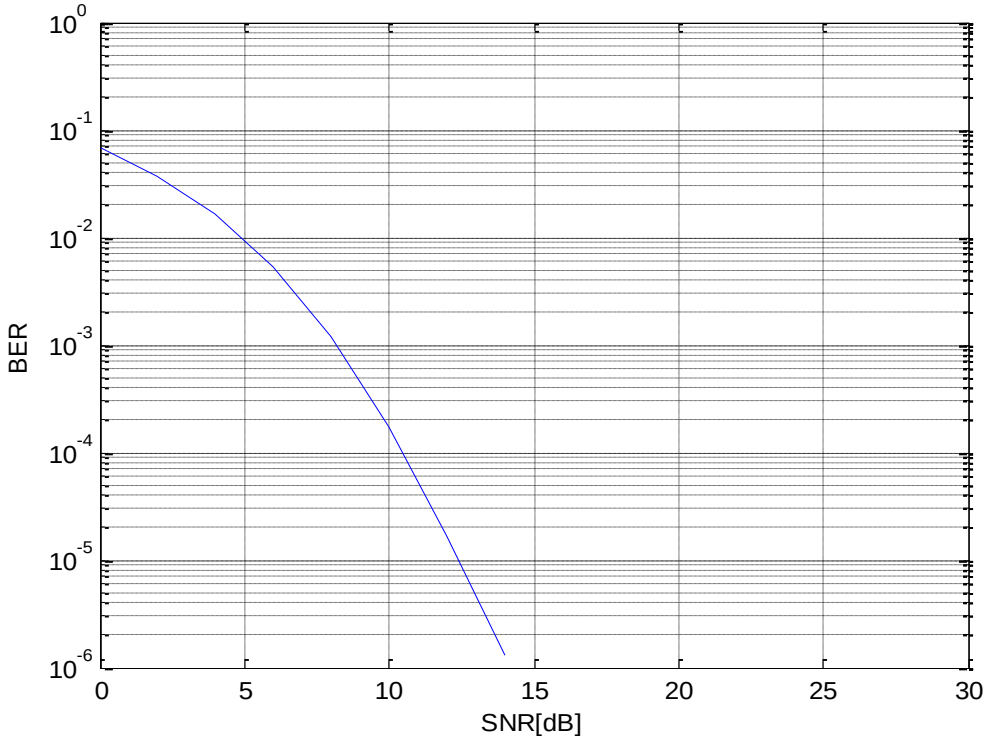


Figure IV.9 : Performances des systèmes **STBC**(4.3) en **16QAM**

Dans le cas de la technique de modulation **16QAM**, les **figures IV.7, IV.8 et IV.9** représente les performances des trois configurations ,Alamouti 2.1et2.2 ainsi que le **STBC** 4.3

Les mêmes remarques peuvent être faites pour ce cas. Nous pouvons voir, alors, que parrapport à l'Alamouti 2.1, la configuration 2.2 améliore considérablement le **BER** sur toute laplage de puissance qui garantie un gain au niveau de **BER** de 10^{-4}de 0 dB.

Encore, l'apport du **STBC**4.3 par rapport à l'Alamouti 2.2 s'avère plus significatif dansla plage des faibles puissances.

Donc, pour garantir le même niveau de **BER**, le système en configuration 2.2 a besoin d'émettre à une puissance supplémentaire d'environ 14dB par rapportun système en configuration 4.3 La contrepartie, aucune amélioration de l'efficacité spectrale

IV.4 Comparaison entre système STBC en QPSK et 16QAM :

On constate une dégradation des performances quand le nombre d'états de laconstellation utilisée augmente (de **QPSK**à **16QAM**). Ceci résulte de la diminution de ladistance euclidienne entre les différents états pour des constellations de taille croissante. Eneffet, les performances de la modulation **16QAM** sont moins bonnes que celles en **QPSK**.

Ainsi, en prenant comme exemple un niveau de **BER** égal à 10^{-4}le gain en **SNR** est d'environ4 dB entre le **16QAM** et le **QPSK** dans la configuration **STBC** 4x4 et d'environ 3 dBdans le cas en utilisant une configuration d'Alamouti 2x2.

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

IV.5 Conclusion :

Dans ce quatrième et dernier chapitre, Nous nous sommes penchés sur les caractéristiquesprincipales de ces systèmes **MIMO.** Nous avons expliqué la raison de leur succès en montrantque la capacité pouvait croître linéairement avec le nombre d'antennes émettrices ***Nt***. Nousavons présenté les différentes simulations des systèmes **MIMO** qui permettent d'augmenter lacapacité des systèmes de communication sans fil, en utilisant plusieurs antennes à l'émissionet à la réception.

CONCLUSION GENERALE

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**

Les travaux présentés dans ce document concernent la conception et l'évaluation des performances de systèmes multi-antennes pour des applications multistandards à deux accès et pour des applications en diversité et **MIMO**.

Nous avons commencé par étudier les caractéristiques principales de ces systèmes **MIMO**. et pour cela, on a fait quatre chapitres dont chacun forme une base pour le suivant pour atteindre à la fin notre objectif.

Dans le premier chapitre nous avons essayé 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 Nt. 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.

En arrivant au chapitre deux, on se sent prêt pour entamer le détail de la technologie **MIMO**, ce chapitre est fait en deux parties dont la première est consacrée pour donner l'association **MIMO-OFDM** et puis dans la deuxième on devait parler de l'association **MIMOMC-CDMA** .

La combinaison de systèmes **MIMO** avec les différents types de multiplexage permette d'éliminer les phénomènes d'interférences spatiales et d'interférences inter-symboles et d'assurer une transmission numérique parfaite et d'efficacité spectrale élevée (haut débit et très haut débit).

Le codage et le décodage dans les systèmes **MIMO** est le titre de la troisième chapitre dans laquelle on a cité quelques techniques, notamment le codage **STBC** (space time bloc code) qui consiste à fournir le même niveau de protection à chaque antenne du système, et ce que nous intéressaitprécisément est le codage d'alamouti qui est un code **STBC** orthogonal, sa propriété permet un décodage linéaire de ces codes, cette technique est évaluée dans le 4eme chapitre en utilisant **MATLAB**.

Le dernier chapitre a été consacrée à la simulation des capacités des différents schémas d'un système **MIMO** (**SISO**, **SIMO**, **MIMO**), ainsi les performances des plusieurs configurations **STBC** ont été exposé et interprété en détaille en utilisant les différentes techniques de modulation telles la **QPSK**et la **16QAM**.

Les résultats de simulation ont montré que les techniques **MIMO** peuvent soit augmenter le la capacité ou l'efficacité spectral, soit améliorer la robustesse des systèmes sans fil. La comparaison des deux techniques, montre que les systèmes **STBC**(Code generalisé)

est meilleur que système **STBC** (alamouti)et donne des meilleurs performances en terme de taux d'erreur binaire (**BER**) des données transmises avec une efficacité de la bande passante constante.

à partir de cela, on a pu conclure que ces techniques font améliorer considérablement les performances du système de transmission sans fil, et on a pu aussi constater que l'exploitation du phénomène multi-trajets (le principe de la technique **MIMO**) considéré comme un handicap pour longtemps, a énormément évolué les performances des systèmes de transmission en leur offrant plus d'espace pour la capacité de canal et plus de robustesse en minimisant le **BER** qui améliore la qualité, et ces deux critères sont l'objectif principale de la recherche dans ce domaine

BIBLIOGRAPHIES

Bibliographies

[1] **I.OUACHANI:** Performance analysis of communication systems wireless operator Micro and Macro Diversity, University of Paris XI Rosary, Discipline: Automatic and Signal Processing, June 28,2005.

[2] **MALIK ATIF SAEED, JANSHER TARIQ, AQIL MEHMOOD :** évaluation des systèmes MIMO 4x2 et 4x4 ; Rapport de projet de fin d'année à l'institut de la technologie de l'information de COMSATS à Islamabad en juillet2010.

[3] **BASEL RIHAWI, YVES :** Louet Influence des canaux Gaussien et de Rayleigh sur la distribution du PAPR dans les systemes MIMO-OFDM11-14 septembre 2007.

[4] **B.BENADDA, F.T. BENDIMERAD:** Quadratic error optimization algorithm applied to 3D space distributed array sensors, Journal of Applied Sciences Research, 5(10), pp.1320-1324,2009.

[5] **OUACHANI :** Performance analysis of communication systems wireless operator Micro and Macro Diversity

[6] **BENDIMERAD FETHI TARIK :** Mimo et acces multiples avances pour reseaux sans fil 2013

[7] **KAIS MABROUK : «** Conception et réalisation d'un système de Télécommunications MIMO avec formation numérique de Faisceaux en réception ; Calibrage aveugle du Démodulateur triphasé Zéro IF et comparaison au démodulateur classique à 2 voies I et Q ». Ecole nationale supérieur des télécommunications, 12 Décembre 2008.

[8] **P.W.WOLNIANSKY, G. J. FOSCHINI, G. D. GOLDEN, AND R. A. VALENZUELA:** –V- BLAST : An Architecture for Realizing Very High Data Rates Over the Rich- Scattering Wireless Channel", Bell Laboratories, Lucent Technologies, Crawford Hill Laboratory 791 Holmdel-Keyport RD., Holmdel,NJ07733.

[9] **BASEL RIHAWI :** « Analyse et réduction du Power Ratio des systèmes de radio-communications multi antennes », Université de Renne I, 20 Mars2008.

[10] **ZEGHAR MOHAMED OULD BOUKHARI HAMZA :** Etude et simulation de la chaine de transmission MIMO SC-FDMA de la liason montante du standard 4G-LTE 2017/2018.

BIBLIOGRAPHIES

[11] **HAMITAIT ALEB :** MIMO-OFDM pour les communication sans-fil dans les mines souterraines aout 2017

[12] **T. YILMAZ and O. B. AKAN:** "State-of-the-art and research challenges for consumer wireless communications at 60 GHz," IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 62, pp. 216-225, 2016.

[13] **P. F. M. SMULDERS and L. M. CORREIA:** "Characterisation of propagation in 60 GHz radio channels," Electronics & Communication Engineering Journal, vol. 9, pp. 73-80, 1997.

[14**] P. F. M. SMULDERS:** "Statistical Characterization of 60-GHz Indoor Radio Channels," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 57, pp. 2820-2829, 2009.

[15] **Y. WU and W.Y. ZOU:** "Performances simulations of COFDM for Broadcast applications", SMPTE Journal, May1995.

[16] **VINCENT LE NIR :. «** Étude et optimisation des systèmes multi-antennes associés à des modulations multi porteuses»,Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, 16 NOVEMBRE 2004.

[17] Performance Analysis Result and Simulation Result of MC-CDMA Using BPSK Modulation 2014 IJEDR | Volume 2, Issue 1 | ISSN: 2321-9939.

[18] **G. ELGER, B. FURUGREN:** «"SmartBo" An ICT an computer-based demonstration hom e for disabled people», In Proceeding of the 3rd TIDE Congress: Technology for Inclusive Desig n and Equality Improving the Quality of Life for the European Citizen, Helsinki, Finland, 1998.

[19] **ALIOU DIALLO :** Systemes multi-antennes pour diversite et MIMO 28 Novembre 2007

[20] **SCHWARTZ M., BENN W.R., STEIN S. :** "Communication Systems and techniques", Vol. 4, McGraw-Hill Book Company, US1966.

[21] **S. M. AlAMOUTI :** "A simple diversity technique for wireless communications", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 16(8):1451–1458, October1998.

[22] **V. TAROKH, N. SES, 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, March1998.

[23] **PIERRE VILAND :** Etude et optimisation de nouvelles méthodes de construction de codes temps-espace en treillis pour des constellations PSK et QAM on 6 Octobre 2011.

BIBLIOGRAPHIES

[24] **YAHOUM ABDELKADER BENAISSA ABDELKADER :** analyse des performances des techniques MIMO pour un lien sans fils en 2013