

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المديرية العامة للبحث العلمي و التطوير التكنولوجي

Direction Générale de la Recherche Scientifique et du Développement Technologique



Projet national de recherche : rapport final

MIMO ET ACCÈS MULTIPLES AVANCÉS POUR RÉSEAUX SANS FIL

Chef de projet : BENDIMERAD FETHI TARIK

Affiliation : Laboratoire de Télécommunications de Tlemcen (LTT)

Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen

Organisme pilote : CERIST

Programme national de Recherche : 2011-2013



تقرير عام لمشروع البحث Rapport général du projet PNR

I-Identification du projet :

PNR

1-تعريف بالمشروع

Organisme pilote

Technologies de l'Information et de la Communication

CERIST

Domiciliation du projet :

Laboratoire de Télécommunications de Tlemcen (LTT),
Université Abou-Bekr Belkaid – Tlemcen

Intitulé du projet

عنوان المشروع

MIMO et Accès Multiples Avancés pour Réseaux Sans Fil

Chercheurs impliqués dans le projet

أعضاء المشروع و المؤسسة المستخدمة

Nom et prénom الاسم و اللقب	Grade الرتبة	Etablissement employeur المؤسسة المستخدمة	Observation
BENDIMERAD Fethi Tarik	Professeur	Université Abou-Bekr Belkaid –Tlemcen	Chef de projet. Actif
HADJ ABDERRAHMANE Lahcène	Maître de recherche - A -	Agence Spatiale Algérienne (ASAL) Centre des Techniques Spatiales - CTS - Oran Centre de Développement de Satellites – CDS	Partenaire socio-économique. Actif
DEBBAT Fatima	Maitre de conférences - B	Université de Mascara	Active
DJENNAS Sidi Ahmed	Maitre de conférences - B	Université Abou-Bekr Belkaid –Tlemcen	Actif
BENAMAR Abdelkrim	Maitre de conférences - B	Université Abou-Bekr Belkaid –Tlemcen	Actif
BAHRI Sidi Mohammed	Maitre de conférences - B	Université Abou-Bekr Belkaid –Tlemcen	Actif

Novembre 2013

Table des matières

Liste des acronymes.....	4
Déroulement du projet	6
Introduction générale.....	8
a- Contexte et problématique.....	8
b- Objectifs.....	8
c- Impacts directs et indirects	9
d- Taches et plan du projet	12

Chapitre I - La technologie MIMO

I-1- Introduction.....	14
I-2- Présentation de la technologie MIMO.....	14
I-3- Principe de la technologie MIMO.....	16
I-4- Canal MIMO et modèles de signaux.....	17
I-5- Architectures et techniques MIMO.....	23
I-5-1- Multiplexage Spatial.....	24
I-5-2- Les codes espace-temps	26
I-6- Conclusion	28

Chapitre II - Association MIMO-OFDM

II-1- Introduction	29
II-2- De la mono-porteuse aux multi-porteuses (OFDM).....	29
II-3- Schémas d'association MIMO-OFDM.....	31
II-3-1- Codage VBLAST- OFDM.....	34
II-3-2- Décodage VBLAST-OFDM.....	34
II-3-3- Applications des codes espaces-temps aux systèmes MIMO-OFDM.....	35
II-4- Etude d'un réseau local sans fil à base de MIMO-OFDM.....	38
II-5- Prototypage d'un système MIMO-STBC-OFDM.....	43
II-5-1- Le prototypage de systèmes de communications.....	43
II-5-2- Techniques de reconfiguration	45
II-5-3- Méthodologie de prototypage.....	45
II-6- Conclusion	49

Chapitre III - Association MIMO-MCCDMA

III-1- Introduction.....	50
III-2- Le système MCCDMA.....	50
III-2-1- Le système MC-DS-CDMA (Multicarrier Direct Sequence CDMA).....	50
III-2-2- Le système MCCDMA (Multicarrier CDMA).....	51
III-3- Modélisation d'un système AMRC à porteuses multiples ou MCCDMA..	52
III-4- Association MIMO- MCCDMA	54
III-5- Conclusion.....	58
 Conclusion générale	59
Bibliographie.....	62
 Annexes.....	68
Annexe A - Situation financière.....	68
Annexe B - Contraintes rencontrées.....	70
Annexe C - Publications internationales.....	70
Annexe D - Communications internationales.....	73
Annexe E - Encadrement avec soutenance de thèses de Doctorat, de mémoires de Magister, de mémoires (PFE) de Master et d'Ingénieur en Télécommunications.....	74
Annexe F - Participation à des programmes de recherche.....	76
Annexe G - Prototypes.....	76
Annexe H - Logiciels.....	76

Liste des acronymes

MIMO : Multiple Input Multiple Output.
SISO : Single Input Single Output.
MISO : Multiple Input Single Output.
SIMO : Single Input Multiple Output.
DSSS : Direct Sequence Spread Spectrum.
FHSS : Frequency Hopping Spread Spectrum.
CDMA : Code Division Multiple Access.
OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplex.
COFDM : Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex.
MC-DS-CDMA : Multicarrier Direct Sequence CDMA.
MC-CDMA : Multicarrier CDMA.
PAPR : Peak to Average Power Ratio.
WLAN : Wireless Local Area Networks.
WMAN : Wireless Metropolitan Area Networks.
WWAN : Wireless Wide Area Networks.
WPAN : Wireless Personal Area Network.
LLC : Logical Link Control.
MAC : Media Access Control.
Wi-Fi : Wireless Fidelity.
WiMAX : Worldwide Interoperability for Microwave Access.
GSM : Groupe Spécial Mobile.
UMTS : Universal Mobile Telecommunications System.
3G/4G : 3ème Génération/4ème Génération.
IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers.
AWGN : Additive White Gaussian Noise.
FPGA : Field Programmable Gate Array.
FIR : Finite Impulse Response.
BBAG : Bruit Blanc Additif Gaussien.
BLAST : Bell Laboratories Layered Space-Time
H-BLAST : Horizontal-Bell Laboratories Layered Space-Time.
V-BLAST : Vertical-Bell Laboratories Layered Space-Time.
D-BLAST : Diagonal-Bell Laboratories Layered Space-Time.

STC : Space-Time Coding.
STBC : Space-Time Block Coding.
OSTBC : Orthogonal Space-Time Block Coding.
STTC : Space- Time Trellis Coding.
BPSK : Binary Phase Shift Keyed.
QPSK : Quadratic Phase Shift Keyed.
QAM : Quadrature Amplitude Modulation.
RF : Radio Frequence.
ISI : Inter-Symbol-Interference.
LMS : Least Mean Squares filter.
MMSE-IC : Minimum Mean Squared Error Interference Cancellation.
ZF : Zero Forcing.
SINR : Signal-to-interference-plus-Noise Ratio.
FFT : Fast Fourier Transform.
TFD : Transformée de Fourier Discrète.
GPP : General Purpose Processor.
DSP : Digital Signal Processor.
ASIC : Application-Specific Integrated Circuit.

Déroulement du projet

Rappeler brièvement les objectifs du projet et les tâches prévues

تذكير مختصر بأهداف المشروع و المهام المسطرة :

Notre objectif est l'étude et le développement de nouveaux systèmes de communications numériques sans fil à haut débit et des techniques de traitement du signal associées (MIMO, CDMA, OFDM, UWB, Codage, Retournement temporel, etc.). Nous développons une recherche orientée vers des problématiques originales en communications numériques et basée sur des approches avancées en traitement du signal.

Notre domaine de recherche couvre toutes les applications de communications sans fil haut débit (réseaux cellulaires, réseaux locaux, réseaux personnels et domotiques, télévision numérique, intra-véhicule, transmissions par satellite, etc.) avec pour principaux objectifs d'offrir des débits toujours plus élevés tout en garantissant une très bonne qualité de service : nous proposons donc de développer notre projet de recherche selon les objectifs les plus importants suivants :

Objectifs scientifiques et socio-économiques :

- Etudier de nouveaux systèmes de communications numériques sans fils à haut débit et des techniques de traitement du signal associées (MIMO, CDMA, OFDM, UWB, Codage).
- Augmenter le débit de transmission et exploiter la diversité offerte par les systèmes MIMO.
- Proposer de nouvelles techniques de transmissions permettant de satisfaire toujours aux mieux aux contraintes d'efficacité spectrale liées à la pénurie du spectre en fréquence et au nombre toujours croissant d'utilisateurs.

Objectifs techniques et technologiques :

- Rechercher pour les futurs réseaux radio-mobiles (sans fil), une combinaison optimale des techniques de modulations à porteuses multiples à grande efficacité spectrale de type OFDM et MC-CDMA, des techniques d'accès multiples de type CDMA et des techniques d'entrées/ sorties multiples de type MIMO.
- Dégager les solutions les plus propices à une intégration matérielle.
- Prototypage logiciel et proposition d'une architecture matérielle dans un contexte réel.

Objectifs socio-économiques :

- Soutenir le rythme d'un nombre de normes universelles en constante croissance dans le monde des télécommunications.
- Parvenir aux différents besoins et exigences des communications des utilisateurs avec une meilleure qualité de transmission.

Tâches prévues dans le projet :

- Ingénierie et suivi du projet.
- Etude détaillée des techniques d'accès avancées.
- Etude détaillée de la technologie MIMO.
- Modélisation et caractérisation des canaux de communications sans fil.
- Etude détaillée et exploitation de l'association MIMO-OFDM.
- Etude détaillée et exploitation de l'association MIMO-MC-CDMA et évaluation des performances de la chaîne de communications sans fil MIMO-MC-CDMA.
- Etude des différentes méthodologies de prototypage actuellement pratiquées.
- Inventaire sur les plates-formes de prototypage les plus récentes.
- Validation : vers un démonstrateur en temps réel.

Observation : Cette dernière tâche est en cours de réalisation vu les contraintes de coût rencontrées lors du prototypage matériel des architectures proposées.

Introduction générale

a- Contexte et problématique

Les technologies radio sont engagées dans une quête sans fin de capacité et donc de débit supérieur, couplée à un besoin constant d'amélioration de la qualité de la transmission. Les réseaux sans fil vont avoir à gérer un nombre croissant d'utilisateurs connectés et une intensification du trafic multimédia, avec une exigence de qualité de service comparable à celle des réseaux filaires haut débit. Si ces objectifs sont partagés par toute l'industrie des télécommunications et des réseaux, un consensus règne désormais sur le choix des technologies pour y parvenir. Les concepteurs des systèmes de transmission sans fil cherchent à optimiser la qualité de service et à surmonter les problèmes rencontrés lors de la conception et de la mise en œuvre de leurs systèmes.

b- Objectifs

La révolution en transmission numérique se manifeste dans l'émergence de plusieurs nouvelles technologies permettant d'augmenter considérablement les débits de transmission et d'améliorer la qualité de transmission.

Depuis quelques temps, les techniques multi-antennes MIMO (Multiple Input Multiple Output) tiennent une place prépondérante dans la recherche scientifique. Ils sont déjà utilisés par les équipements de type routeurs ou box Internet. Mais, la plupart des études sur les systèmes MIMO considèrent un canal non sélectif en fréquence. Cependant, l'effet multi-trajets provoque la sélectivité fréquentielle du canal. Pour cette raison, les travaux menés dans ce projet consistent à chercher et à développer pour les futurs réseaux radio-mobiles une combinaison optimale des techniques de modulations à porteuses multiples à grande efficacité spectrale (OFDM et MCCDMA), des techniques d'accès multiple CDMA et des techniques MIMO, reposant sur l'utilisation d'un réseau d'antennes à l'émission et à la réception.

Notre principal objectif est d'étudier un système complet pour les futurs réseaux de communication sans fil de 4ème génération (4G) reposant sur les techniques MIMO/MC-CDMA /OFDM. Le passage de la théorie vers l'industrialisation passe par des étapes de validations et notamment le prototypage logiciel et matériel. Des verrous algorithmiques restent à lever, et très peu de prototypes ou d'étude de faisabilité de tels systèmes ont actuellement été réalisés. Cette étape est indispensable au transfert de ces techniques dans le monde industriel. C'est dans cette optique que nous tentons de démontrer la faisabilité de l'association de ces techniques avec la technologie MIMO dans les systèmes de communications radio mobiles et réseaux sans fil.

Les objectifs techniques, technologiques et socio-économiques de ce projet sont :

Objectifs techniques et technologiques

- Rechercher pour les futurs réseaux radio-mobiles (sans fil), une combinaison optimale des techniques de modulations à porteuses multiples à grande efficacité spectrale de type OFDM et MC-CDMA, des techniques d'accès multiples de type CDMA et des techniques d'entrées/ sorties multiples de type MIMO.
- Dégager les solutions les plus propices à une intégration matérielle.
- Prototypage logiciel et proposition d'une architecture matérielle dans un contexte réel.

Objectifs socio-économiques

- Soutenir le rythme d'un nombre de normes universelles en constante croissance dans le monde des télécommunications.
- Parvenir aux différents besoins et exigences des communications des utilisateurs avec une meilleure qualité de transmission.

c- Impacts directs et indirects (Scientifiques, socio-économiques, socioculturels)

- **Impacts et retombées Scientifiques**
 - Notre domaine de recherche couvre toutes les applications de communications sans fils haut débit (réseaux cellulaires, réseaux locaux, réseaux personnels et domotiques, télévision numérique, intra-véhicule, transmissions par satellite, etc.) avec pour principal objectif d'offrir des débits toujours plus élevés tout en garantissant une très bonne qualité de service.
 - La technologie MIMO intervient au niveau de la couche physique des réseaux de télécommunications. Elle est donc indépendante de la couche applicative. Elle a vocation à être utilisée dans tous les domaines du sans-fil : réseaux radio locaux Wi-Fi, réseaux cellulaires et boucles d'abonnés WiMAX.
 - Ce projet propose de nouvelles techniques de transmissions permettant de satisfaire toujours au mieux aux contraintes d'efficacité spectrale liées à la pénurie du spectre et au nombre croissant d'utilisateurs.
 - Il apporte sa contribution aux développements de la recherche dans le monde des communications et des transmissions par la recherche de structures innovantes permettant un gain en complexité et/ou en efficacité spectrale et/ou en rapport signal à bruit.
 - L'Equipe de ce projet compte valoriser ses travaux et résultats de recherche tout en protégeant son savoir faire dans le domaine des réseaux sans fil, en publiant l'ensemble de ses recherches dans des revues internationales ou nationales. Elle projette même d'organiser une manifestation scientifique en rapport avec le thème de recherche développé.

- **Impacts sur la formation**

L'évolution rapide des Technologies de l'information et de la communication (TIC) axées sur les télécommunications nécessite une formation par et pour la recherche, nouvelle, de qualité et de haut niveau.

- Ce projet sur le plan scientifique permet aux étudiants d'appréhender les défis majeurs liés aux nouvelles technologies existantes ou futures qui sont axées principalement sur les performances des caractéristiques de l'interface radio (canaux multiples de communications, bruit, interférence, sensibilité, stabilité, etc.) et sur les processus algorithmiques (traitement et analyse des signaux de communications).
- Dans le cadre de l'exécution de ces travaux de recherche, plusieurs thèmes sont proposés pour former des Docteurs et Masters (LMD) et/ou des Docteurs, Magisters et Ingénieurs en Télécommunications.
- Des thèmes de ce projet sont proposés à des étudiants en post-graduation de la Faculté de Technologie, de l'Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen, comme sujets de mémoire de thèse : Formation de troisième cycle (Doctorat LMD) en Télécommunications, option : Communications et réseaux sans fil. Doctorat en Télécommunications. Ecole Doctorale des Technologies et des Applications Spatiales (EDTAS), Spécialité : Télécommunications et Informatique Spatiales (TIS). Magister de Télécommunications (MTC).
- Des sujets de projet de fin d'Etude (PFE) de Masters et d'Ingéniorat d'Etat en Télécommunications, sont aussi proposés.

- **Impacts sur le développement socio-économique du pays**

- Avec le développement et l'ouverture du secteur économique et industriel des télécommunications, le projet de recherche compte apporter sa contribution dans la maturation d'axes de développement ou de leur mise en œuvre sur la base d'une analyse des potentialités industrielles et des possibilités d'intégration du tissu industriel local, régional ou national de télécommunications, existant.
- Les prototypes et plates formes logiciel et matériel des systèmes MIMO-OFDM et MIMO-MC-CDMA conçus ou réalisés dans le contexte des ce projet trouveront leur exploitation dans diverses applications nouvelles dans le domaine des Télécommunications, en particulier dans les applications de communications sans fil haut débit (réseaux cellulaires, réseaux locaux, réseaux personnels et domotiques, réseaux 3G/4G, UMTS, WLAN IEEE 802.11 ou encore WiMAX IEEE 802.16, transmissions par satellite, télévision numérique, intra-véhicule, etc.)
- Ils seront certainement d'une utilité capitale dans l'amélioration des performances des caractéristiques radioélectriques des réseaux sans fil (débit, capacité, qualité et sécurité de service, bande passante, gain, rendement, directivité, adaptation, détection, etc.) et à des fins de télécommunications terrestres ou spatiales.

- L'Equipe de ce projet peut valoriser ses travaux et résultats de recherche à travers des contrats de recherche, des prestations de service et des collaborations avec des organismes et des industriels (secteur socio-économique).
- Elle peut préparer l'industrie aux mutations technologiques par des apports d'innovations technologiques et scientifiques en télécommunications (recherches fondamentales et appliquées) Ces innovations sont à promouvoir constamment au sein de l'industrie.
- Nos rapports avec l'environnement socio-économique et la coopération industrielle résident dans la prise en compte des besoins de l'environnement régional ou national et le développement de la prestation de service au niveau de la recherche.
- Le développement de la coopération avec d'autres équipes de recherche en Télécommunications, reste aussi une priorité. Cette coopération peut concerner les domaines d'encadrement, de documentation et de recherches coordonnées.
- Enfin, notre Equipe de recherche peut utiliser son expérience et potentialité pour contribuer activement et efficacement à la mise en œuvre ou au fonctionnement de réseaux de recherche appropriés dans les domaines qui restent étroitement liés aux technologies de l'information et de la communication (TIC) et spatiales :

. Réseau Micro et Nano Technologies Photoniques (RMNTP) : Notre Equipe de recherche, représentée par son Chef d'Equipe et de projet est partie prenante de ce réseau.

. Réseau National de recherche et développement dans le domaine des TIC (2RSTIC) : Le Ministère de la Poste et des Technologies de l'Information et de la Communication (MPTIC) s'attelle à la mise en œuvre d'un Réseau National Hétérogène de recherche et développement (R.D) dans le domaine des TIC (2RSTIC). Il est important de noter la disponibilité permanente de notre Equipe de recherche en potentiel humain et en équipement informatique et scientifique pour contribuer activement à la mise en œuvre et au fonctionnement de ce réseau.

. Programme Spatial National (PSN : 2006-2020) de l'ASAL (MPTIC), Stratégie e-Algérie 2014 du MPTIC et Technologies de l'Information et de la Communication (TIC)

L'Algérie a, depuis son indépendance, mis en place un réseau de radiocommunications pour la couverture de son vaste territoire. Aujourd'hui, de nombreux services sont offerts au moyen des satellites de télécommunications et ce, pour répondre aux besoins sans cesse croissants et diversifiés des opérateurs socio-économiques. Le système national de communications est amené à évoluer vers un système spatial grâce à l'exploitation du satellite Algérien de télécommunications Alcomsat-1, ce qui permettra :

- une meilleure gestion des réseaux de télécommunications (GSM, UMTS, réseaux 3G/4G, ...) permettant de gérer de façon fiable un plus grand nombre d'abonnés (haut débit) en temps réel.

- l'augmentation des performances des réseaux de télécommunications en termes de débit, capacité, qualité et sécurité de transmission.

d- Taches et plan du projet

La première étape de ce projet de recherche se déroule à deux niveaux différents. Le premier niveau concerne l'étude et l'exploitation des techniques avancées d'accès multiples telles que : CDMA, OFDM, COFDM et MC-CDMA. Le second niveau concerne la recherche de nouvelles architectures d'entrées et de sorties multiples et des outils associés pour la mise en œuvre de ces systèmes (MIMO).

La deuxième étape consiste à proposer de nouvelles architectures qui permettent la combinaison de l'utilisation d'antennes multiples (antennes intelligentes, auto-adaptatives de détection) avec les techniques d'accès multiples, donnant naissance à de nouveaux types de systèmes multi-utilisateurs : les systèmes MIMO-CDMA, MIMO-OFDM et MIMO-MC-CDMA. De tels systèmes tirent profit des avantages présents dans la diversité (temporel, fréquentiel, spatiale et de code).

La troisième étape consiste à étudier des applications nouvelles dans le domaine des Télécommunications (l'UMTS, le WLAN IEEE 802.11 ou encore le WiMAX IEEE 802.16), et à proposer des prototypes (plate forme logiciel et matériel) de systèmes MIMO-OFDM et MIMO-MC-CDMA dans le contexte de ces applications. Pour cela, nous étudions tout d'abord les contraintes en terme de qualité et puissance de communication, puis les différentes méthodologies de prototypage actuellement pratiquées et enfin nous inventorions les plates-formes de prototypage les plus récentes. Nous retenons la méthodologie de conception/prototypage orientée plate-forme la mieux adaptée à notre système.

Les tâches préconisées que l'équipe se propose de mettre en œuvre (Programme de recherche) sont :

- Etude et exploitation des techniques avancées d'accès multiples telles que : CDMA, OFDM, COFDM et MC-CDMA.
- Recherche de nouvelles architectures et des outils associés pour la mise en œuvre des systèmes MIMO. La complexité des algorithmes impliquée par les traitements MIMO nécessite des architectures matérielles performantes afin d'effectuer le traitement en temps réel entre autres.
- Etude et développement de nouvelles architectures de systèmes MIMO-CDMA utilisant l'auto-adaptation d'antennes comme technique de transmission dans le but d'éliminer les interférences mutuelles entre les utilisateurs.
- Etude et développement d'architectures basées sur des algorithmes de traitement du signal utilisés pour le système MIMO, permettant d'augmenter les performances des réseaux sans fils (MIMO-OFDM) en termes de débit, capacité et qualité de transmission.
- Etude et implémentation de systèmes de communications sans fil utilisant la technique MIMO associée à la technique MC-CDMA, afin d'associer les avantages de ces deux techniques dans un seul système qu'on appellera MIMO-MC-CDMA.

- Etude et conception de systèmes multi-antennes MIMO, intégrant les technologies d'accès multiples (CDMA, OFDM, MC-CDMA).
- Modélisation et caractérisation des canaux de transmission de communications sans fil (intra-bâtiment, radio-mobile, satellite, etc.).
- Evaluation des performances par prototypage logiciel de la solution proposée.
- Validation de la solution technique proposée par un prototype expérimental basé sur les architectures reconfigurables (FPGA).

La planification du projet est présentée par les diagrammes suivants :

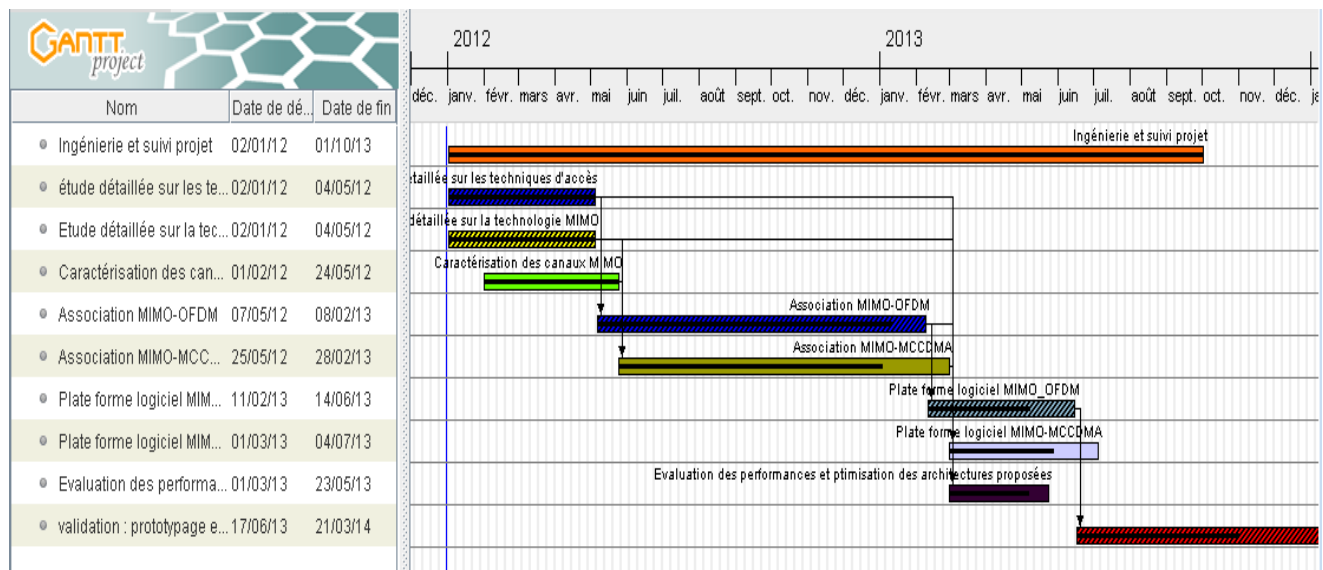
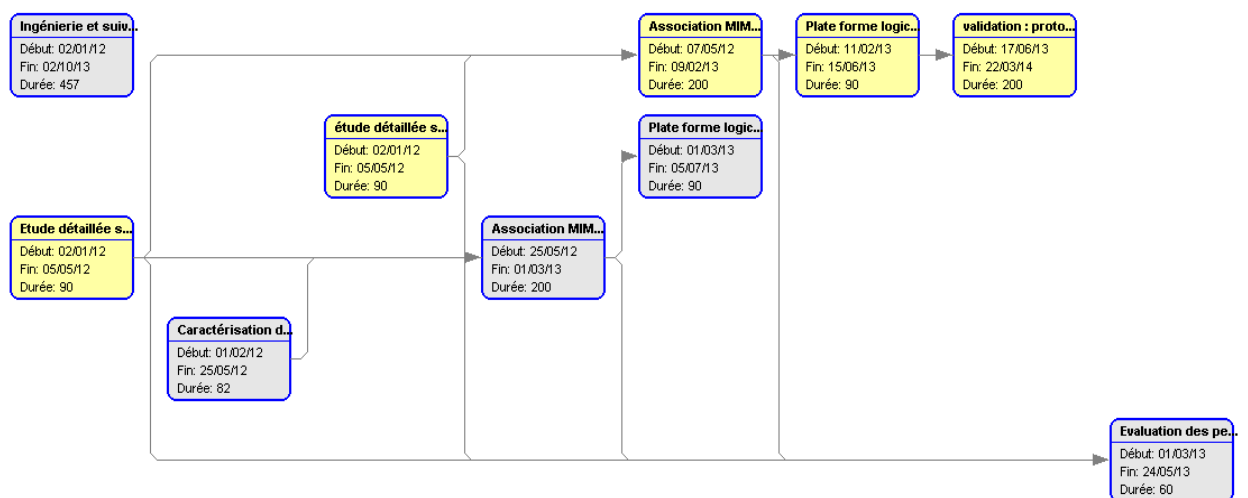


Diagramme de Gantt du projet de recherche



Planification des tâches du projet de recherche

Chapitre I - La technologie MIMO

I-1 - Introduction

Avec la croissance fulgurante de l'utilisation des systèmes de communications sans fil et la forte expansion de l'internet mobile dans les quatre coins du globe (réseaux 3G/4G), la majorité des travaux de recherche dans ce domaine se focalise sur le déploiement de nouvelles technologies permettant de rendre les réseaux sans fil de plus en plus performants. La conception des nouvelles générations de réseaux sans fil se trouve toujours confrontée au problème de limitation de capacité posé par une bande passante très étroite et une puissance d'émission souvent limitée. Afin de surmonter ces handicaps, une nouvelle technologie appelée communément MIMO (entrées multiples, sorties multiples) tente de tirer profit de la dimension spatiale, en installant plusieurs antennes au niveau des émetteurs et/ou des récepteurs [1-3]. Ainsi, l'emploi d'une telle technologie fournit une augmentation considérable des débits des liens de transmission (en gardant la même largeur de bande et la même puissance). La technologie MIMO est considérée comme l'une des technologies récentes les plus innovatrices dans le monde des communications sans fil et aussi comme une forte candidate pour la couche physique de la prochaine génération des réseaux sans fil (réseaux 4G et plus) [4,5].

I-2 - Présentation de la technologie MIMO

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) [5,6].

L'idée de base des systèmes MIMO est relativement simple : dans une bande de fréquence donnée, on transmet l'information en utilisant simultanément plusieurs antennes à l'émission et à la réception. En première approximation, le débit transmis dans cette bande de fréquence se trouve multiplié par le nombre d'antennes émettrices. La mise en œuvre concrète soulève par contre des problèmes complexes : en effet, tous les signaux transmis se mélangent, et il faut être capable de séparer les éléments du mélange. On doit alors faire appel, du côté du récepteur, à des méthodes sophistiquées de traitement du signal. L'utilisation de réseaux d'antennes en émission et en réception permet ainsi d'améliorer l'efficacité spectrale et/ou la fiabilité des transmissions numériques dans un environnement riche en diffuseurs [1-3,5].

Les applications envisagées par ces techniques MIMO sont les réseaux locaux sans fil (WLAN) qui seront sans doute les premiers à profiter de ces innovations technologiques. Les deux raisons principales sont, dans un premier temps, que l'environnement indoor est un milieu riche en diffuseurs permettant d'exploiter la dimension spatiale du système et, dans un deuxième temps, que le temps de cohérence du canal est typiquement grand devant un nombre important de périodes symboles permettant le retour d'information possible (CSI) [6].

Les points étudiés sont :

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

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

où h est le coefficient complexe du canal (supposé non dispersif ici). Ce coefficient peut être fixe (canal déterministe) ou aléatoire. ρ représente le SNR en réception. Si l'on déploie M antennes en réception, on obtient un système SIMO avec une capacité

donnée par :

$$C = \log_2\left(1 + \rho \sum_{i=1}^M |h_i|^2\right) \quad \text{b/s/Hz} \quad (\text{I-2})$$

où h_i représente le gain pour l'antenne i . La particularité de cette équation, c'est qu'une croissance linéaire de M 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, nous retrouvons un résultat classique : le SNR résultant est égal au produit du SNR monovoie et du nombre d'éléments [5,6].

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

$$C = \log_2\left(1 + \frac{\rho}{N} \sum_{i=1}^N |h_i|^2\right) \quad \text{b/s/Hz} \quad (\text{I-3})$$

Où la division par N sert à fixer la puissance totale en émission. Nous observons dans ce cas aussi une dépendance logarithmique du nombre d'antennes N . Si maintenant on veut profiter de la diversité en émission et en réception en même temps, on déploie N antennes en émission et M antennes en réception pour obtenir un système MIMO avec une capacité donnée par la formule:

$$C = \log_2\left[\det\left(I_M + \frac{\rho}{N} H H^H\right)\right] \quad \text{b/s/Hz} \quad (\text{I-4})$$

Où $(\rightarrow)^H$ représente la transposée – conjuguée et H est une matrice $M \times N$ qui caractérise le canal. La capacité donnée augmente linéairement avec $m = \min(M, N)$ contrairement à une croissance logarithmique du système MISO et SIMO. C'est le

résultat fondamental concernant la capacité des systèmes MIMO, devenus omniprésents (future norme WiFi, Wimax, 4G) [7-9].

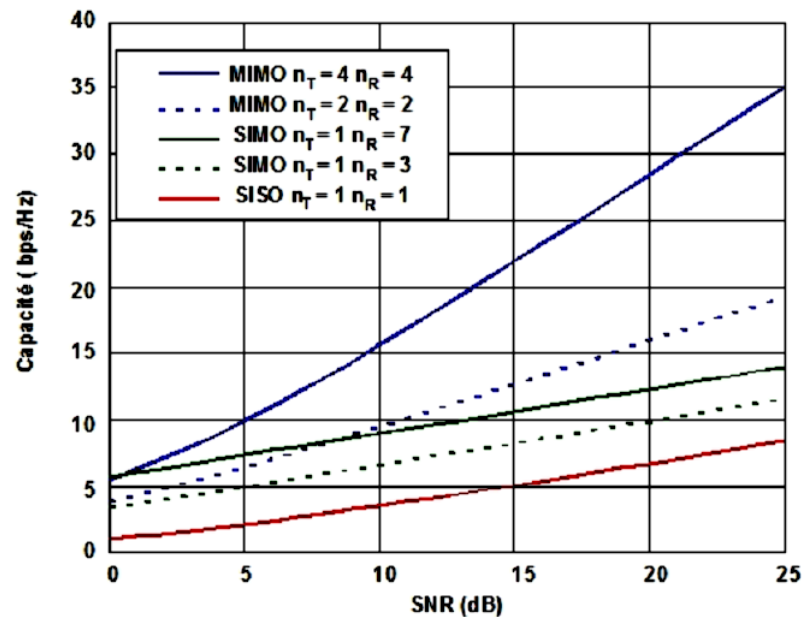


Figure I-1: Capacité des systèmes MIMO par rapport aux systèmes SISO et SIMO.

I-3 - 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 [3-5].

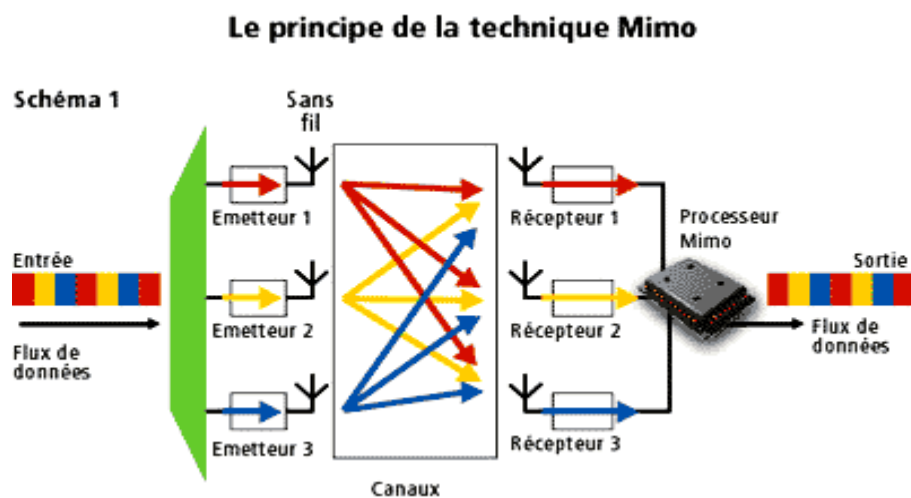


Figure I-2 : Principe de la technologie MIMO.

Le flux est divisé en différents flux de même fréquence qui sont envoyés à travers 3 émetteurs à 3 récepteurs. L'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.

Alors que ces réflexions pourraient être considérées comme mauvaises, la technologie MIMO profite de ces différents canaux pour améliorer la rapidité de transmission des données. On peut considérer trois catégories de MIMO :

- **la diversité spatiale MIMO** : 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 décorrélés 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 décorrélés. 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 3 x 3 pour faire de la diversité MIMO [3,10].
- **le MIMO - Beamforming (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 beamforming permettent à la fois d'étendre une couverture radio (d'une station de base ou d'un point d'accès par exemple) et de limiter les interférences entre utilisateurs et la pollution électromagnétique environnante (en ciblant le récepteur visé).

I-4 - Canal MIMO et modèles de signaux

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 [3,4].

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.

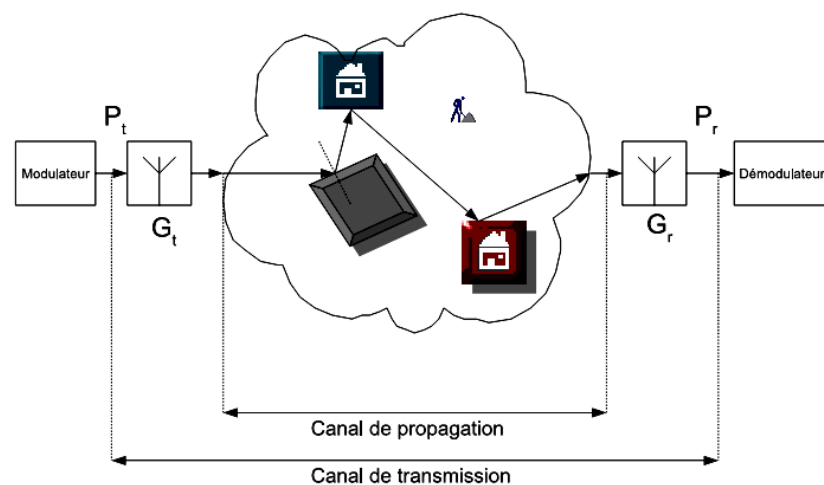


Figure I-3 : Représentation du canal radio-mobilité.

Les phénomènes se produisant dans le canal de propagation et causant des variations de la puissance reçue, sont communément répartis en phénomènes de deux sortes : les phénomènes à grande échelle et les phénomènes à petite échelle [11].

- **Les phénomènes à grande échelle**

Les phénomènes à grande échelle correspondent à deux phénomènes bien particuliers

- **L'affaiblissement en espace libre** : L'espace libre est défini par la visibilité directe et par le dégagement de l'ellipsoïde de Fresnel. Dans ces conditions de propagation, les pertes de puissance entre puissance émise et puissance reçue sont exprimées par la relation du bilan de liaison. Cette relation montre que la puissance reçue est inversement proportionnelle au carré de la distance séparant émetteur et récepteur.
- **L'effet de masquage** : L'effet de masquage est une perte de puissance au niveau du terminal récepteur, et se produit lorsqu'un des deux terminaux se déplace et, ce faisant, provoque la rupture de la visibilité directe entre eux

deux (le terminal peut être masqué par un bâtiment). Une partie de l'onde transmise arrive tout de même au terminal de réception, mais la perte de puissance de l'onde est systématique. Ce phénomène est lié à la topologie du canal (les obstacles).

- **Les phénomènes à petite échelle**

En observant la puissance reçue par un terminal lors d'un petit déplacement, quand la perte en puissance due au masquage et à l'affaiblissement en espace libre est constante, on remarque encore une fluctuation de la puissance, conséquence des phénomènes à petite échelle. Les phénomènes à grande échelle tiennent compte de l'existence d'un seul trajet, direct ou non, pour évaluer la puissance reçue au niveau du récepteur. En réalité, une multitude de trajets est créée par le canal au gré des phénomènes de réflexion, réfraction, diffraction et diffusion de l'onde. Une partie des multiples trajets se recombine au niveau du terminal récepteur et les trajets avec leur amplitude et leurs phases propres peuvent se recombinaison de façon constructive ou destructive, améliorant ou dégradant le bilan de liaison. C'est ce phénomène que l'on qualifie d'évanouissements à petite échelle. De plus, si aucun mouvement n'est présent dans le canal (le canal est invariant en temps), alors la recombinaison génère un affaiblissement ou un gain constant dans le temps. Si à l'inverse, des mouvements existent (le canal évolue dans le temps par le mouvement de l'émetteur, du récepteur, ou des obstacles mobiles), alors l'affaiblissement (ou le gain) varie selon la nouvelle donne des multi-trajets. Ce phénomène est donc lié à la topologie du canal et varie avec les déplacements des terminaux ou des éléments du canal.

- **Les bruits**

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

- **Caractérisation du canal**

La caractérisation du canal consiste à déterminer sa capacité à varier dans différents domaines (temporel, fréquentiel, spatial) [10,11].

L'expression de la réponse impulsionnelle du canal $\mathbf{h}(\boldsymbol{\tau}, \mathbf{t})$ est définie comme la réponse du canal à l'instant ($\mathbf{t}$) suite à une impulsion survenue à l'instant ($\mathbf{t} - \boldsymbol{\tau}$). Cette réponse à l'instant $\mathbf{t}$ est composée de $\mathbf{P}$ trajets arrivant chacun avec une amplitude $\beta_p(\mathbf{t})$, une phase $\theta_p(\mathbf{t})$ et un retard $\tau_p(\mathbf{t})$.

$$h(\tau, t) = \sum_{p=1}^P \beta_p(t) \cdot e^{j \cdot \theta_p(t)} \cdot \delta(\tau - \tau_p(t)) \quad (\text{I-5})$$

a) La dispersion des retards

L'étalement des retards est défini comme la différence $\tau = \tau_p - \tau_1$. Cet étalement peut causer de l'interférence entre-symboles (IES) si le temps-symbole d'un système est trop court et constitue donc un élément important de caractérisation du canal. Les réalisations du canal produisent des étalements différents, ce qui définit le retard moyen $\tau = E\{\tau\}$, et la variance des retards $\sigma_\tau^2 = E\{(\tau - E\{\tau\})^2\}$ (σ_τ est appelé la dispersion des retards). Le canal multi-trajets et sa dispersion des retards σ_τ permettent de définir la bande de cohérence B_c , bande de fréquence où les atténuations sont corrélées (au dessus d'un seuil de corrélation).

b) La dispersion fréquentielle

La notion de variation temporelle du canal fait partie intégrante de sa caractérisation. Cette variation temporelle résulte de déplacements (terminaux Tx et Rx, obstacles) qui modifient les propriétés de l'onde. Un déplacement des terminaux dans le canal à une vitesse v créant un angle d'incidence α avec le trajet direct de l'onde entre les deux terminaux provoque l'apparition de l'effet Doppler, c'est à dire d'un décalage fréquentiel de l'onde reçue. L'onde résultante a une fréquence : $f_r = f_0 + f_d$ avec f_0 la fréquence porteuse originale, et

$f_d = \frac{v \cdot f_0}{c} \cdot \cos(\alpha)$ la fréquence Doppler de décalage. La fréquence Doppler f_d est comprise dans $[-f_{dmax}; +f_{dmax}]$, avec $f_{dmax} = \frac{v \cdot f_0}{c}$. On définit le temps de cohérence τ_c comme la durée pendant laquelle les évanouissements temporels du canal sont corrélés (au dessus d'un seuil de corrélation). Il est inversement proportionnel à la fréquence Doppler maximale f_{dmax} . Le temps de cohérence est

donné par : $\tau_c \propto \frac{1}{f_{dmax}}$

Pour considérer le canal constant, le temps-symbole du système doit être très inférieur au temps de cohérence du canal ($T_s \ll \tau_c$).

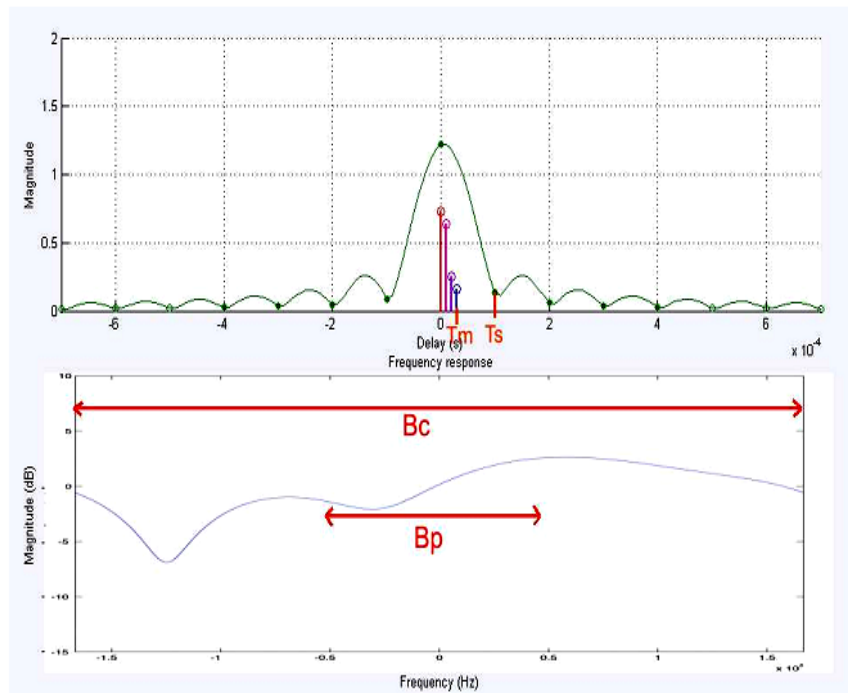


Figure I-4 : Réponse impulsionnelle et fréquentielle d'un canal plat en fréquence.

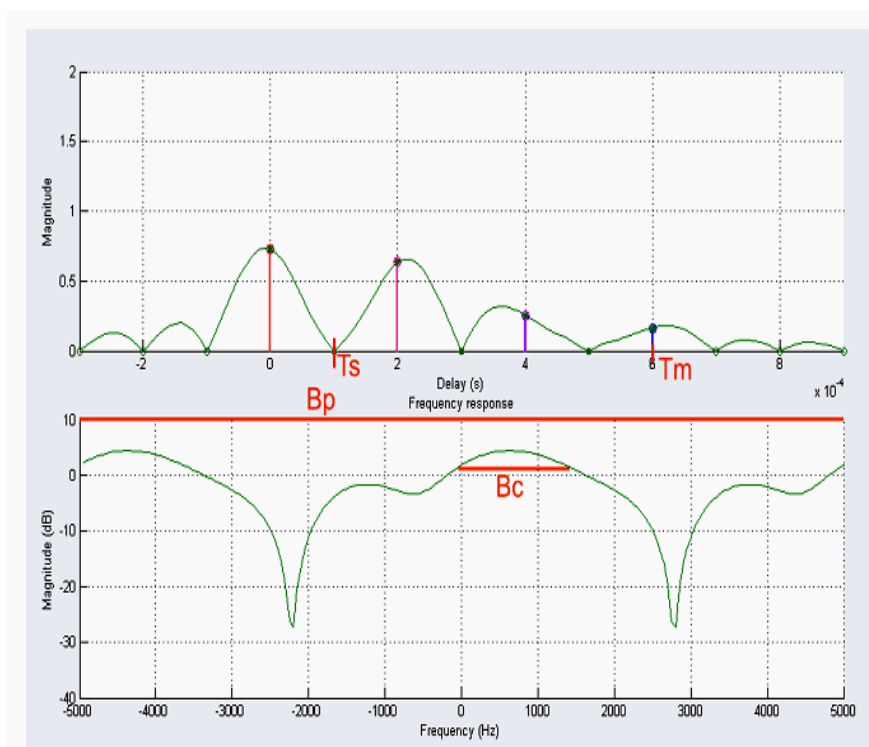


Figure I-5 : Réponse impulsionnelle et fréquentielle d'un canal sélectif en fréquence.

c) La dispersion angulaire

Les signaux sont émis par les antennes avec des angles de départ. En réception, les angles d'arrivée déterminent l'incidence des rayons sur l'antenne. L'étude de la dispersion de ces angles montre une corrélation entre le placement des antennes d'émission et la corrélation des signaux en réception [11].

• Modélisation du canal de propagation

Pour intégrer le modèle dans des simulations, la réponse impulsionnelle $h(\tau, t)$ est utilisée comme celle d'un filtre FIR (finite 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'entrée $x(t)$ et la réponse impulsionnelle $h(t)$:

$$y(t) = [x * h](t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \cdot h(t - \tau, t) d\tau. \quad (I-6)$$

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 μ_b nulle et sa variance σ_b^2 .

$$p_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_b^2}} \cdot \exp \left[-\frac{(x - \mu_b)^2}{2\sigma_b^2} \right] \quad (I-7)$$

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 [4,10].

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

$$p_B(\beta) = \frac{\beta}{\sigma^2} \cdot \exp \left[-\frac{\beta^2}{2\sigma^2} \right], \quad \forall \beta \geq 0. \quad (I-8)$$

I-5 - 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 affluantes. 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 [3-5].

Considérons un système MIMO avec N_t émetteurs et N_r récepteurs.

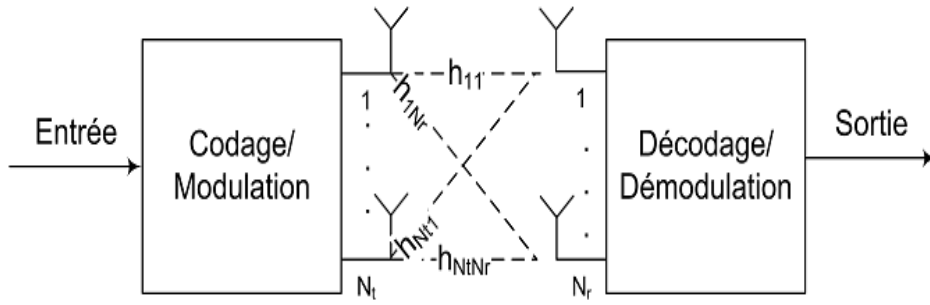


Figure I-6 : Schéma d'un système de transmission MIMO.

Le canal de transmission est supposé ici non-sélectif en temps et en fréquence, ainsi le trajet entre la m^e 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^e antenne s'écrit alors :

$$y_n(k) = \sum_{m=1}^{N_t} h_{nm} s_m(k) + b_n(k) \quad (\text{I-9})$$

Où b_n représente un bruit additif.

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

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{H}\mathbf{s}(k) + \mathbf{b}(k)$$

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

$$\mathbf{s} = (s_1 \dots s_{N_t})^T, \quad \mathbf{b} = (b_1 \dots b_{N_r})^T \quad (\text{I-10})$$

Les points étudiés sont :

I-5-1 - 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 N_t 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 Wolniansky 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 [3-4,12].

- **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 $(b_1, \dots, b_k)$ les bits d'information à transmettre et $(c^1_1, \dots, c^1_k)$ la 1^e chaîne de symboles codés par le 1^e codeur est transmise sur la 1^e antenne.

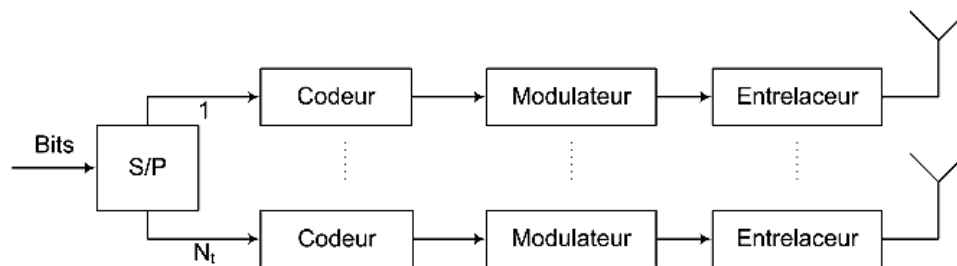


Figure I-7 : Architecture d'un émetteur H-BLAST.

$$(b_1, \dots, b_k) \xrightarrow{\text{Démultiplexeur}} \begin{pmatrix} b_1 & b_{N_t+1} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{N_t} & b_{2N_t} & \dots \end{pmatrix} \begin{matrix} \xrightarrow{1^e \text{ codeur}} \\ \vdots \\ \xrightarrow{N_t^e \text{ codeur}} \end{matrix} \begin{pmatrix} c^1_1 & c^1_2 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ c^{N_t}_1 & c^{N_t}_2 & \dots \end{pmatrix}$$

Figure I-8 : Processus d'un émetteur H-BLAST

- **Architecture V-BLAST**

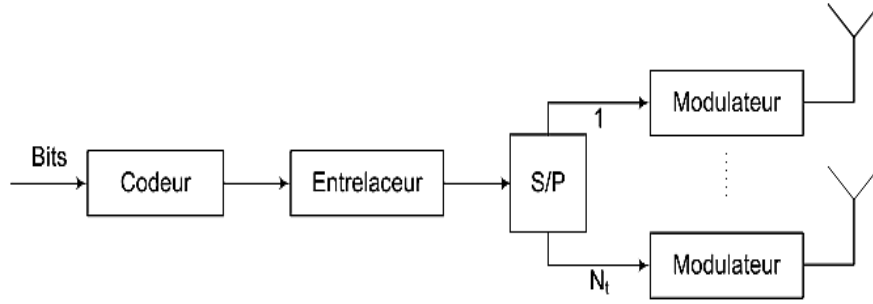


Figure I-9 : Architecture d'un émetteur V-BLAST.

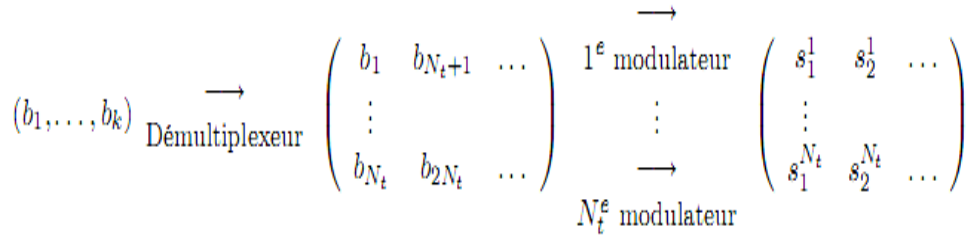


Figure I-10 : Processus d'un émetteur V-BLAST.

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 [12,14].

- **Architecture D-BLAST**

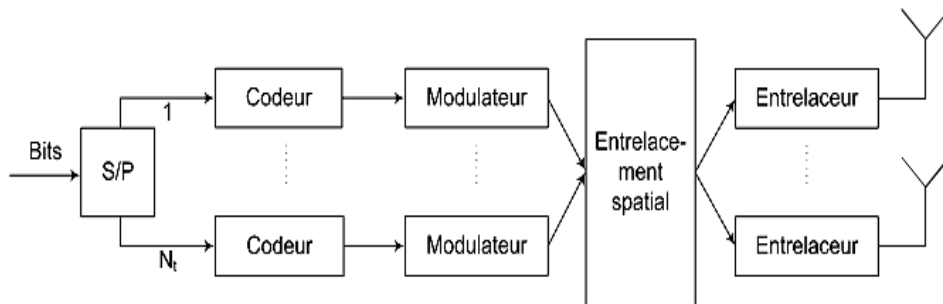


Figure I-11 : Architecture d'un émetteur D-BLAST.

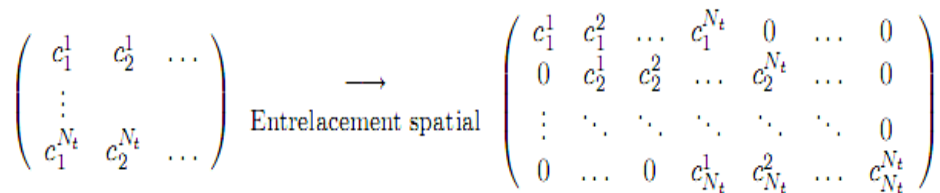


Figure I-12 : Processus d'un émetteur D-BLAST.

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 N_t 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 [12,13].

I-5-2 - 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 recombinaison 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 N_t 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 N_t 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 N_t . La répartition de la puissance sur N_t antennes à l'émission est également pénalisante. Cependant, l'ordre de diversité à nombre d'antennes égal est exactement le même [3-7].

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. 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.

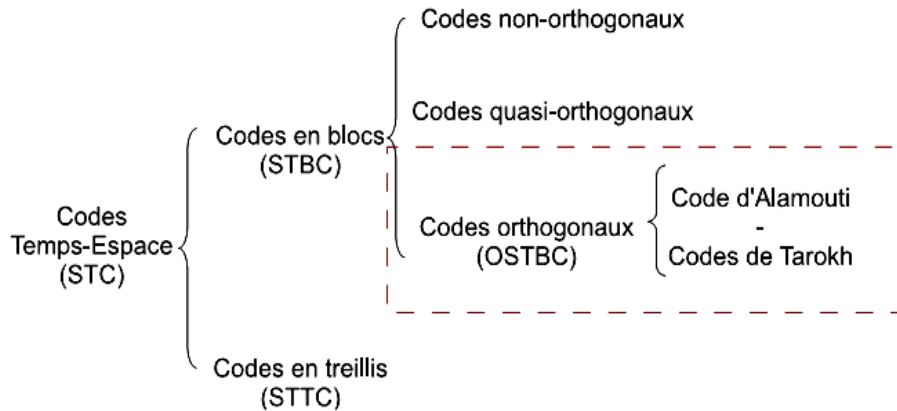


Figure I-13 : Les familles de codes temps-espace.

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.

- **Code Alamouti**

En cherchant à résoudre le problème de la complexité de décodage pour STTC, Alamouti a découvert une technique de transmission utilisant deux antennes à l'émission et permettant un décodage au sens du maximum de vraisemblance linéaire. La figure suivante montre le principe de fonctionnement de cette technique de transmission [15]:

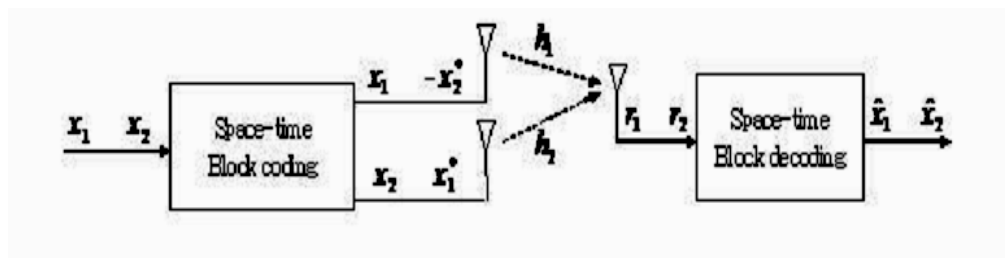


Figure I-14 : Schéma d'Alamouti.

L'estimation des mots code x_1 et x_2 est aisée puisque :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} h_2 & h_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} &= (|h_2|^2 + |h_1|^2) x_1 + n_1 \rightarrow \hat{x}_1 \\ \begin{bmatrix} -h_1 & h_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} &= (|h_2|^2 + |h_1|^2) x_2 + n_2 \rightarrow \hat{x}_2 \end{aligned} \quad (\text{I-11})$$

où $r_1 = h_1 x_1 + h_2 x_2$ et $r_2 = h_1 (-x_2) + h_2 x_1$

Les modulations codées orthogonales maximisent le gain de diversité spatiale (donc de robustesse) mais n'offrent pas de gain de codage. Elles sont parfaitement adaptées aux applications où la robustesse est recherchée au détriment du débit.

I-6 - 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 - Association MIMO - OFDM

II-1 - Introduction

Les techniques multi-antennes MIMO-OFDM sont pressenties pour les futurs systèmes de téléphonie mobile en raison de leur robustesse et de leur efficacité spectrale. 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. Ce travail répond à une problématique, initiée dans le cadre de notre projet de recherche sur l'intégration de la technologie MIMO dans les futures générations de réseaux locaux. D'un point de vue théorique, nous allons faire une synthèse bibliographique étendue sur cette technologie innovante. Nous présentons un état de l'art des techniques et architectures MIMO-OFDM utilisées tout en mettant l'accent sur l'interaction propagation-système.

II-2 - De la mono-porteuse aux multi-porteuses (OFDM)

Au cours des vingt dernières années de nombreuses solutions de communications numériques ont vu le jour. Les traditionnels systèmes de transmissions mono-porteuse, pour lesquels les informations à transmettre sont émises successivement au cours du temps et modulés autour d'une fréquence porteuse, ont été mis en concurrence avec de nouvelles approches dans lesquelles les informations sont transmises simultanément sur plusieurs porteuses. Des nouvelles approches dites multi-porteuses ont ainsi été imaginées et la plus célèbre d'entre elles est l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex). Actuellement, la plupart des systèmes de transmission ont choisi cette solution de transmission [16-19].

Les raisons de cette vague de fond pour l'OFDM sont nombreuses, en particulier, trois points importants sont à mentionner. Il s'agit, en l'occurrence, de la facilité d'adaptation au canal, de la lutte efficace contre les multi-trajets au moyen du préfixe cyclique et enfin de la simplicité matérielle du modulateur et du démodulateur grâce à la Transformée de Fourier Rapide.

L'OFDM consiste à diviser un flux de symboles à la cadence $\frac{1}{T}$ en N flux de symboles à la cadence $\frac{1}{NT}$. N symboles sont ainsi transmis en parallèle sur une durée NT . La bande passante est donc divisée en N sous bandes dont la transmittance est presque constante, ce qui explique la robustesse de cette modulation en présence de canaux sélectifs en fréquence [18].

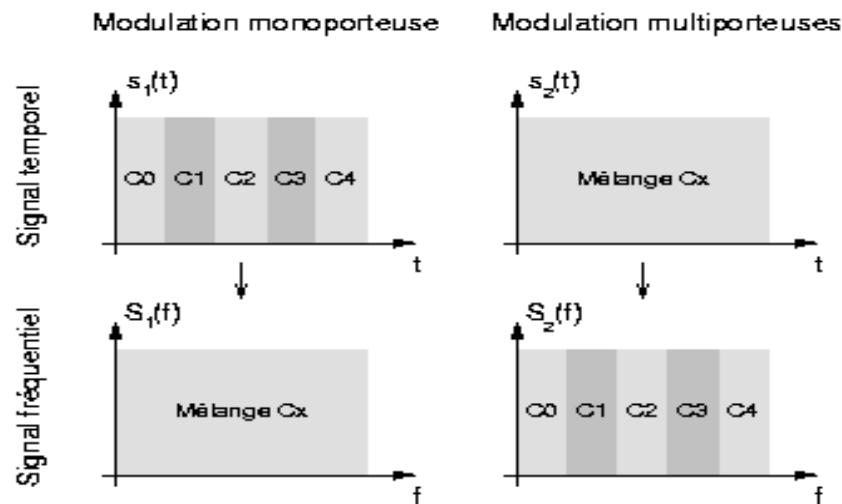


Figure II-1 - Les systèmes multi-porteuses et mono-porteuses.

Le principe de la modulation OFDM consiste à répartir aléatoirement des symboles de durée T_u (temps symbole utile) sur différentes porteuses modulées en QPSK ou QAM (selon le compromis robustesse / débit).

L'OFDM découpe le canal en cellule selon les axes de temps et de fréquence. Le canal est alors constitué d'une suite de sous bandes de fréquence et d'une suite de segments temporels. A chaque cellule fréquence/temps est attribuée une porteuse dédiée. L'information à transporter est donc répartie sur l'ensemble de ces porteuses, modulée chacune à faible débit par une modulation du type BPSK, QPSK ou QAM.

Un symbole OFDM comprend l'ensemble des informations contenues dans l'ensemble des porteuses à un instant t . Chacune des porteuses est orthogonale à la précédente [18,19].

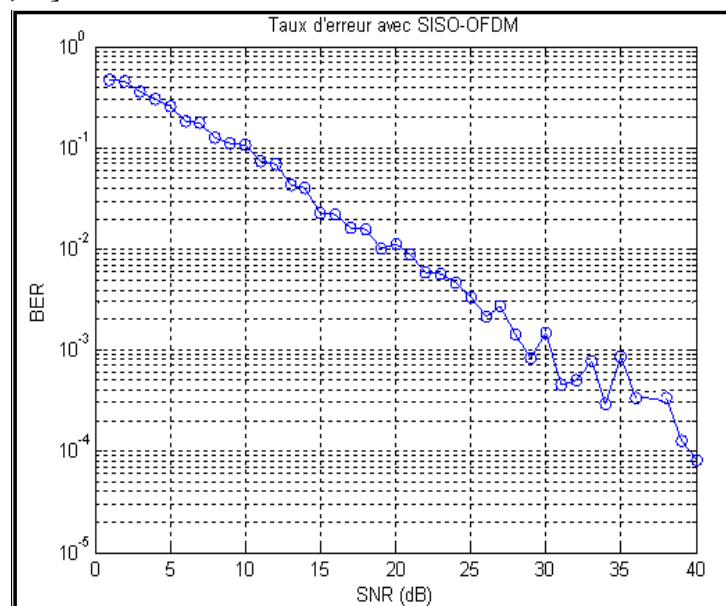


Figure II-2 : Taux d'erreur par symbole avec SISO-OFDM.

II-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 [20-22].

La modulation OFDM a pour principe de répartir le flux binaire à haut débit sur un ensemble de P sous-porteuses transmettant chacune des débits réduits. La figure suivante 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 [23].

En réception, les opérations duales suivantes sont effectuées :

- Conversion parallèle série.
- Conversion série parallèle de taille P afin d'obtenir des blocs de $(P + \Delta)$ symboles.
- Suppression de l'intervalle de garde correspondant aux Δ premiers échantillons du bloc.
- Transformée de Fourier directe de taille P .
- Conversion parallèle série.

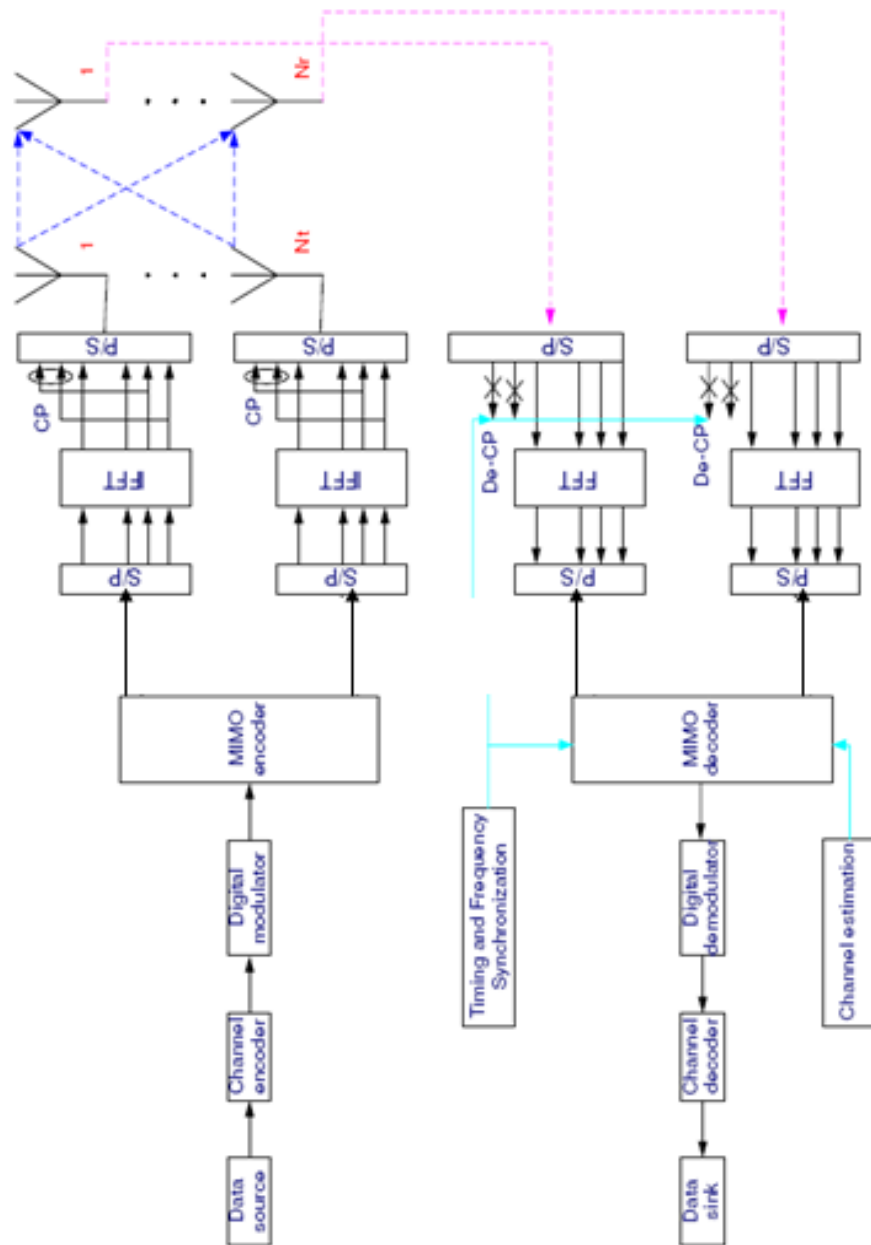


Figure II-3 : Model du système MIMO-OFDM ($N_t \times N_r$).

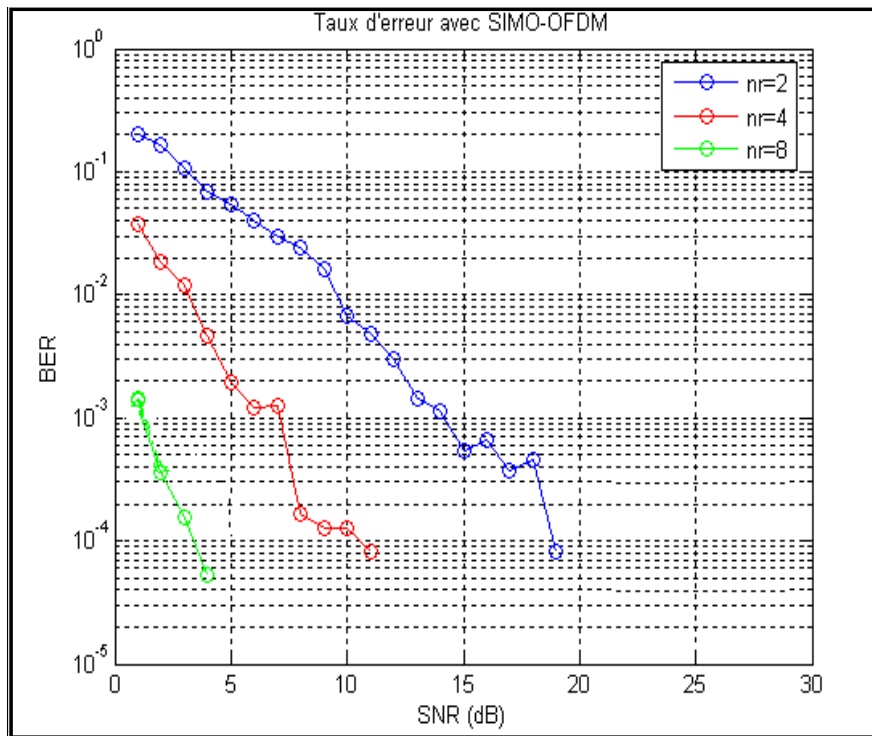


Figure II-4 : Taux d'erreur par symbole pour un canal SIMO-OFDM.

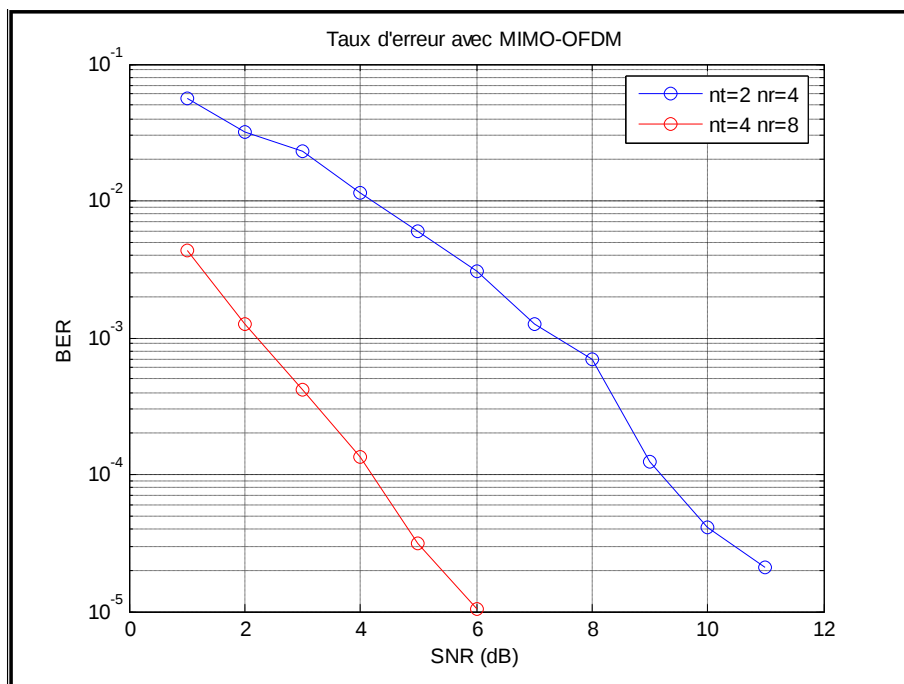


Figure II-5 : Taux d'erreur par symbole pour un canal MIMO-OFDM.

Les figures II-4 et II-5 nous montrent clairement l'intérêt de l'association MIMO-OFDM dans la réduction du taux d'erreur et ainsi l'amélioration de la qualité de transmission.

II-3-1 - Codage VBLAST-OFDM

Le principe du codage VBLAST est de transmettre chaque symbole N_t fois (antennes de transmission), une fois par antenne et une fois par intervalle de temps. La combinaison de l'OFDM et le codage VBLAST peut supprimer l'interférence inter-symbole dans des canaux sélectifs en fréquence. La figure suivante montre un schéma fonctionnel d'un émetteur VBLAST-OFDM [22-24].

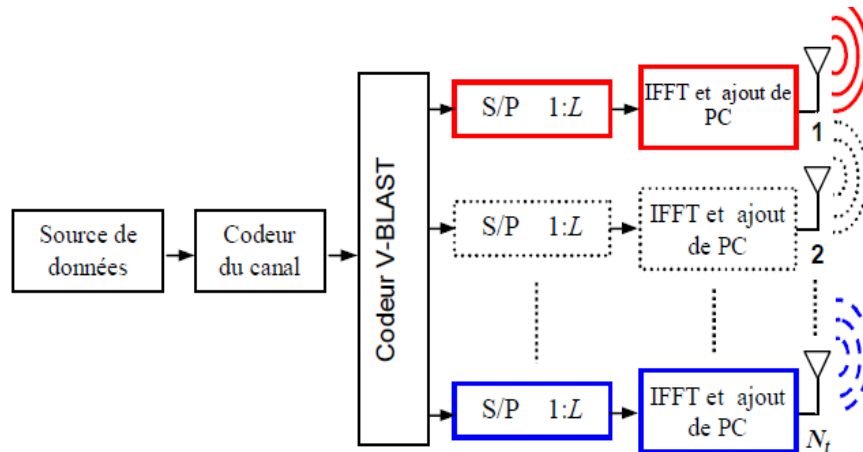


Figure II-6 : Emetteur VBLAST-OFDM.

II-3-2 - Décodage VBLAST-OFDM

La figure suivante (Figure II-7) montre le schéma fonctionnel d'un récepteur V-BLAST-OFDM. Chaque antenne de réception reçoit un signal pour chacun des L sous-canaux. Après que le préfixe cyclique est enlevé, chaque signal reçu est injecté dans un bloc d'opération FFT pour la démodulation. Le signal reçu après démodulation, à l'antenne de réception j pour le sous-canal l , est donné par :

$$y_{j,l} = \sum_{i=1}^{N_t} h_{j,i,l} x_{i,l} + n_{j,l} \quad l = 1, \dots, L \quad (\text{II-1})$$

Où le $h_{j,i,l}$ est le gain complexe normal de chemin de l'antenne de transmission i à l'antenne de réception j à la fréquence l , $x_{i,l}$ est le symbole OFDM transmis de l'antenne i à la fréquence l , et $n_{j,l}$ sont les échantillons gaussiens indépendants du bruit.

Les sorties des blocs FFT sont passées à travers les L détecteurs V-BLAST, chacun avec N_r entrées, et N_t sorties. Les sorties des détecteurs V-BLAST sont converties de sous-flux parallèles en un seul flux série de données. Finalement, les données sont décodées par le décodeur de canal.

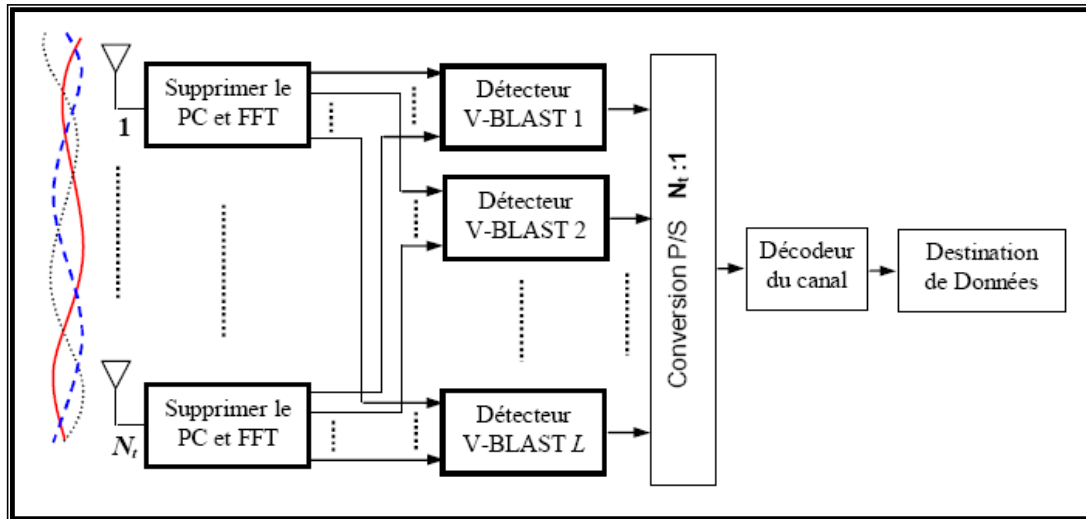


Figure II-7 : Récepteur VBLAST-OFDM

Pour un canal sélectif en fréquence quasi-statique, les systèmes V-BLAST-OFDM peuvent donner la même performance qu'un système V-BLAST seul pour un canal non sélectif en fréquence. Pour un grand nombre de sous porteuses, l'OFDM divise un canal sélectif en fréquence en des canaux de Rayleigh plats complètement indépendants. L'augmentation du nombre de sous porteuses est équivalente à l'augmentation de la profondeur d'entrelacement dans un canal non sélectif en fréquence. L'utilisation de la modulation OFDM pour un canal non sélectif en fréquence ne rapporte aucun changement de performance.

II-3-3 - Application des codes espace-temps aux systèmes MIMO-OFDM

Les codes espace-temps tirent profit de la diversité spatiale, mais ne sont pas conçus pour exploiter celle des canaux sélectifs en fréquence. Pourtant, les futurs systèmes de communications poussés par les besoins en débit, utilisent des bandes de fréquence de plus en plus importantes, où le canal est alors sélectif en fréquence. Une façon d'arriver à exploiter la diversité fréquentielle dans le contexte MIMO est de recourir à l'OFDM et de le combiner au codage temps-espace. Suivant la nature du codage, plusieurs associations sont réalisables pour une présentation assez complète des combinaisons, que l'on regroupe communément sous le terme de MIMO-OFDM. Le choix du code est important car le code détermine directement les performances du système [25].

La figure suivante montre comment se positionnent les blocs STBC et OFDM dans le cas MIMO. D'abord le bloc STBC code des symboles selon une matrice de codage déterminée, puis l'OFDM module ces données codées. Le bloc STBC dispose de N_t sorties (car N_t antennes d'émission), donc le nombre de blocs OFDM est multiplié par N_t .

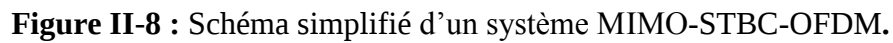


Diagram illustrating STBC transmission with two antennas. The input symbols are arranged in a 2x2 matrix:

s_2	s_1
s_2	s_1

The matrix is processed by the **Codeur STBC** block, which outputs to two **OFDM** blocks for **Ant. 1** and **Ant. 2**.

The resulting signals are shown in the time-frequency plots:

- Ant. 1:** Transmits s_2 in the first OFDM symbol and s_1 in the second OFDM symbol.
- Ant. 2:** Transmits s_1 in the first OFDM symbol and s_2 in the second OFDM symbol.

Legend:

- s_1 (orange square): 1^{er} symbole
- s_1 (orange square with circle): 1^{er} symbole codé
- s_2 (yellow square): 2nd symbole
- s_2 (yellow square with circle): 2nd symbole codé

36

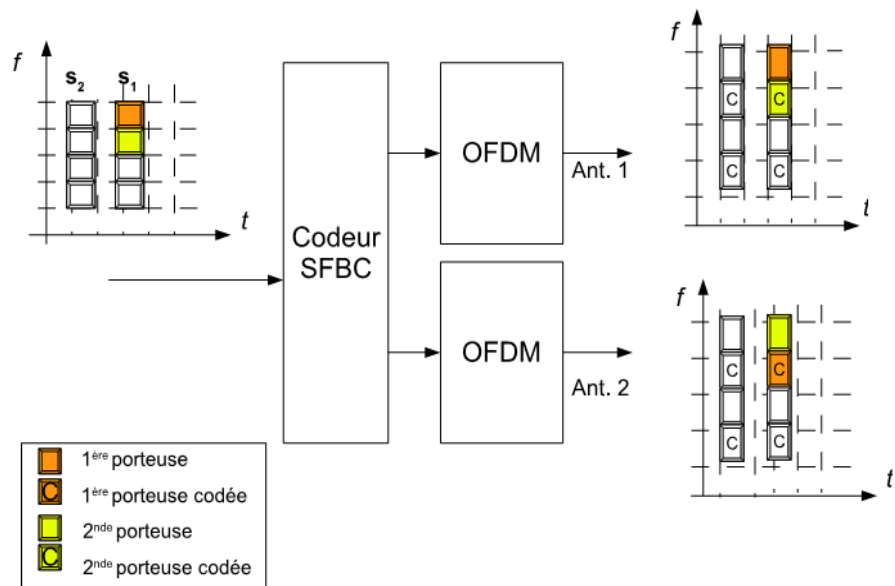


Figure II-10 : Symboles OFDM ($N_c = 4$) avec codage SFBC ($N_t = 2$).

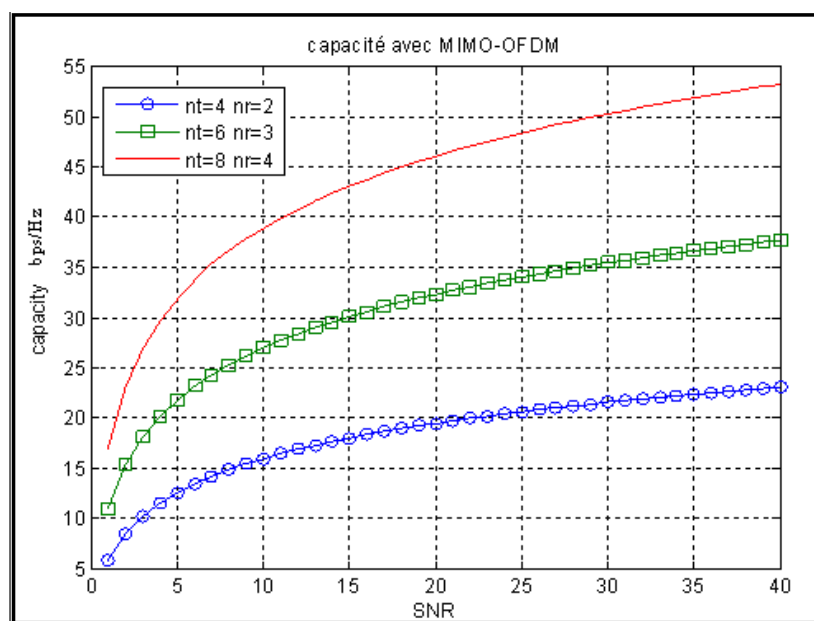


Figure II-11 : Capacité du système MIMO-STBC-OFDM.

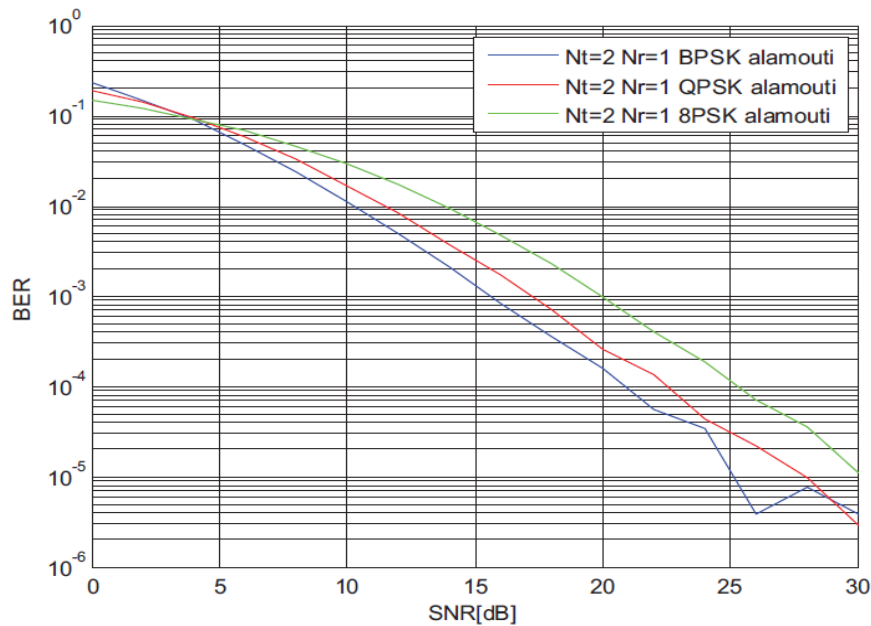


Figure II-12 : Taux d'erreur binaire pour un système MIMO- OFDM code Alamouti

Le taux d'erreur BER est réduit en fonction du nombre d'antennes utilisées en émission et réception et selon le type de modulation.

II-4 - Etude d'un réseau local sans fil à base de MIMO-OFDM

Dans cette partie, nous allons nous intéresser aux réseaux locaux sans fil et aux techniques de transmission haut-débit.

Un réseau sans fil (en anglais wireless network) est un réseau dans lequel deux terminaux ou plus peuvent communiquer sans liaison filaire. Grâce aux réseaux sans fil, un utilisateur a la possibilité de rester connecté tout en se déplaçant dans un périmètre géographique plus ou moins étendu. Cette définition large, nous amène à considérer plusieurs types de réseaux sans fil.

Chaque technologie se distingue par les bandes de fréquence d'émission utilisées, la nature des services offerts et donc des débits et la portée des transmissions.

La figure suivante illustre les quatre catégories de réseaux, les réseaux WPAN (Wireless Personal Area Network), les réseaux WLAN (Wireless Local Area Networks), les réseaux WMAN (Wireless Metropolitan Area Networks) et les réseaux WWAN (Wireless Wide Area Networks) [26-29].

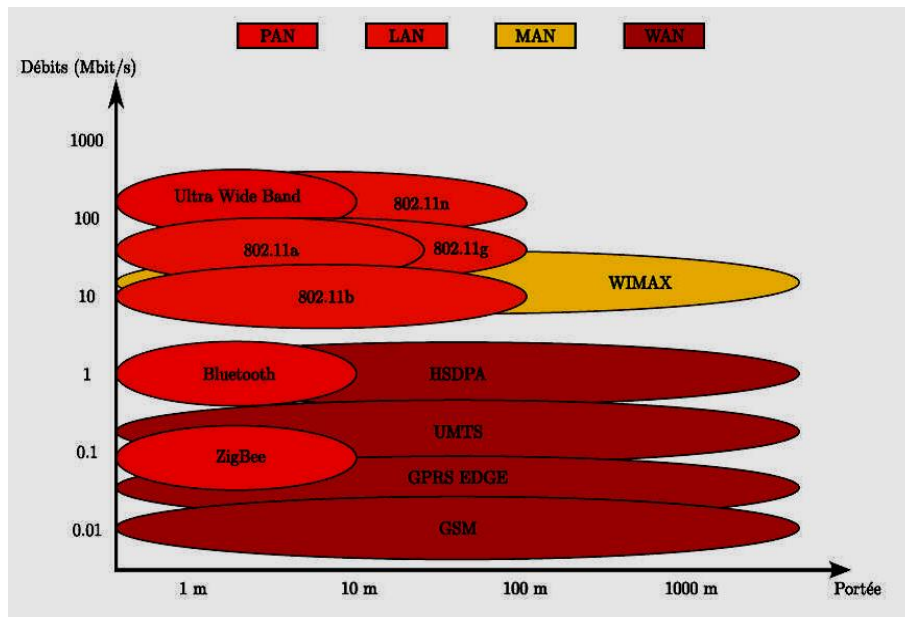


Figure II-12 : Débit et portée des principaux standards de réseaux sans fil.

- **le WIFI (Domaine d'application) :** Etude de la couche physique du standard IEEE.802.11.n

La norme 802.11 utilise deux types de couches basses du modèle OSI qui sont :

- La couche **physique** (PHY) qui est la première couche de ce modèle.
- La couche **liaison de données** qui gère les communications afin d'assurer une liaison sans fil utilisant des ondes radioélectriques. Cette dernière est composée de deux sous couches à savoir : la couche de contrôle de la liaison logique appelée aussi Logical Link Control (LLC) et la couche de contrôle d'accès au support dite Media Access Control (MAC) [27-29].

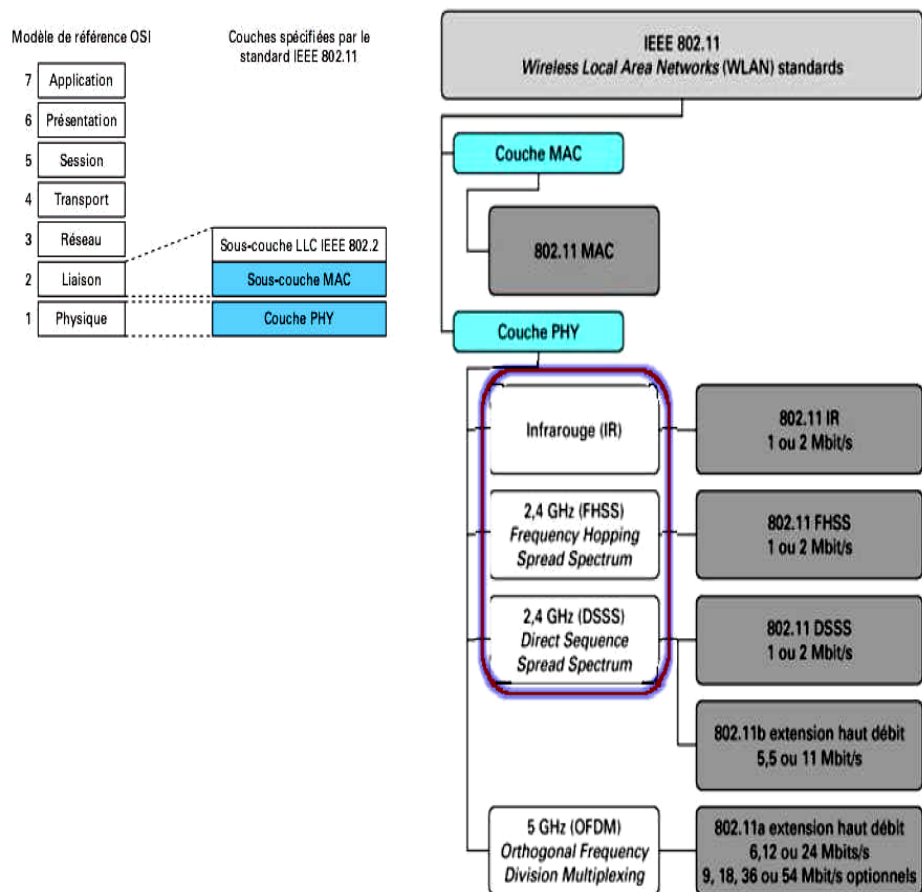


Figure II-13 : Architecture logique IEEE 802.11 (WIFI).

Les couches physiques qui ont été définies à l'heure actuelle sont : IR (Infra Red), FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum), DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) et OFDM.

Les couches FHSS, DSSS ont été proposées pour la bande de fréquence des 900 MHz et la bande de fréquence des 2.4 GHz. Ces deux couches physiques proposent des débits d'émission de 1 Mbits/s et 2 Mbits/s. Le cas qui nous intéresse est l'OFDM, La répartition des canaux dans la bande ISM et 5GHz est illustrée ci-dessous :

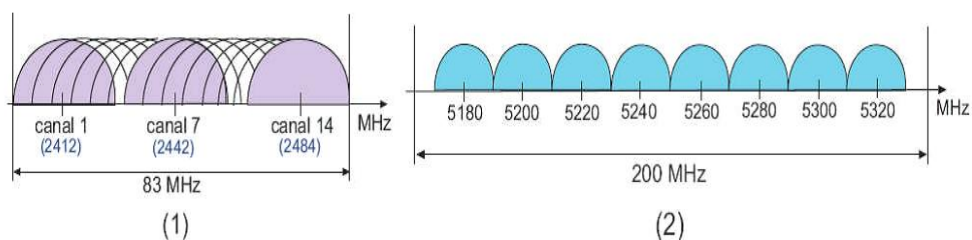


Figure II-14 : Répartition des canaux (1) dans la bande ISM, (2) dans la bande 5GHz.

■ La couche OFDM

Avec cette couche physique, un signal série haut débit est divisé en plusieurs sous signaux à débit plus faible et les transmet simultanément sur des fréquences porteuses. Le fait d'envoyer des symboles plus longs est un moyen de lutter contre le phénomène de chemins. En effet, plus la distance de propagation d'une onde est importante, plus il y a de chance qu'elle se réfléchisse ou qu'elle diffracte sur des obstacles. Au niveau du récepteur, les différents chemins créés par le trajet de l'onde émise vont arriver avec des retards de phases différents puisque la distance parcourue n'est pas la même. Il en résulte un étalement temporel du canal qui rend la démodulation du signal plus complexe.

• Simulation d'un système MIMO -WiFi

Les principales caractéristiques du système MIMO-WiFi sont :

- Nombre de sous porteuses : 64 dont seules 52 sont utilisées (les 12 porteuses externes sont mises à 0 pour réduire l'interférence entre canaux adjacents).
- Durée symbole OFDM : 3,2 ms (312.5 kHz entre porteuses).
- Modulation : QPSK.
- Préfixe cyclique (étalement max 800 ns) : 1/4 (durée totale symbole = 4 ms).
- Nombre de pilotes : 4
- Nombre d'antennes émettrices et réceptrices : 3

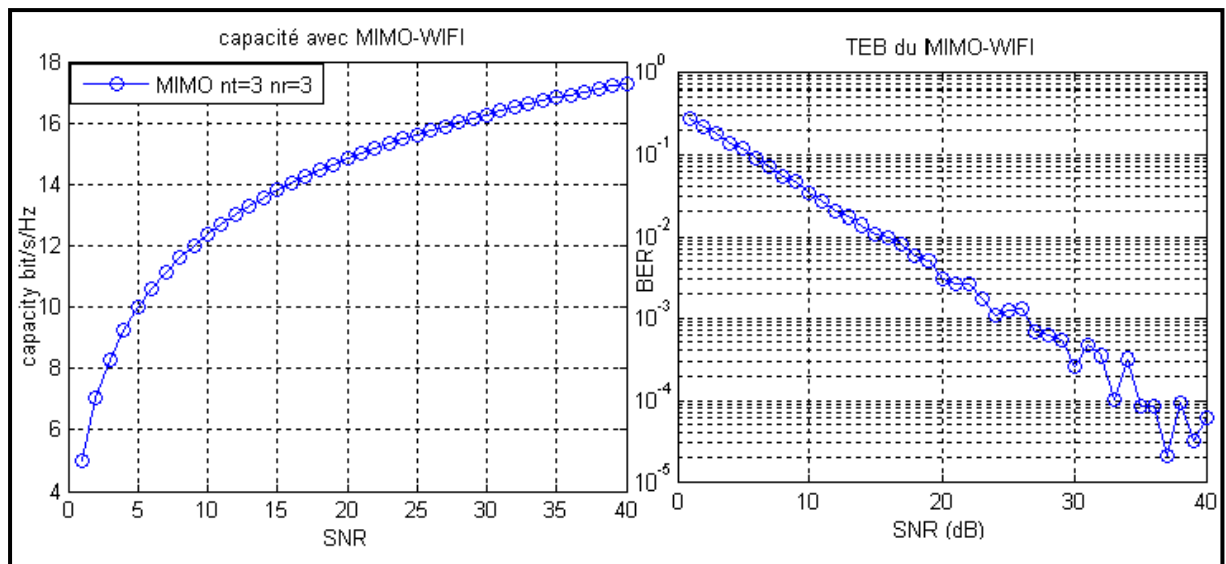


Figure II-15 : Simulation d'un système MIMO-WIFI.

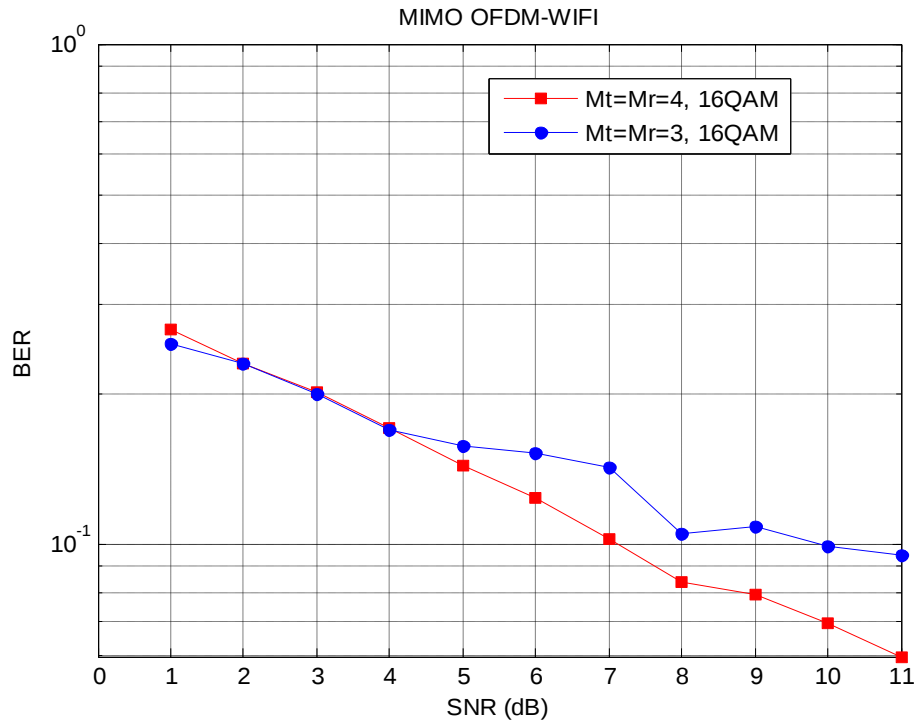


Figure II-16 : MIMO- -OFDM avec 802.11n.

■ Antennes intelligentes appliquées à l'OFDM (LMS-SIMO-OFDM)

La généralisation aux canaux sélectifs en fréquence des antennes intelligentes développées initialement pour les canaux à évanouissements plats n'est pas triviale et peut s'avérer même délicate. Une autre approche est de rendre au préalable le canal non sélectif en fréquence afin de pouvoir réutiliser les antennes intelligentes introduites dans les sections précédentes. Une méthode pratique pour s'affranchir des interférences inter symboles (ISI) est la modulation OFDM [2-4].

Dans cette partie, nous proposons l'algorithme d'adaptation pour le système OFDM pour supprimer les interférences inter symboles et les interférences dans l'environnement multi-trajets dans le but d'augmenter le débit et la qualité de transmission. Les canaux multi-trajets utilisés, sont le canal de Rice et de Rayleigh, ils sont comparés au canal gaussien. Pour cela, il existe deux approches : l'adaptation dans le domaine fréquentiel et dans le domaine temporel. Nous nous intéressons dans cette partie de travail à l'adaptation dans le domaine temporel dans un canal multi-trajet.

Dans ce travail, nous utilisons l'algorithme d'adaptation des moindres carrés (LMS). Cet algorithme permet de calculer la pondération complexe optimale pour minimiser l'effet de bruit et les interférences inter cellules et de diriger le lobe principal du réseau d'antennes vers la direction du signal utilisateur.

Comme il a été mentionné précédemment, l'adaptation dans le domaine temporel est appliquée avec les données avant d'appliquer l'opérateur FFT. Ainsi, la pondération pour chaque élément d'antenne, est obtenue dans le domaine temporel et non pas dans le domaine fréquentiel.

II-5 - Prototypage d'un système MIMO-STBC-OFDM

Nous avons vu dans les sections précédentes, les différentes techniques à mettre en œuvre pour assurer les débits et les performances requis par les futurs systèmes de communication mobile. Dans cette partie, nous présentons le système de communications retenu pour le prototypage sur une plate-forme logicielle et les spécifications du système.

L'utilisation de chaînes de simulation dans la démarche de prototypage est nécessaire car elle permet de tester et de valider les algorithmes utilisés (comme par exemple, un schéma d'estimation de canal, ou une modulation OFDM), ainsi que leurs différents paramètres.

II-5-1 - Le prototypage de systèmes de communications

Le prototypage permet d'éviter de nombreuses étapes du cycle de développement du produit en se focalisant que sur quelques points particuliers du cahier des charges pour produire un démonstrateur validant les algorithmes et autres techniques de communications.

Les chaînes de simulation représentant le système d'émission-réception sont souvent créées avec des outils du type MATLAB, LabView, ou avec des langages de programmation comme le C, simples et rapides à mettre en œuvre. Par conséquent, les simulations permettent l'analyse de nouvelles techniques de manière plus immédiates que le prototype.

Toutefois, le prototypage a des atouts indéniables. D'une part, il permet de faire des tests dans des conditions réelles. Taux d'erreurs, débits, perturbations, portée : ces caractéristiques sont directement exploitables par mesure.

Dans notre projet, nous nous inscrivons dans ces démarches de prototypage rapide. Le prototype prend alors la forme d'une plate-forme de prototypage qui correspond à un assemblage de cartes électroniques avec différents processeurs de traitement de signal et différentes capacités de communications entre cartes. Une plate-forme doit émuler la communication de bout en bout et intégrer donc un émetteur, un récepteur, et entre les deux un canal, qui peut être un canal réel si la plate-forme dispose d'un segment RF, ou bien un simulateur de canal le cas échéant. Les éléments d'émission-réception sont donc répartis sur du matériel et la question du partitionnement permet d'affecter les traitements à des ressources matérielles spécifiques [30-34].

■ Éléments d'architecture pour le prototypage

Pour réaliser une plate-forme, plusieurs types de processeurs sont disponibles. **Les processeurs généralistes** (General Purpose Processor GPP) tels qu'on les retrouve dans les ordinateurs grand public sont polyvalents et servent surtout à gérer les accès à

la mémoire ou aux périphériques. Certains jeux d'instruction intégrés et spécifiques peuvent également permettre aux GPP d'être très performants sur certains traitements. Toutefois, on leur préfère des composants plus spécialisés pour la réalisation de plateforme dont l'essence même est le traitement de signal en temps-réel (nécessitant une forte capacité de calcul) [33-37].

Les DSP (Digital Signal Processor) sont des processeurs programmables dédiés au traitement du signal (numérique). Ils sont recommandés dans toutes les applications de calcul arithmétique (filtrage, FFT, convolution, MAC). Leur programmation se fait maintenant en C, langage de haut niveau, réservant le langage historique, l'assembleur, à l'optimisation de points critiques.

Les FPGA (Field Programmable Gate Array) sont des composants numériques reprogrammables. Le FPGA se décompose en blocs élémentaires : les CLB. Ils permettent d'instancier au choix des tables de vérités (logique), ou des registres (élément de mémorisation). La programmation de ces blocs permet d'avoir une vision du circuit en termes de portes, de bascules, de registres, de multiplexeurs, d'additionneurs, etc. Nous accédons ainsi à une structure où les traitements se font en parallèle, ce qui est particulièrement adapté aux structures chaînées d'un système de communications, où tous les blocs travaillent en parallèle. Le choix du FPGA s'effectue lorsque les besoins en forte capacité de traitement sont requis.

Les ASIC (Application Specific Integrated Circuit) ne sont pas considérés ici. En effet, un ASIC est un circuit non programmable, dont le fonctionnement est figé à sa création. Il constitue une solution pour la conception d'un produit final intégré performant, plus qu'un moyen de prototypage.

Chacun de ces processeurs est adapté à un usage et se place par rapport aux autres selon des axes de performance (vitesse d'exécution), de spécialisation (le processeur peut être de type généraliste ou seulement dévoué à une tâche particulière) et de granularité (la granularité exprime la maille élémentaire de programmation : le bit, la porte logique, le registre).

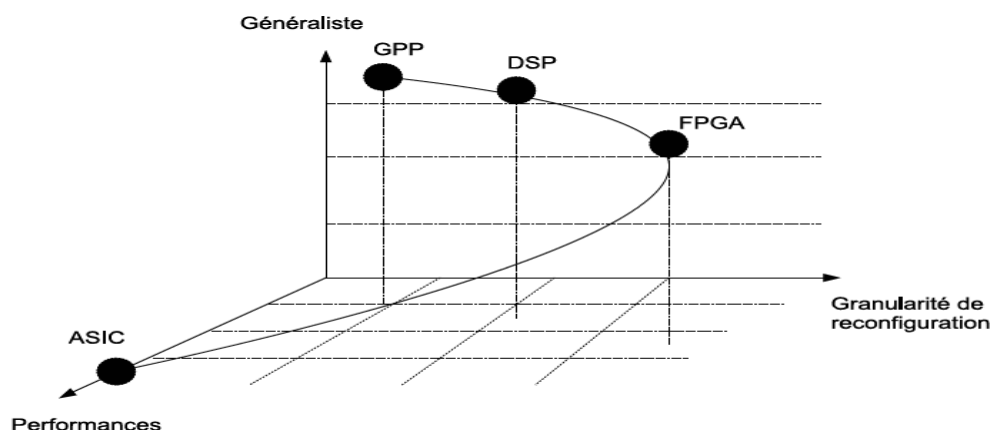


Figure II-17 : Comparaison des processeurs selon la performance, la programmation et la granularité.

II-5-2 - Techniques de reconfiguration

La profusion de standards est problématique pour notre terminal : sa couche PHY se doit d'être « universelle » pour pouvoir être configurée selon le standard adéquat lors d'une communication. Du point de vue matériel, cela se traduit par la reconfiguration du processeur embarqué à chaque changement de standard. Pour y arriver, deux approches sont envisageables, fortement liées aux choix et aux contraintes du matériel : l'approche statique et l'approche reconfigurable dynamiquement.

- **La reconfiguration statique**

La reconfiguration statique peut être vue comme de la paramétrisation. Elle consiste à fournir à un modem les valeurs des paramètres des techniques qui y sont intégrées. Concrètement, des solutions à base de FPGA sont utilisées. Cette approche est statique au sens où l'application de communications doit être interrompue pour permettre de changer de jeu de paramètres. Elle présente l'avantage d'être simple, et rapide à mettre en œuvre pour minimiser le temps passé sur l'architecture et maximiser le temps passé à implanter des techniques avancées de communications. L'inconvénient de la méthode est que le modem doit être reprogrammé pour changer de standard, ce qui signifie des temps morts dans la communication, dus à la réinitialisation et le chargement du nouveau programme.

De plus, si la partie numérique peut être modifiée aisément grâce aux possibilités de reconfiguration d'un composant programmable, la partie analogique en amont — le segment RF —, composée d'amplificateurs, de filtres, de mélangeurs, et des transducteurs est plus difficile à reprogrammer [37-39].

- **La reconfiguration dynamique**

La reconfiguration dynamique est une méthodologie assez récente. Elle permet à une application de modifier sa fonctionnalité. A tout instant, une application reconfigurable dynamiquement peut allouer ou désallouer une partie de ses ressources. Ceci, permet de multiplexer dans les temps les traitements, et donc potentiellement de pouvoir exécuter une application dont globalement les ressources consommées excèdent celles disponibles dans la cible.

II-5-3 - Méthodologie de prototypage

- **Plate-forme et caractéristiques du système**

La Figure II-18 décrit le système méthodologie de conception pour MIMO-OFDM plate-forme sans fil. Le champ d'application de cette méthodologie de conception s'étend de la spécification à la mise en œuvre. Selon la description / spécifications fonctionnelles, divers outils de modélisation des systèmes, des outils logiciels et plate-forme matérielle sont activés.

Dans la plate-forme pour la conception MIMO-OFDM, diverses spécifications de conception sans fil sont considérés comme : l'environnement (intérieur / extérieur), la

norme sans fil, la fréquence porteuse, la bande passante, la fréquence d'échantillonnage, l'appareil de mesure, le real-time/off-line, le nombre d'antennes d'émetteur et de récepteur, avec ou sans retour, un ou plusieurs utilisateurs, le type de modulation, le débit de données réalisable [35-40].

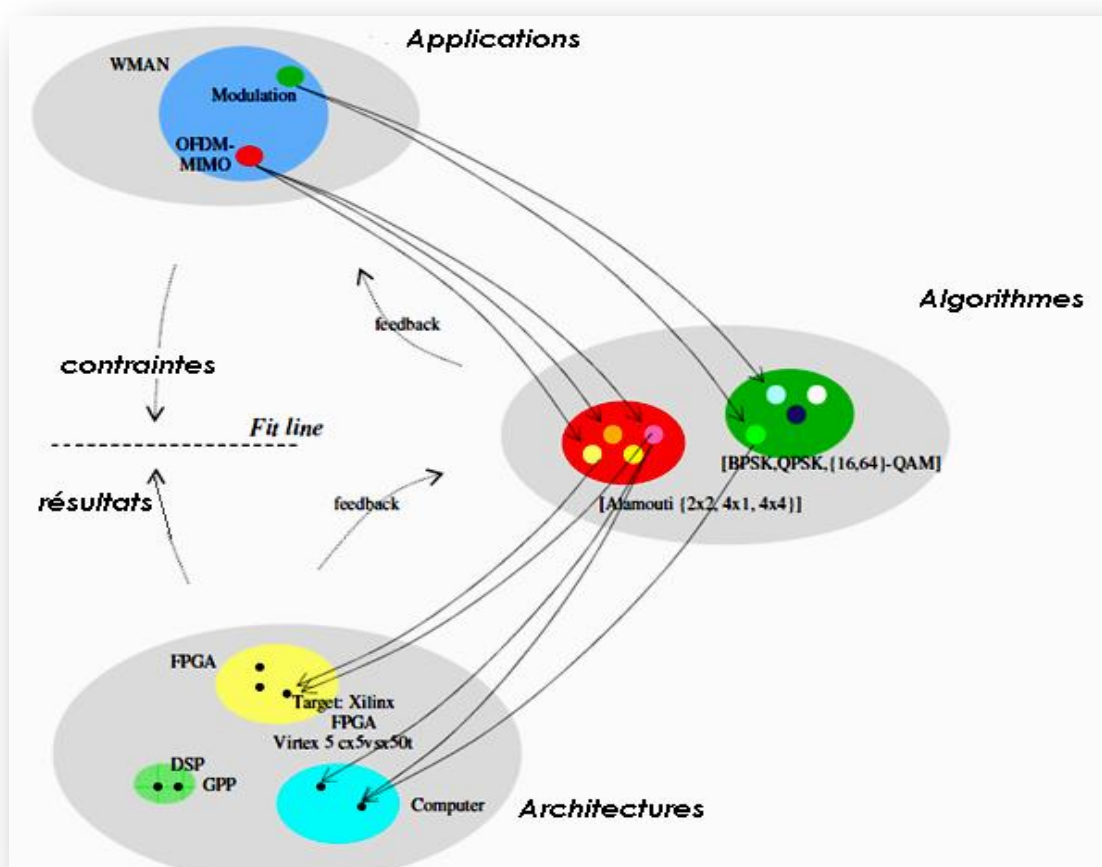


Figure II-18 : Paradigme du projet prototype : MIMO-OFDM.

Pour la plateforme, nous avons choisi l'implémentation dans un circuit FPGA pour sa reconfigurabilité. Parmi les contraintes d'implantation, nous pouvons citer la vitesse d'exécution et l'espace qu'occupera l'algorithme que nous voulons mettre en œuvre sur FPGA.

Il est maintenant impératif de décrire notre plate-forme de simulation MATLAB, afin que tous les paramètres soient bien définis. Premièrement, nous considérons que l'échantillonnage et la synchronisation sont parfaits, puisque notre étude ne se concentre pas sur ces paramètres et nous ne voulons pas qu'ils viennent interférer dans l'analyse de nos résultats. Nous assumons que le canal est pseudo statique, c'est-à-dire constant pour tout un bloc de symboles OFDM, mais indépendant et différent des autres blocs. Nous simulons une dizaine blocs, ce qui nous donne des tracés de courbes satisfaisants tout en ayant un temps de simulation acceptable pour les

nombreuses courbes obtenues. Chaque trajet du canal sera généré indépendamment en utilisant le modèle de canal à évanouissement de Rayleigh recommandé par IEEE 802.11 à 2,4 GHz, présentant les caractéristiques suivantes : un étalement moyen des retards $\tau = 0.25$ us, une fréquence Doppler maximale de 50 Hz, soit un temps de cohérence $\tau_c = 20$ ms et une dispersion angulaire de 19 et 68 degrés pour la BS et le terminal. La réponse impulsionnelle du canal sera composée de $D + 1$ trajets gaussiens complexes espacés de façon égale.

Nous utilisons une FFT à 64 points, dont les caractéristiques sont présentées au tableau suivant :

Longueur du préfixe cyclique	16
Nombre de sous-porteuse utilisées pour les données	48
Nombre de sous-porteuse non utilisées aux frontières	10
Nombre de sous-porteuse non utilisées près de la fréquence 0	2
Nombre de pilote de synchronisation	4
Espacement entre les pilotes de synchronisation	16

Tableau II-1 : Caractéristiques de la FFT utilisée.

La bande de fonctionnement imposée au système est de $f = 25$ MHz, soit un temps symbole de 40 ns pour correspondre aux bandes déjà utilisées par certains réseaux WLAN.

Le système doit pouvoir utiliser plusieurs schémas de transmission pour être conforme aux systèmes existants. Par exemple : 802.11.

Les symboles OFDM peuvent être envoyés en mode burst ou en mode flot continu. Dans le cas du mode burst, les symboles sont espacés régulièrement,

Le système transmet les symboles OFDM encapsulés dans des trames. Une trame peut contenir à la fois des symboles OFDM de données, mais également des symboles de contrôle. Les trames sont espacées irrégulièrement de manière aléatoire.

Méthodes de transmission	MIMO-OFDM
Bande de fréquence	De 2.5 à 10 GHz
Condition canal	NLOS
Bite Rate	≥ 120 MBPS
Largeur de bande	20 MHz
Modulation	BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM
Mobilité utilisateur	De faible à haute mobilité
CP	$1/16 = 0.0625$ msec
OFDM FFT	64
Réseau antenne (MIMO)	Tx/Rx : 2x1, 2x2, 2x3, 3x3,
Codage STBC	Alamouti

Tableau II-2 : Caractéristiques de système MIMO-OFDM utilisé.

- **Prise en compte des imperfections du système**

Pour aboutir à un système fonctionnant dans des conditions réelles, il faut prendre en compte d'autres facteurs survenant lors de l'implémentation ou issu du segment RF et impactant négativement la liaison. Plusieurs de ces facteurs sont brièvement introduits ci-dessous :

- la quantification résultant de la représentation des données dans un format fixe (par exemple, sur 16 bit) provoque une troncature des signaux (perte de précision),
- l'erreur d'estimation de la réponse du canal, dépendante de l'algorithme d'estimation utilisé et de la méthode d'interpolation (perte de précision), peut dégrader les performances du système,
- la récupération de la fréquence d'horloge (ou rythme) en réception est nécessaire pour démoduler à la bonne cadence. Elle peut être évitée en distribuant la même horloge entre émetteur et récepteur,
- le décalage de phase entre les horloges d'émission et de réception,
- la détection du début de la transmission ou du début des trames de symboles OFDM (synchronisation temporelle ou Frame start),
- les non-linéarités des amplificateurs de puissance pour des signaux à fort PAPR comme les signaux OFDM.

Très souvent, la plupart de ces facteurs ne sont pas considérés par les études algorithmiques lors des simulations. Nous concernant, la plupart de ces contraintes s'impose et des solutions simples sont alors mises en œuvre pour diminuer leur impact sur les transmissions.

Les erreurs dues au format de données, à l'estimation de canal et au décalage de phase doivent être quantifiés (par des courbes de taux d'erreur binaire par exemple). Nous pouvons nous affranchir du problème de rythme en connectant les horloges émetteur et récepteur.

Les problématiques de PAPR ne seront pas considérées tant que la plate-forme ne dispose pas d'étage RF. Par contre, le récepteur doit pouvoir détecter dans le flot de données, le début d'un symbole OFDM pour pouvoir commencer à démoduler (placement correct de la fenêtre FFT en réception). Ceci nécessite un mécanisme particulier en réception appelé synchronisation temporelle ou synchronisation trame.

La synchronisation temporelle doit permettre au récepteur de détecter le début d'une trame pour pouvoir démoduler correctement les informations transmises.

La séquence est construite à partir d'un polynôme générateur implémenté par un registre à décalage LFSR (Linear Shift Right Register). Les propriétés de cette séquence, à savoir : une très bonne autocorrélation et une intercorrélation (quasi) nulle permettent au récepteur de détecter un pic d'autocorrélation quand la séquence de synchronisation est présente.

Dans le contexte MIMO, la multiplicité des liens ($N_t \times N_r$) et les superpositions de séquence de synchronisation décalée dans le temps sur chaque antenne de réception complexifie le traitement. Une première simplification est de considérer que les superpositions ne sont pas décalées dans le temps sur chaque antenne de réception. Ainsi, les séquences de synchronisation s'additionnent.

II-6 - Conclusion

Cette étude montre clairement que la technique MIMO-OFDM présente des meilleures performances pour les conditions du canal les plus défavorables. Nous avons aussi constaté que l'augmentation du nombre d'éléments d'antennes augmente les performances des systèmes pour des rapports signal sur bruit croissant.

Dans ce chapitre, nous avons aussi présenté et détaillé notre prototype ainsi que les caractéristiques du système MIMO-OFDM à codage Alamouti à implémenter.

Chapitre III - Association MIMO-MCCDMA

III-1 - Introduction

La plupart des études sur les systèmes MIMO considèrent un canal non sélectif en fréquence. Cependant, l'effet multi-trajets provoque la sélectivité fréquentielle du canal. Pour cette raison, nous proposons dans ce chapitre, d'étudier l'association de la technique MCCDMA à la technique MIMO. La technique MCCDMA permet d'une part, l'accès de plusieurs utilisateurs dans le même canal radio et d'autre part, une transmission dans un canal non sélectif en fréquence grâce à la modulation OFDM employée.

Aussi, dans ce chapitre, nous présentons une architecture permettant l'association de la technique multiplexage spatial MIMO-VBLAST à la technique MCCDMA. Nous évaluons également les performances de cette nouvelle chaîne de transmission.

III-2 - Le système MCCDMA

Afin de bénéficier en plus des avantages des techniques d'étalement de spectre, il est possible de mettre au point des méthodes hybrides OFDM-CDMA. Les performances des dispositifs à fréquences orthogonales semblent convaincantes et concluantes : Fazel, Kaiser et Schnell ont montré par simulation, lors de leurs recherches au sein du projet européen RACE CODIT, que les méthodes hybrides OFDM-CDMA seraient plus efficace que le DS-CDMA [41-43].

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

- Système de type MC-DS-CDMA (Multicarrier Direct Sequence CDMA).
- Système de type MCCDMA (Multicarrier CDMA),

III-2-1 - Le système MC-DS-CDMA (Multicarrier Direct Sequence CDMA)

L'étalement sur les différentes porteuses orthogonales est réalisé de manière classique, par multiplication par une séquence pseudo-aléatoire de fréquence de chip élevée qui vérifie la relation suivante [41]:

$$\Delta f = \frac{1}{T_c} = \frac{G}{N.T_b} \quad (\text{III.1})$$

où Δf représente l'écart entre les porteuses ; T_c , la période de chip ; N , le nombre de porteuses ; G , la longueur des séquences PN et T_b est la durée d'un bit en entrée du système.

L'information à transmettre n'est pas nécessairement dupliquée sur toutes les porteuses et un convertisseur série/parallèle est utilisé en début de chaîne comme le montre la figure III.1. L'allure du spectre de puissance, quant à elle est donnée à la figure III-2.

Cette technique permet de réduire, voir d'éliminer l'interférence inter-chip de manière efficace et l'utilisation de la transformée de Fourier permet d'accomplir l'étalement de manière numérique, sans avoir recours à des filtres analogiques.

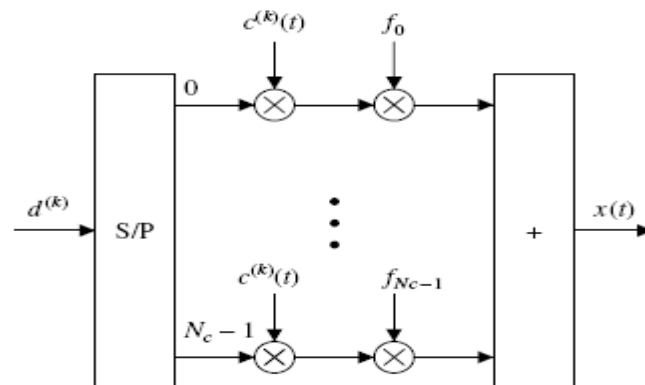


Figure III-1 : Émetteur MC-DS-CDMA.



Figure III-2 : Spectre de puissance MC-DS-CDMA.

III-2-2 - Le système MCCDMA (Multicarrier CDMA)

Dans cette technique introduite en 1993, les différentes porteuses sont orthogonales et la séquence PN qui permet de différencier les différents usagers est de longueur égale au nombre de porteuses. En effet, chaque chip de la séquence PN est appliqué à une porteuse comme le montre la figure III-3. Les différentes porteuses véhiculent la même séquence d'information [42].

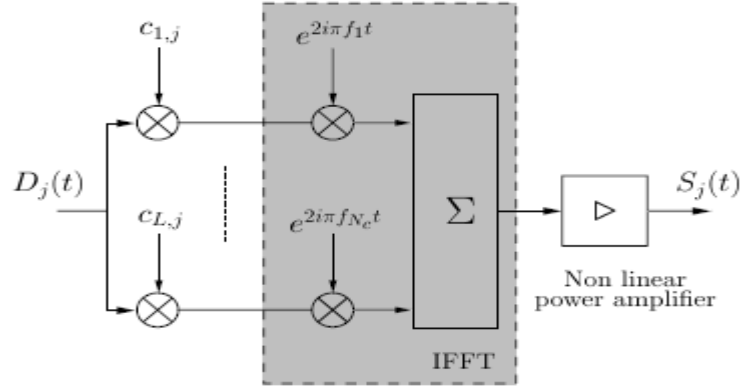


Figure III-3 : Émetteur MCCDMA.

Avec cette méthode, le signal est, en quelque sorte, combiné dans le domaine fréquentiel et il est aussi possible, d'utiliser un convertisseur série/parallèle avant ce dispositif si le débit est très grand, afin d'éliminer l'interférence inter-symbole et même inter-chip.

Pour ces avantages tels que l'efficacité spectrale améliorée et l'élimination de l'interférence inter-chip grâce à des largeurs de bande très petites, ce procédé est un candidat potentiel pour la future 4^{ème} génération (4G) des réseaux de téléphonie mobiles.

III-3 - Modélisation d'un système AMRC à porteuses multiples ou MCCDMA

Le signal MCCDMA est issu de la concaténation des opérations d'étalement de spectre par séquence directe et de modulation à porteuses multiples. Le modulateur MCCDMA étale les données d_j de chaque utilisateur j dans le domaine fréquentiel. L'étalement se réalise par la multiplication des données d_j par chacun des éléments du code c_j d'étalement associé. La Figure III-4 représente le modulateur MCCDMA dans le cas où le code d'étalement a une longueur L_c égale au nombre de sous-porteuses N_p .

Sous l'hypothèse de L_c égale à N_p , l'expression du signal émis sur $[0 ; T_s]$ en fréquence intermédiaire, en sortie du modulateur est donnée par la relation [41-43] :

$$s_j(t) = \frac{1}{\sqrt{N_p}} \sum_{k=0}^{N_p-1} \Re \{ d_j c_{k,j} \Pi(t) e^{2i\pi f_k t} \} \quad (\text{III.2})$$

Avec :
$$f_k = f_{fi} + \frac{k}{T_s}.$$

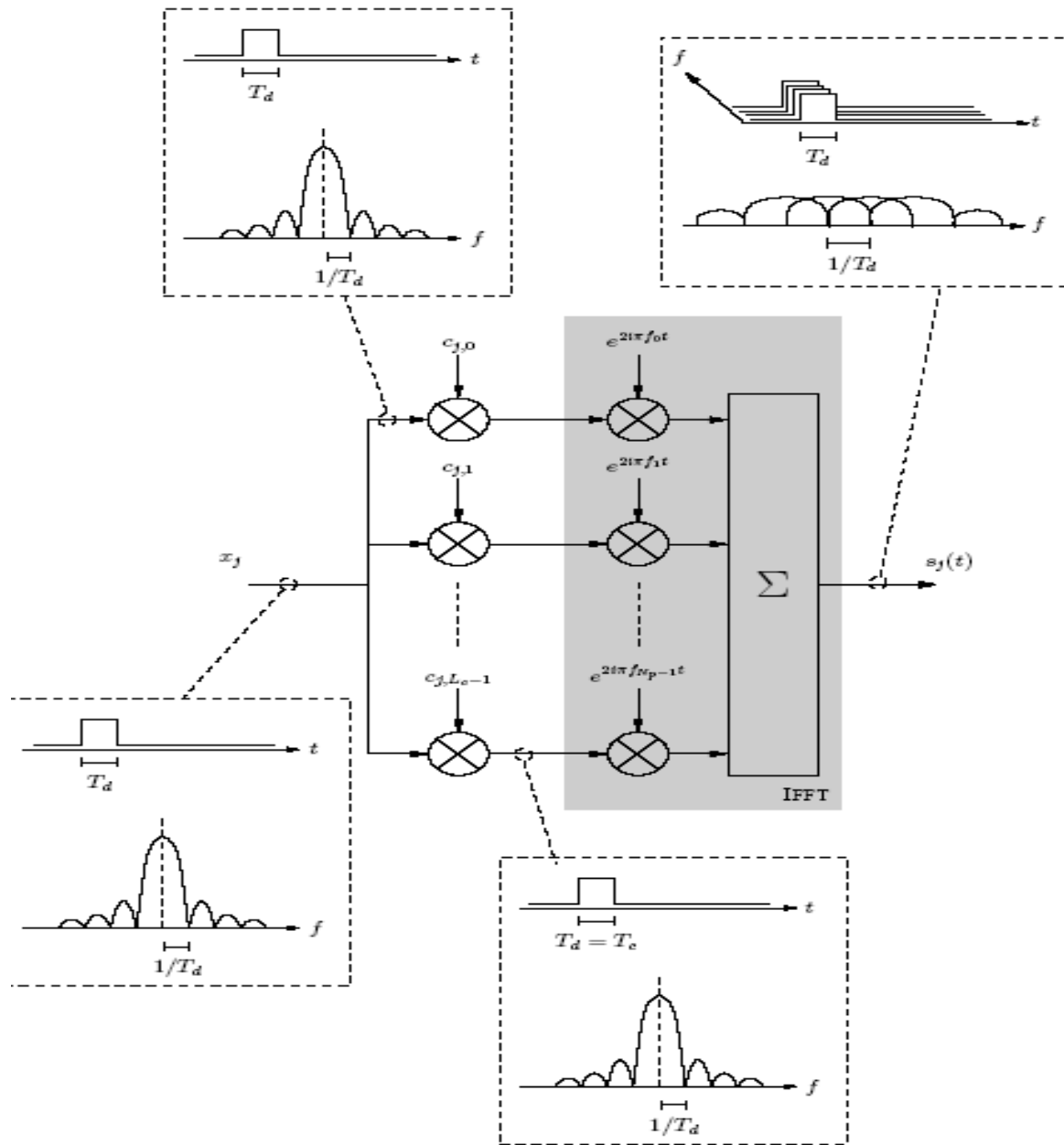


Figure III-4 : Modulateur MCCDMA du j ième utilisateur avec $L_c = N_p$.

L'étalement se faisant à la fréquence du signal à moduler, la durée T_s du symbole modulé reste égale à celle, T_d , du symbole d_j . Il en ressort un espacement entre sous-porteuses Δf donné par :

$$\Delta f = \frac{1}{T_s} = \frac{1}{T_d}. \quad (\text{III-3})$$

L'enveloppe complexe X_j du signal modulé, échantillonné à T_s/N_p , est donc égale à :

$$X_j\left(\frac{nT_s}{N_p}\right) = \frac{d_j}{\sqrt{N_p}} \sum_{k=0}^{N_p-1} c_{k,j} e^{2i\pi \frac{(k-N_p/2)}{N_p}} = (-1)^n d_j \underbrace{\sum_{k=0}^{N_p-1} \frac{c_{k,j}}{\sqrt{N_p}} e^{2i\pi \frac{k}{N_p}}}_{TFD^{-1}}. \quad (\text{III-4})$$

Tout comme le signal OFDM, le signal MCCDMA peut être généré par une transformée de Fourier discrète (TFD) inverse effectuée sur les chips du code d'étalement. Ainsi, le choix des codes d'étalement est fondamental. En effet, de trop grandes variations de l'enveloppe complexe du signal modulé sont délicates à traiter pour les amplificateurs radiofréquence de puissance.

La description du modulateur MCCDMA repose ici sur l'hypothèse $L_c = N_p$. Cependant, le plus souvent, des combinaisons sont proposées pour différentes valeurs de L_c et N_p . De plus, les techniques présentées précédemment pour combattre les ISI et les ICI, à savoir l'ajout d'intervalle de garde et le zero-padding, sont toujours utilisables dans notre cas de figure. Ainsi, l'agencement de la longueur des codes et du nombre de sous-porteuses permet le dimensionnement de systèmes MCCDMA adaptés à de nombreux cas de figure.

III-4 - Association MIMO-MCCDMA

Dans la suite de ce chapitre, nous nous intéressons à l'étude des performances et à l'implémentation matérielle de la technique du multiplexage spatial combinée avec la technique 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 [16].

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 [44-57].

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

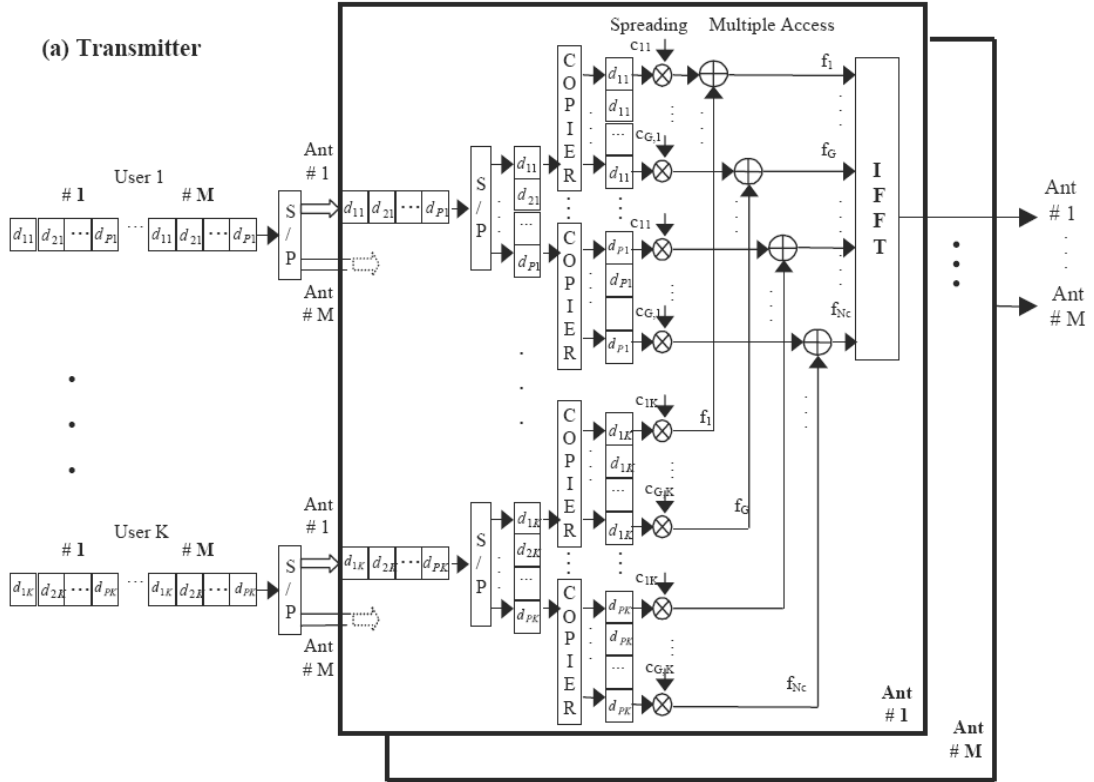


Figure III-5 : Système MIMO-VBLAST-MCCDMA en émission.

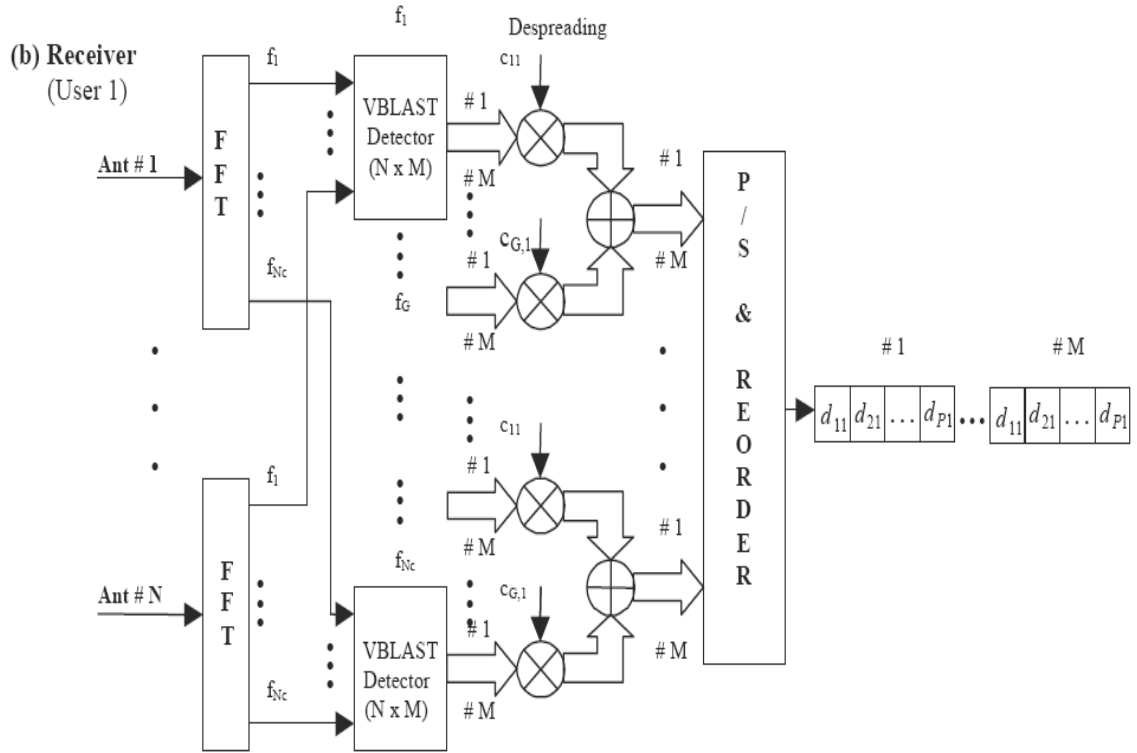


Figure III-6 : Système MIMO-VBLAST-MCCDMA en réception.

En réception, le signal est une superposition des symboles transmis, bruités et atténués par les multi-trajets, compliquant la tâche des récepteurs traditionnels. La section suivante propose des algorithmes permettant de restituer l'information [45-50].

Les figures suivantes représentent l'implémentation des algorithmes MMSE-IC-MMSE, ZF-IC et ZF dans un récepteur VBLAST-MCCDMA. (IC : annulation d'interférences, MMSE : EQMM) pour le cas d'un mono- utilisateur et multi-utilisateurs [46-61].

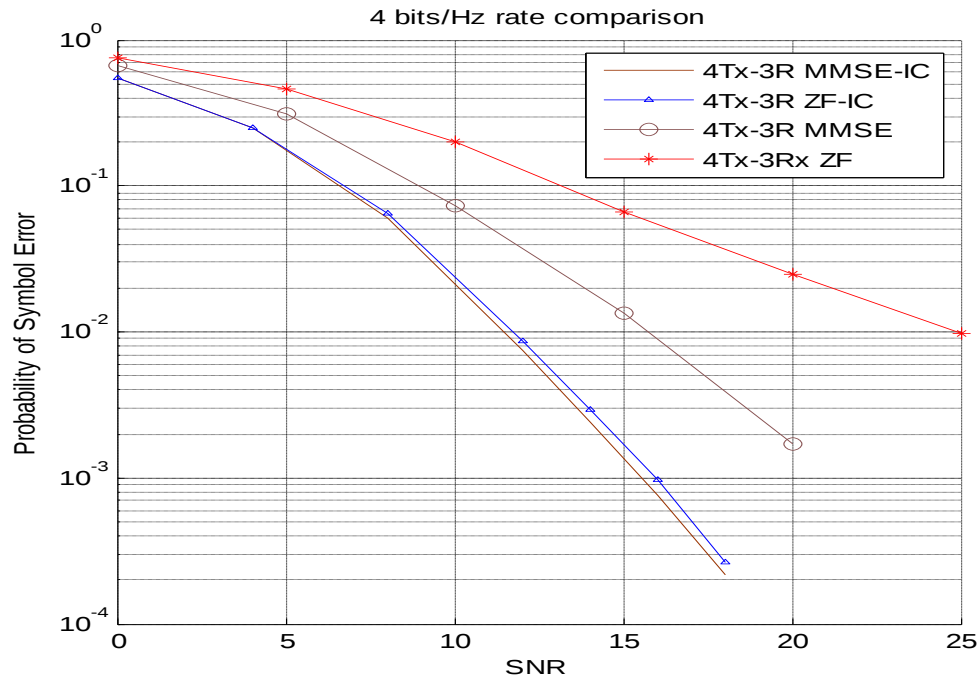


Figure III-7 : MIMO-MCCDMA avec VBLAST Réception pour 4 utilisateurs.

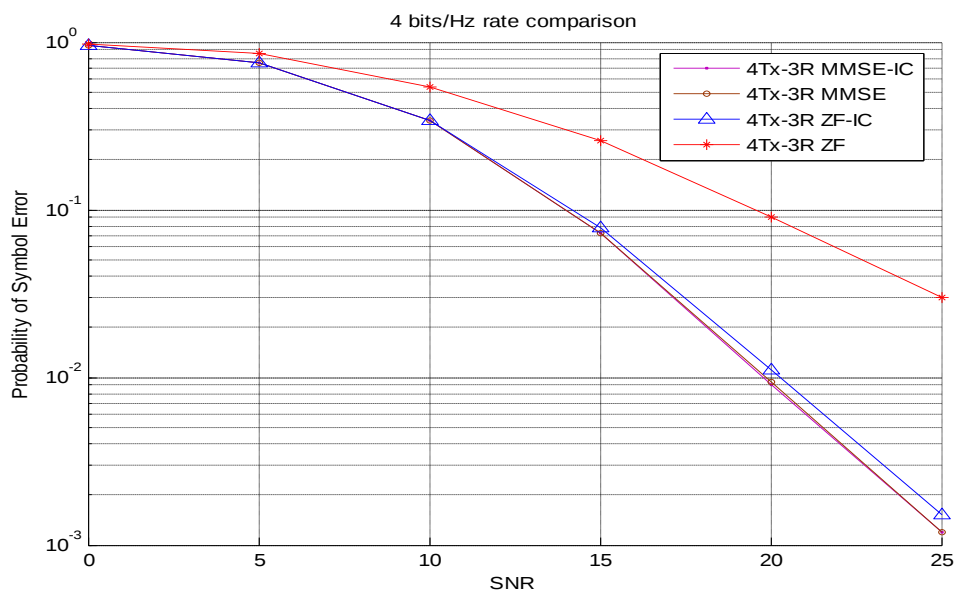


Figure III-8 : MIMO-MCCDMA avec VBLAST Réception mono-utilisateur.

La figure III-8 montre que l'algorithme MMSE-IC présente une performance meilleure par rapport aux égaliseurs linéaires. Elle montre aussi que l'algorithme IC utilisant un égaliseur MMSE donne de meilleures performances par rapport à l'algorithme IC utilisant un égaliseur ZF.

La figure suivante montre l'influence du nombre d'antennes en réception sur la performance du récepteur VBLAST pour un système MIMO-MCCDMA.

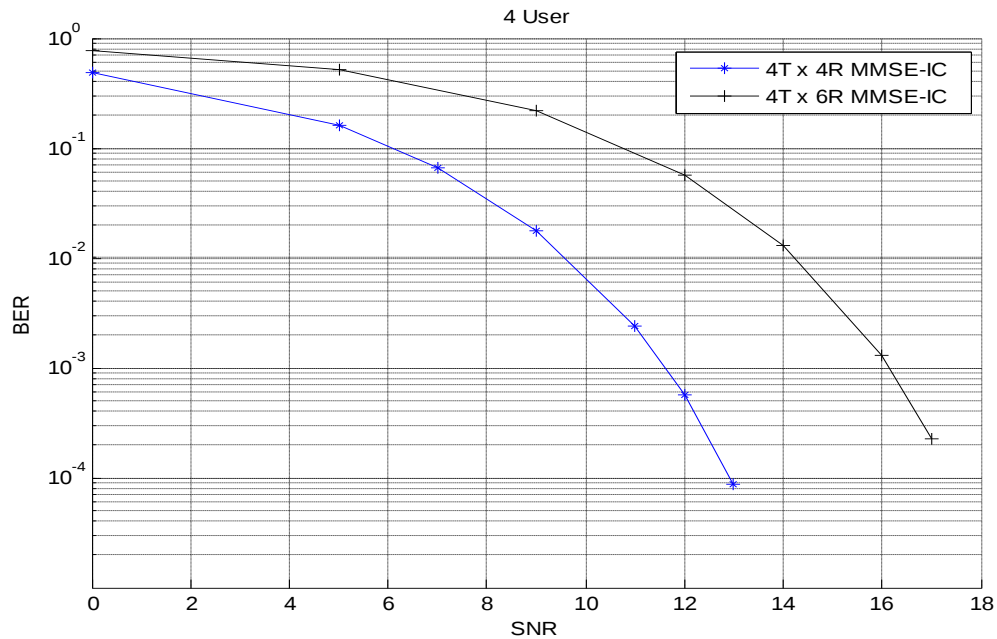


Figure III-9 : MIMO-MCCDMA avec VBLAST récepteur.

Effet du nombre d'antennes en réception.

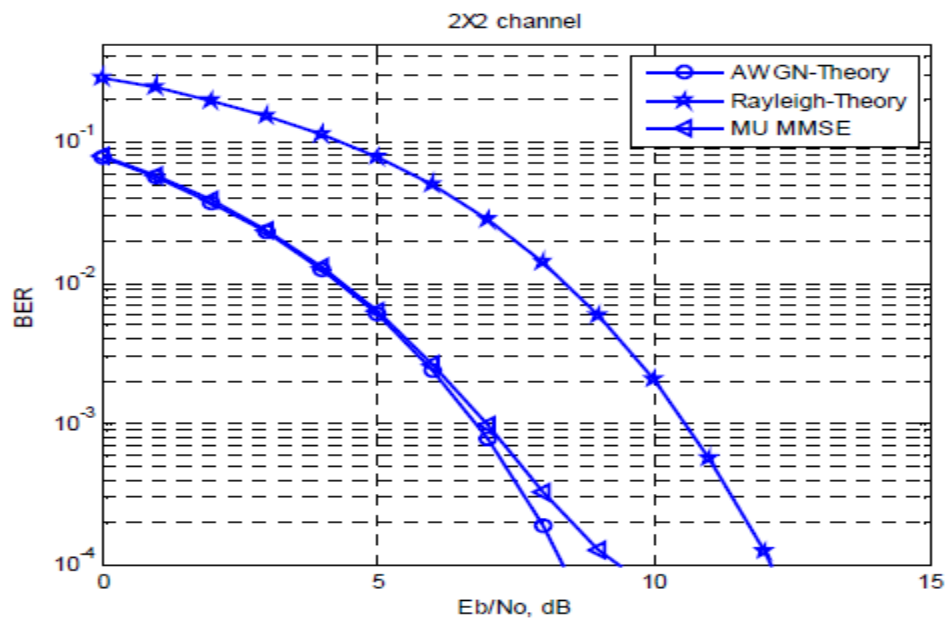


Figure III-10 : Performances d'un système STBC-MCCDMA.

III-5 - Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé les notions de base et le principe de la technique d'accès MCCDMA. Nous avons étudié et évalué par la suite les performances de la technique de multiplexage spatial dont l'avantage essentiel réside dans la maximisation du débit de transmission et l'offre d'une diversité spatiale à la réception.

Ensuite, nous avons introduit l'idée de l'association du multiplexage spatial à la technique MCCDMA, ce qui nous a permis d'évaluer les performances de cette nouvelle chaîne de transmission. L'évaluation a été effectuée sous l'environnement Matlab en modifiant plusieurs paramètres tels que le nombre d'antennes en émission et en réception, le nombre de sous- porteuses, la charge du système (nombre d'utilisateurs) et l'ajout d'un codeur de canal. Nous avons montré à travers de nombreux résultats concrets de simulation que l'égaliseur MMSE présente une meilleure performance par rapport au détecteur ZF et que l'algorithme IC améliore la qualité de la détection en annulant les interférences des antennes d'émission.

Conclusion générale

Ce projet de recherche rentre dans le cadre de l'étude de la couche physique des réseaux sans fil. Il traite la problématique suivante : comment améliorer les performances de transmission dans les réseaux mobiles sans fil grâce à des techniques plus avancées à la couche physique ? Durant les dernières décennies, les applications destinées aux réseaux sans fil, sont devenues de plus en plus nombreuses, d'où la nécessité d'avoir des débits de transmission plus importants.

Dans ce projet, nous avons développé une recherche orientée vers des problématiques originales en communications numériques et basée sur des approches avancées en traitement du signal.

Nous avons mené une étude sur le développement et l'optimisation de l'association de deux technologies actuellement très prometteuses, à savoir les systèmes à modulation à porteuses multiples et à accès multiples par répartition de code et les techniques multi-antennes basées sur les antennes intelligentes. Dans un premier temps, nous avons examiné, les différents modèles de canaux rencontrés en pratique notamment les canaux à évanouissements de Rayleigh. Après avoir étudié quelques notions sur les sélectivités fréquentielles et temporelles, nous avons présenté les différentes approches de diversité susceptibles d'améliorer les transmissions sur ce type de canal. Nous avons ensuite étudié les techniques d'accès multiples qui luttent efficacement contre les évanouissements, à savoir les techniques CDMA, OFDM et MC-CDMA. Après une introduction du concept des antennes intelligentes : structure, types et avantages, nous avons adopté la technique de formation de voies et d'annulation d'interférents.

Les systèmes MIMO et notamment les systèmes basés sur le multiplexage spatial, tels l'architecture BLAST développée par les laboratoires Bell doivent cependant respecter bon nombre de contraintes, dont la bande étroite reste la principale. Afin de surmonter ce handicap et d'étendre les possibilités de BLAST, nous avons proposé une association avec la modulation OFDM. Cette modulation multi-porteuses permet en effet de diviser une grande bande de fréquence en de multiples sous-bandes contiguës et orthogonales entre elles, évitant ainsi l'IES et autorisant l'utilisation de l'algorithme BLAST initial dans chaque sous-porteuse.

L'architecture d'un tel système est largement détaillée, et pour valider le procédé, des simulations furent conduites sur des modèles de canaux sans fils. Nous avons ainsi démontré, par des calculs d'efficacité spectrale et de TEB, que le canal Rayleigh utilisé comme référence pour la norme WIFI, est particulièrement bien adapté à l'utilisation d'une combinaison MIMO-OFDM.

Nous avons proposé de codes espace-temps s'appliquant à un émetteur muni de deux antennes émettrices et utilisant la modulation OFDM. Ces codes sont basés sur le principe du schéma de codage d'Alamouti. Ensuite, profitant des propriétés de la modulation OFDM, les codes proposés visent à remplacer la diversité spatiale par de la diversité fréquentielle. Nous avons amorcé cette étude par une brève présentation des codes spatio-tempo-fréquentiels appliqués au système MIMO/OFDM. Ensuite, une description détaillée d'une chaîne de transmission MIMO-OFDM-STBC suivie d'une simulation et d'une étude des performances sont exposées.

Les performances de système MIMO-OFDM-STBC sont comparées au système MIMO-OFDM-VBLAST.

Nous avons ensuite étudié la technique de modulation multi-porteuse dans un contexte multi-antennes à détection multi-utilisateurs, d'une part, avec les codes espace-temps STBC et d'autre part avec du multiplexage spatial. Nous avons tout d'abord étudié les différents types de détecteurs. Nous avons ensuite présenté les principes de détection par les systèmes SISO-MMSE-OFDM et MIMO-MMSE-VBLAST-OFDM. Finalement nous avons développé la chaîne de transmission MIMO-MMSE-VBLAST-OFDM.

Avec du codage espace-temps, les performances des différents codes STBC avec et sans codage de canal ont été mises en évidence dans un contexte OFDM multi-utilisateurs en utilisant le détecteur MMSE. Nous avons étudié la chaîne de transmission MIMO-MMSE-STBC-OFDM, pour finalement étudier et exploiter les résultats de simulation et les comparer avec ceux obtenus par le système MIMO-MMSE-VBLAST-OFDM.

En parallèle, nous avons proposé un système MIMO-MCCDMA basé sur les antennes intelligentes, avec un algorithme adaptatif appliqué à l'émission et à la réception dans le but d'améliorer les performances, de détecter le signal utile et de combattre les interférences. L'algorithme utilisé dans ce travail est basé sur l'algorithme LMS conventionnel. A l'émission, cet algorithme permet de déterminer la pondération optimale pour diriger le lobe principal vers la direction du récepteur. A la réception, il permet de déterminer la pondération optimale pour diriger le lobe principal vers la direction de l'émetteur et de supprimer les bruits et les interférences spatiales, les interférences inter symboles et inter canaux.

Les perspectives à très court terme de ce projet consistent à étudier la pertinence d'un prototype expérimental MIMO-OFDM adaptée aux réseaux locaux de type IEEE 802.11a/n (WiFi 5), parmi les plus évolués actuellement en terme de débit. En partant des spécifications techniques du système jusqu'à la définition complète de sa couche physique, les tâches de cette activité de recherche retrace les différentes étapes rencontrées lors du déroulement de ce travail.

Nos travaux sont très intéressants et très importants car ils explorent, proposent et développent de nouvelles architectures d'entrées et de sorties multiples MIMO basées sur des algorithmes puissants d'optimisation, d'adaptation et de détection dans un contexte multi-porteuses OFDM et d'accès multiples CDMA et MC-CDMA. Ces dernières permettent 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).

Les nombreux résultats obtenus par les nombreux tests concrets effectués et appliqués aux différents systèmes MIMO combinés démontrent les performances remarquables de ces dispositifs nouveaux d'accès et d'entrées et de sorties multiples. Ces résultats ont été fortement valorisés par un grand nombre de publications internationales (en plus des communications internationales), en totalité indexées dans des bases d'indexation crédibles avec un facteur d'impact élevé et par plusieurs soutenances de travaux de projets de fin de cycle (Masters, Doctorats et Habilitations).

Nos perspectives de recherche s'inscrivent dans la continuité de nos actions et activités menées jusqu'à ce jour, en particulier sur l'axe majeur de recherche concernant les techniques de communication avancées et leurs applications dans le cadre des réseaux de télécommunications de 4^{ème} et pourquoi pas de 5^{ème} génération.

Aussi, notre projet de recherche, par son programme de recherche et de développement axé sur des besoins et exigences socio-économiques initialement exprimés par un flux d'informations de plus en plus large et important, transmis correctement et rapidement (haut débit) et de manière totalement sécurisée, constitue une contribution certaine et efficace dans la stratégie nationale de développement des Technologies de l'Information et de la Communication (TICs) en Algérie.

Bibliographie

- [1] A. Bouacha, F. Debbat, F.T. Bendimerad, "Modified blind beamforming algorithm for smart antenna", Journal of Radio Electronics, n° 1, 2008.
- [2] S.A. Djennas, F.T. Bendimerad, S.M. Djennas, "A new technique for planar array antennas synthesis", AEUE-International Journal of Electronic and Communications, ISSN 1434-8411, vol. 63, n° 6, pp. 859-870, 2009.
- [3] 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.
- [4] Kaïs 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 supérieure des télécommunications, 12 Décembre 2008.
- [5] 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.
- [6] Olivier Berder. « Optimisation et stratégies d'allocation de puissance des systèmes de transmission multi antennes ». Université de Bretagne Occidentale, 20 décembre 2002.
- [7] Basel Rihawi, « Analyse et réduction du Power Ratio des systèmes de radio-communications multi antennes », Université de Rennes I, 20 Mars 2008.
- [8] Ramya Bhagavatula, Robert W. Heath, Antonio Forenza, Nicholas J. Kirsch and Kapil R. Dandekar, « Impact of Mutual Coupling on Adaptive Switching Between MIMO Transmission Strategies and Antenna Configurations », Wireless Personal Communications, Volume 52, Number 1, 69-87, 2010
- [9] M. Angeline, S. Lenty Stewart, "Multiuser Detection for MIMO CDMA System". International Journal of Computer Applications, Number 6, by IJCA Journal, 2010.
- [10] B. A. Bjerke and J. G. Proakis, "Multiple antenna diversity techniques for transmission over fading channels", In IEEE Proceedings of Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), volume 3, pages 1038–1042, New Orleans (LA), USA, September 21-24 1999.
- [11] Laurent Ros. « Spécificité du canal de propagation en communication radio-mobile et choix d'une modulation ». Séminaire du LIS, Grenoble, le 12 Mai 2005.
- [12] 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, NJ 07733.

- [13] Adnan Khan, Sajid Bashir, Muhammad Naeem, Syed Ismail Shah and Asrar Sheikh. "Binary Ant Colony Algorithm for Symbol Detection in a Spatial Multiplexing System". Lecture Notes in Computer Science, 2007, Volume 4618/2007.
- [14] R. Böhnke, K.-D. Kammeyer "SINR Analysis for V-BLAST with Ordered MMSE-SIC Detection », International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, Vancouver, Canada, 3. - 6. July 2006.
- [15] S. M. Alamouti "A simple diversity technique for wireless communications". IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 16(8):1451–1458, October 1998.
- [16] H. Schulze, C. Lüders, "Theory and Applications of OFDM and CDMA", Wideband Wireless Communications, John Wiley & Sons, Ltd, 2005.
- [17] L. Hanzo, M. Munster, B. J. Choi and T. Keller, "OFDM and MC-CDMA for broadband Multi-user communications ", WLANs and broadcasting, John Wiley & Sons, Ltd, 2003.
- [18] Y. Li, G. Stuber, "Orthogonal frequency division multiplexing for wireless communications", Springer, Inc, 2006.
- [19] P. Gruyer, S. Paillard, "Modeling OFDM modulator and demodulator", University of Bretagne 12 December 2005.
- [20] R. Böhnke, V. Kühn, K.-D. Kammeyer "Adaptive MIMO-OFDM for Future Mobile Radio Communications" IEE International Conference on 3G & Beyond, London, GB, 7. - 9. November 2005.
- [21] Peter W. C. Chan, Ernest S. Lo & Vincent K. N. Lau "Performance Comparison of Downlink Multiuser MIMO-OFDMA and MIMO-MC-CDMA with Transmit Side Information - Multi-Cell Analysis" IEEE Transactions on wireless communications, vol. 6, no. 6, June 2007
- [22] Nirmalendu Bikas Sinha and R. Bera, «Investigating the Impact of Hybrid/SPREAD MIMO-OFDM System for Spectral-Efficient Wireless Networks» Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 2(3): 289-294, 2010.
- [22] R. Böhnke, K.-D. Kammeyer, « Weighted Sum Rate Maximization for MIMO-OFDM Systems with Linear and Dirty Paper Precoding », 7th International ITG Conference on Source and Channel Coding (SCC 08), Ulm, Germany, 14. - 16. January 2008.
- [23] T. Haustein, J. Eichinger, W. Zirwas, E. Schulz "Mimo-Ofdm For A Cellular Deployment - Concepts, Real-Time Implementation And Measurements Towards 3GPP-LTE", 15th European processing conference (EUSIPCO), Poland, 2007.
- [24] Tim C. W. Schenk "Performance Analysis of Zero-IF MIMO OFDM Transceivers with IQ Imbalance", Journal of communications, vol. 2, no. 7, December 2007.

- [25] Jooyeol Yang et Kyungwhoon Cheun, « Low Complexity Implementation of Alamouti Space-Time Coded OFDM Transmitters ». *Communications Letters, IEEE*, vol. 8, no4, pages 229–231, Avril 2004.
- [26] J. Smith, J. Woodhams, R. Marg, “Controller-Based Wireless LAN Fundamentals”, Cisco Systems, Inc, 2011.
- [27] Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification: High-Speed Physical Layer in the 5 GHz Band, IEEE 802.11a, Sept. 1999.
- [28] Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification, IEEE 802.11, 2007.
- [29] Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification: High-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band, IEEE 802.11b, Sept. 1999.
- [30] T. Kaiser, A. Wilzeck, M. Berentsen, X. Peng, L. Haering, S. Bieder, D. Omoke, A. Camargo, A. Kani, R. Tempel et F. Ancona, “ Smart Antennas in Europe - State of the Art. A MIMO Platform for Research and Education ». *EURASIP Book Series, EURASIP*, 2005.
- [31] Y. Guo et J.R. Cavallaro. « Scalable Architecture of MIMO Multi-carrier CDMA System on Programmable Logic ». In *Proc. IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ACSSC)*, (Pacific Grove, CA), pages 1976–1980, 4–7 Novembre 2007.
- [32] C. Mehlführer, M. Rupp, F. Kaltenberger et G. Humer. « A Scalable Rapid Prototyping System for Real-Time MIMO OFDM Transmissions ». In *Proc. IEEE/EURASIP Conference on DSPenableRadio*, (London, UK), page 7, 19–20 Septembre 2005.
- [33] X. Nieto, L.M. Ventura et A. Mollfulleda. *GEDOMIS : a broadband wireless MIMO-OFDM testbed, design and implementation* ». In *Proc. IEEE International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities (TRIDENTCOM)*, 1–3 Mars 2006.
- [34] L.M. Ventura, X. Nieto, J.-P. Gregoire, W. de Win et N. Lugil, « A Broadband Wireless MIMO-OFDM Demonstrator. Design and Measurement Results ». In *Proc. IEEE Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Symposium (PIMRC)*, (Helsinki, Finlande), pages 1–5, 11–14 Septembre 2006.
- [35] S. Boumard, M. Weissenfelt, H. Chi et J. Nurmi, « A Wireless MIMO STC OFDM System Implementation ». In *Proc. IEEE Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Symposium (PIMRC)*, (Helsinki, Finlande), pages 1–5, 11–14 Septembre 2006.

- [36] H. Yu, Kim M.-S., E.-Y. Choi, T. Jeon et S.-K. Lee, « Design and prototype development of MIMO-OFDM for next generation wireless LAN». IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 51, no4, pages 1134–1142, Novembre 2005.
- [37] H. Yu, K. Song, K. Ryu, Y. Kim, S. Min et S.-K. Lee, « Design and FPGA implementation of MIMO-OFDM based WLAN Systems ». In Proc. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Spring), vol. 3, (Melbourne, Vic.), pages 1333–1338, 7–10 Mai 2006.
- [38] P. Murphy, F. Lou, A. Sabharwal et J.P. Frantz, « An FPGA based rapid prototyping platform for MIMO systems ». In Proc. IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ACSSC), vol. 1, pages 900–904, 9–12 Novembre 2003.
- [39] P. Murphy, F. Lou, A. Sabharwal et J.P. Frantz, « Design of WARP : a Wireless Open-Access Research Platform ». In Proc. of the European Signal Processing Conference (EUSIPCO), 2006.
- [40] C. Hunter, J. Camp, P. Murphy, A. Sabharwal et C. Dick, « A Flexible Framework for Wireless Medium Access Protocols ». In Proc. IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ACSSC), pages 2046–2050, oct./nov. 2006. Invited paper.
- [41] S. Hara and R. Prasad, “Overview of multicarrier CDMA”, IEEE Communications Magazine, vol. 35, no. 12, pp. 126–133, 1997.
- [42] C.R. Nassar, B. Natarajan, Z. Wu, D. Wiegandt, S.A. Zekavat, “Multi-carrier technologies for wireless communication”, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [43] M. Hélar, R. Le Gouable, J. F. Helard et J. Y. Baudais, “Multicarrier CDMA techniques for future wideband wireless networks ” Annal. Télécom, vol. 56, pages 260–274, 2001.
- [44] Vincent Le Nir. Étude et optimisation des systèmes multi-antennes associés à des modulations multiporteuses. Thèse de doctorat d’électronique présentée à l’institut national des sciences appliquées de Rennes le 16 novembre 2004.
- [45] K. Adachi, F. Adachi and M. Nakagawa, “A Study on Channel Capacities of MC-CDMA MIMO and OFDM MIMO” IEEE. 2008.
- [46] S. M. Bahri , F.T. Bendimerad, “Performance of Adaptive Beamforming Algorithm for LMS-MCCDMA MIMO Smart Antennas”, The International Arab Journal of Information Technology, Vol. 6, No. 3, July 2009.
- [47] K. Kim, J. Ham, and Chung yong, “A Simple Code Allocation Algorithm Based on Asymptotic Analysis of MIMO MC-CDMA Systems in a Multi-Cell Environment” IEICE Trans. Commun., VOL.E90–B, NO.12 December 2007.

- [48] Juntti, M. Vehkaperä, M. Leinonen, J. Zexian, V. Tujkovic, D. Tsumura, S. Hara, S. « MIMO MC-CDMA communications for future cellular systems » IEEE Communications Magazine, Volume: 43 Issue: 2 2005
- [49] Benoît Le Saux, Maryline Hérald and Laurent Boher «Iterative Channel Estimation based on Linear Regression for a MIMO MC-CDMA system». IEEE Ninth International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications 2006.
- [50] P.-J. Bouvet and M. Hérald «Near Optimal Performance for High Data Rate MIMO MC-CDMA Scheme». Multi-Carrier Spread-Spectrum 2006, pp. 303-310,
- [51] N. Kumaratharan and P. Dananjayan. “Performance improvement in detection and estimation of MC-CDMA systems over MIMO channels »Computers & Electrical Engineering Volume 36, Issue 1, January 2010, Pages 224-233.
- [52] H. Zamiri-Jafarian M. Rajabzadeh. “SVD-based receiver for downlink MIMO MC-CDMA systems». IEEE international conference on Communications , 2009.
- [53] Stephan Sand, Fabrice Portier , and Jean-François Hérald. “Orthogonal STBC MC-CDMA System with Channel Estimation over Realistic High Mobility MIMO Channels”. Wireless world research forum 2006.
- [53] Shikha Nema, Aditya Goel and R.P. Sing. “Performance Analysis of DWDM-CDD- MC-CDMA System with Space Time Coding”. International Journal of Electronic Engineering Research ISSN 0975 - 6450 Volume 2 Number 1 pp. 135–144, 2010.
- [54] Ku Jeonghoe , Lee Changyong. “An MMSE-Nulling Partial-PIC Receiver for Multiuser Downlink MIMO MC-CDMA Systems” (Wireless Communication Technologies). IEICE Transactions on communications E88-B(4), 1725-1729, 2005.
- [55] Lokesh Kumar Bansal , Aditya Trivedi. “Comparative study of different space-time coding schemes for MC-CDMA systems”. International Journal of Communications, Network and Systems Sciences (IJCNS), April 1, 2010.
- [56] Fabrice Portier, Jean-Yves Baudais, Jean-François Hérald, «Performance of STBC MC-CDMA systems over outdoor realistic MIMO channels». Proceedings IEEE 60th Vehicular Technology Conference. 2006
- [57] Sivakasi, Tamil Nadu. “STBC MC - CDMA with Genetic Algorithm Based MUD for Wireless Multimedia Communications”. International Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications (ICCIMA 2007).
- [58] Bijan Golkar, Florence Danilo-Lemoine , “Space-time coding and spatial multiplexing in MIMO multicarrier CDMA”, The 18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC’07), 2007.

- [59] N.Kumaratharan,S. Jayapriya and P.Dananjayan «Performance Enhancement of MC-CDMA System through STBC based STTC Site Diversity» International Journal of Computer and Electrical Engineering, Vol. 2, No. 1, February, 2010.
- [60] J.M. Auffray, « Systèmes MIMO à porteuses multiples : étude et optimisation de la combinaison de codes temps-espace et des techniques MC-CDMA ». Thèse de Doctorat, Institut national des sciences appliquées de Rennes, Juin 2004.
- [61] H.Tao, N.Arumugam et G.H. Krishna, ‘’Performance of space-time coded MC-CDMA over time and frequency selective fading channel ‘’. In IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Mars 2002.

Annexe A - Situation financière

Intitule du projet de recherche : MIMO et Accès Multiples Avancés pour Réseaux Sans Fil

Chef de projet : Professeur BENDIMERAD Fethi Tarik

Laboratoire de Télécommunications (LTT 07) ; Université de TLEMCEM ; Organisme pilote : CERIST

ETAT DE CONSOMMATION DU BUDGET DE FONCTIONNEMENT PAR CHAPITRE

Chapitre	Libellé	Revenus DA	Consommation DA	Consommation %
34.01	REMBOURSEMENT DES FRAIS			
1	Frais de mission et de déplacement en Algérie et à l'étranger.	200 000,00		0
2	Rencontre Scientifiques : Frais d'organisation, d'hébergement, de restauration et de transport.			
3	Honoraires des enquêteurs.			
4	Honoraires des guides.			
5	Honoraires des experts et consultants.			
6	Frais d'études, de travaux et de prestations réalisés pour le compte de l'entité.			
34.02	MATERIEL ET MOBILIER			
1	Matériels et instruments scientifiques et audiovisuels.	300 000,00	161 460.00	53,82
2	Renouvellement du matériel informatique, achat accessoires, logiciels et consommables informatiques.	750 000,00	488 709.00	65,16
3	Mobilier de laboratoire.			
4	Entretien et réparation.	150 000,00		0
34.03	FOURNITURES			
1	Produits chimiques.			
2	Produits consommables.			
3	Composants électroniques, mécaniques et audio-visuels.			
4	Papeterie et fournitures de bureau.	100 000,00	64 350.00	64,35
5	Périodiques.			
6	Documentation et Ouvrages de recherche.			
7	Fournitures des besoins de laboratoires (animaux, plantes, etc.).			

34.04	CHARGES ANNEXES			
1	Impression et édition.			
2	Affranchissements postaux.			
3	Communications téléphoniques, Fax, Télex, Télégramme, Internet.			
4	Autre frais (Impôts et taxes, droits de douane, frais financiers, assurances, frais de stockage, et autres).			
5	Banque de données : acquisition et abonnement.			
34.05	PARC AUTOMOBILE			
1	Carburant et lubrifiants.			
2	Location de véhicule pour les travaux de recherche sur terrain.			
34.06	FRAIS DE VALORISATION ET DE DEVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE			
1	Frais de formation et d'accompagnement des porteurs de projets.			
2	Frais de la propriété intellectuelle : Recherche d'antériorité, Demande de dépôt de brevet, Dépôt de logiciel, Protection des obtentions végétales animales et autres, Frais des mandataires.			
3	Frais de conception et de définition du projet à mettre en valeur.			
4	Frais d'évaluation et de faisabilité du projet de valorisation : maturation et plan d'affaire.			
5	Frais d'expérimentation et de développement des produits à mettre en valeur.			
6	Frais d'incubation.			
7	Frais de service à l'innovation.			
8	Frais de conception et de réalisation de prototypes, maquettes, préséries, installations pilotes et démonstrations.			
Total		1 500 000,00	714 519,00	47,63

N. B. : D'autres opérations d'achat sont en cours de réalisation.

Annexe B - Contraintes rencontrées

L'expérimentation, le prototypage matériel ou la réalisation des maquettes et dispositifs destinés aux thèmes des technologies de l'information et de la communication mis en œuvre dans le cadre de l'exécution de notre projet, sont tributaires d'équipements modernes et parfois lourds et coûteux que notre laboratoire ne possède pas actuellement.

Notre Laboratoire manque de matériel informatique lourd (station) que nous ne pouvons acheter ni sur son budget de fonctionnement, ni même sur celui de notre PNR pour le moment.

Aussi, nous rencontrons des difficultés dans les dépenses de certains chapitres relatives au budget de fonctionnement (achat de matériels et instruments scientifiques et spécifiques par exemple, ...).

Annexe C - Publications internationales

Ces travaux ont fait l'objet de plusieurs publications à partir de l'année 2011 :

Publications internationales : (Auteurs en gras : Membres permanents et confirmés du Projet PNR)

1 - M. BENYAROU, **F. T. BENDIMERAD, F. DEBBAT,**

"Multi-User Detection for Multibeam-MIMO-Multi-Carrier-CDMA systems with MMSE adaptive algorithm"

International Journal of Computer Science Issues IJCSI, Volume 10, 2013.

<http://ijcsi.org/papers/IJCSI-10-3-1-195-200.pdf>

2 - A. BOUACHA, **F.T. BENDIMERAD,**

"Performance Study of the MCCDMA as physical Layer for Mobile WiMAX Technology", International Journal of Computer Networking, Wireless and Mobile Communications (IJCNWMC); ISSN (Print):2250-1568, Impact Factor(IJC): 2.5967. Feb 9, 2013.

<http://tjprc.org/journals.php?type=2&id=3>

3 - M. BENYAROU, **F. T. BENDIMERAD, F. DEBBAT,**

" Multi-User Detection by MMSE Adaptive Algorithm for multi-beam-MIMO-MC-CDMA using Sequences of References"

International Journal of Computer Applications IJCA, Volume 69, 2013.

<http://research.ijcaonline.org/volume69/number19/pxc3888267.pdf>

- 4 - S. FEROUANI, **F. DEBBAT, F.T.BENDIMERAD**,
 "Channel estimation performance with adaptive and non adaptive algorithms for MIMO OFDM systems",
 The Mediterranean Journal of Electronics and Communication, vol 9, No 2, 2013.
<http://www.medjtec.com/papers%20archive/index.html>
- 5 - **A. BENAMAR**, N. BELKHATIR, **F.T. BENDIMERAD**,
 Adaptive and Context-Aware Scenarios for Pervasive Technology-Enhanced Learning System,
 International Arab Journal of e-Technology- AJeT Vol. 3 N° 1, pp 58-67, 2013,
http://www.iajet.org/iajet_files/vol.3/no.1/Adaptive_and_Context-Aware_Scenarios_for_Pervasive_Technology-Enhanced_Learning_System.pdf
- 6 - **S. A. DJENNAS, F. T. BENDIMERAD**
 "Proposition of an Unexploited Multiple Access Technique",
 International Journal of Computer Science Issues, Vol. 9, No. 3, pp. 346-353, 2012.
<http://connection.ebscohost.com/c/articles/75184298/proposition-unexploited-multiple-access-technique>
- 7 - **F. DEBBAT, F. T. BENDIMERAD**
 "Radiation-pattern-optimization-by-Apicalis-Ant-algorithm-for-smart-Array-antennas".
 International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 3, Issue 11, November-2012 ISSN 2229-5518
<http://www.ijser.org/researchpaper%5CRadiation-pattern-optimization-by-Apicalis-Ant-algorithm-for-smart-Array-antennas.pdf>
- 8 - S. FEROUANI, **F. DEBBAT, F.T.BENDIMERAD**
 "Performance of RLS Algorithm in MIMO VBLAST-OFDM System",
 International Journal of Research and Reviews in Computer Science (IJRRCS) Vol. 3, No. 3, September 2012.
<http://connection.ebscohost.com/c/articles/82589927/performance-rls-algorithm-mimo-vblast-ofdm-system>
- 9 - A. BOUACHA, **F.T. BENDIMERAD**,
 "DMI-NCMA Beamforming Algorithm for Smart Antenna System",
 35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP).
 pp 217-216. 3-4 July 2012, ISBN 978-1-4673-1118-2.
- 10 - B. BENADDA, **F.T. BENDIMERAD**
 "Cooperative Multiagents Detection and Beamforming with Spatially Distributed Array Sensors"
 International Journal of Digital Information and Wireless Communications. Vol. 1, n° 2, February 2012.
<http://www.sdiwc.net/digital-library/web-admin/upload-pdf/00000122.pdf>
- 11 - **A. BENAMAR**, N. BELKHATIR, **F.T. BENDIMERAD**,
 An Aspect-oriented Middleware for Adaptation of Pervasive Systems,
 International Journal of Computer Science Issues (IJCSI), Vol. 9, Issue 3, No 2, pp 129-141, 2012,
<http://www.ijcsi.org/articles/An-aspectoriented-middleware-for-adaptation-of-pervasive-systems.php>

12 - M. BENYAROU, **F. DEBBAT, F. T. BENDIMERAD**

“Multi-User Detection for MIMO-Multi-Carrier CDMA Systems with STBC and Beamforming.”
International Journal of Research and Reviews in Computer Science (IJRRCS) Vol. 2, No. 2,
April 2011, <http://scholarlyexchange.org/ojs/index.php/IJRRCS/search/titles?searchPage=9>

13 - S. FEROUANI, G.ABDELLAOUI, **F. DEBBAT, F. T. BENDIMERAD**

“Study of Performance of the combined MIMO MMSE VBLAST-OFDM for Wi-Fi (802.11n)”
IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Vol. 30, Issue 5, No 1, September
2011 ISSN (Online): 1694-0814
<http://ijcsi.org/contents.php?volume=8&&issue=5>
<http://ijcsi.org/articles/Study-of-performance-of-the-combined-mim0-mmse-vblastofdm-for-wifi-80211n.php>

14 - S. FEROUANI, G. ABDELLAOUI, **F. DEBBAT, F. T. BENDIMERAD**

“Performance of MIMO VBLAST-OFDM in Ka-Band”
IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Vol. 30, Issue 5, No 1, September
2011 ISSN (Online): 1694-0814
<http://ijcsi.org/contents.php?volume=8&&issue=5>
<http://ijcsi.org/articles/Performance-of-mimo-vblastofdm-in-kaband.php>

15 - B. BENADDA, **F. T. BENDIMERAD**

“Cooperative Multiagents Detection and Beamforming with Spherical Array Sensors”
Digital Information Processing and Communications
Communications in Computer and Information Science, 2011, Volume 189, Part 15, 460-469,
DOI: 10.1007/978-3-642-22410-2_40
<http://www.springerlink.com/content/m463484m832rmpg1/>

16 - **A. BENAMAR**, N. BELKHATIR, **F. T. BENDIMERAD**,

‘A Comparative Study of Aspect-Oriented and Object-Oriented Implementations: Pervasive
System Use Case’,
Communications in Computer and Information Science, Vol 189, Issue 1, Digital Information
Processing and Communications, Part 7, pp. 178-192, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg
2011, DOI 10.1007/978-3-642-22410-2_15, <http://springerlink/content/n8u2571v37172868/>

Annexe D - Communications internationales

Ces travaux ont fait l'objet de plusieurs communications à partir de l'année 2011 :

1 - F. DEBBAT, F. T. BENDIMERAD

« Résolution du problème d'affectation des cellules aux commutateurs dans les réseaux mobiles par les algorithmes de colonies de fourmis. »

Third International Conference on Image and Signal Processing and their Applications, ISPA 12 2-3 Décembre 2012, Mostaganem, Algeria

2 - S. BERHAB, F. T. BENDIMERAD, S. M. BAHRI

Adaptive Beamforming Algorithm for MIMO Smart Antennas,
International Conference on Embedded Systems in Telecommunications and Instrumentation (ICESTI'12) november 5 – 7, 2012, Annaba, Algeria.

www.univ-annaba.org/ICESTI12/

3 -M. BENYAROU. F. DEBBAT, F. T. BENDIMERAD

'Performance du récepteur multi-utilisateurs appliqué à un système STBC-MIMO-MCCDMA à codage espace temps en bloc',

The sixth International Conference of Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunications, SETIT 2012, Sousse March 2012 Tunisia.

<http://www.setit.rnu.tn/final/P3386852.pdf>

4 - F. BENATEK, F. DEBBAT, F. T. BENDIMERAD

« Détection multi-utilisateurs à annulation d'interférences »,

Congres Méditerranéen de Télécommunications, Fès, Maroc, Mars 2012.

5 - A. BENAMAR, N. BELKHATIR,

'Performance Evaluation of a Generic Deployment Infrastructure for Component-based S/W Engineering',

Proceeding of 6th International Conference on Software Engineering Advances (ICSEA 2011), October 23-29, Barcelona, Spain, pp. 380-385, © IARIA, ISBN: 978-1-61208-165-6

http://www.thinkmind.org/index.php?view=article&articleid=icsea_2011_16_30_10190

6 - M. BENYAROU. F. DEBBAT, F. T. BENDIMERAD

« Détection Multiutilisateurs par Formation de Faisceaux en liaison descendante pour un Système MC-CDMA »

International Conference on Systems and Processing Information, May 15-17, 2011, Guelma, Algeria, www.univ-guelma.dz/icsip11/index.htm

7 - N. BELKHATIR, A. BENAMAR,

'Defining a Framework Supporting the Dynamic Deployment and Adaptation of Pervasive Systems',

Proceeding of 8th IEEE International Conference on e-Business Engineering (ICEBE 2011), October 19-21, pp. 376-379, Beijing, China,

<http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/ICEBE.2011.41>

8 - S. FEROUANI, F. DEBBAT, F. T. BENDIMERAD

"Etude des performances des systèmes SIMO-OFDM et MIMO-OFDM"

Colloque d'Informatique, Automatique et Electronique CIAE'2011, 24 et 25 Mars 2011, Mundiapolis, Casablanca, Maroc. <http://www.mundiapolis.ma>

9 - M. BENYAROU, **F. DEBBAT, F. T. BENDIMERAD.**

“Multiuser detection by beamforming for MIMO-MC-CDMA systems with STBC”

Colloque d’Informatique, Automatique et Electronique CIAE’2011, 24 et 25 Mars 2011, Mundiapolis, Casablanca, Maroc. <http://www.mundiapolis.ma>

10 - K. KRIM, **F. DEBBAT, F. T. BENDIMERAD**

“Etude des performances de l’OFD pour une transmission par satellite en bande KA”

Colloque d’Informatique, Automatique et Electronique CIAE’2011, 24 et 25 Mars 2011, Mundiapolis, Casablanca, Maroc. <http://www.mundiapolis.ma>

Communications nationales :

1 - S. FEROUANI, **F. DEBBAT, F. T. BENDIMERAD**

“Etude de la capacité d’un système de transmission à antenne multiples MIMO”,

2eme journée scientifique de la faculté de Mostaganem, 25 et 26 MAI 2011.

2 - M. BENYAROU. **F. DEBBAT, F. T. BENDIMERAD**

“Détection MMSE-IC mono-utilisateur et multi-utilisateurs pour un signal MIMO-MC-CDMA”

Séminaire sur les Systèmes de Détection : Architectures et Technologies (DAT’2011) Alger, avril 2011. <http://dat2011.enp.edu.dz>

Annexe E - Encadrement avec soutenance de thèses de Doctorat, de mémoires de Magister, de mémoires (PFE) de Master et d’Ingénieur en Télécommunications

Dans le cadre de l’exécution de ces travaux de recherche, plusieurs thèmes ont été proposés pour former des docteurs et Masters (LMD). En effet, ce projet de recherche rentre dans le cadre de la formation de Docteurs (F. BENATEK, S. FEROUANI, M. BENYAROU, S. BERHAB, ...) et dans le cadre de préparation d’habilitation à diriger la recherche (HDR) (F. DEBBAT, S.A. DJENNAS, A. BENAMAR, S.M. BAHRI : chercheurs impliqués aussi dans le projet).

Des thèmes de ce projet ont été proposés à des étudiants en post-graduation de la Faculté de Technologie, de l’Université Abou-Bekr Belkaid–Tlemcen, comme sujets de mémoire de thèse : Formation de troisième cycle (Doctorat LMD) en Télécommunications, option : Communications et réseaux sans fil.

Des sujets de projet de fin d’Etude de Masters et d’Ingéniorat d’Etat en Télécommunications, ont été aussi proposés.

Encadrement avec soutenance de thèses de Doctorat en Télécommunications :

Encadreur : Professeur F. T. BENDIMERAD (Responsable du projet)

1 - B. BENADDA, Détection coopérative multi-agents pour réseaux de capteurs. **Mai 2011.**

2 - S. M. BAHRI, Antennes MIMO adaptatives associées à des techniques de multiplexage et de modulations multi-porteuses. **Juin 2011.**

- A. BOUACHA, Détection auto-adaptative de liaisons de communication. **Avril 2012.**

3 - M. BENYAROU, Optimisation des performances des systèmes multi-antennes appliqués dans les systèmes MC-CDMA. **Juillet 2013.**

- 4 - F. Z. MAROUF, Etude et conception d'antennes imprimées pour identification radiofréquence RFID UHF (3^{ème} cycle LMD). **Septembre 2013.**
- 5 - S. FEROUANI, Traitement d'antennes adaptatives pour l'optimisation des performances des systèmes MIMO-OFDM dans les réseaux de télécommunications sans fil. **Avant juin 2014.**

Encadrement avec soutenance de mémoires de Magister en Télécommunications :

- 1 - S. BERHAB, Algorithmes adaptatifs pour des transmissions multi-antennes MIMO haut débit en réseaux sans fil. **Décembre 2011.** Encadrée par S. M. BAHRI et F. T. BENDIMERAD
- 2 - H. A. BAKIR, Exploitation de l'association des techniques MIMO-OFDM pour la transmission dans les réseaux locaux sans fil. **Mai 2012.** Encadré par F. DEBBAT et F. T. BENDIMERAD
- 3 - A. DELBAZ, Plate-forme logiciel pour les systèmes et réseaux de télécommunications sans fil de type MIMO-OFDM. **Avant juin 2014.** Encadré par F. DEBBAT et F. T. BENDIMERAD

Encadrement avec soutenance de mémoires (PFE) de Master et Ingénieur en Télécommunications (Réseaux et Systèmes) :

Masters :

- 1 - R. M. FEKAR, « Modélisation d'un modulateur et démodulateur OFDM et son application dans les systèmes de communications sans fil ». **Juillet 2011.**
Encadré par F. T. BENDIMERAD
 - 2 - S. BOUDALIA, « Etude de la capacité et des performances d'un système multi-antenne MIMO exploitant la diversité spatiale ». **Juillet 2011.** Encadrée par : F. T. BENDIMERAD.
 - 3 - M. BELKADI, « Etude et implémentation du système MC-CDMA pour la technologie Wimax ». **Juillet 2012.** Encadré par : A. BOUACHA
 - 4 - M. Y. BENDIMERAD, « Codage spatio temporel en bloc STBC associé à la technologie MIMO ». **Juillet 2012.** Encadré par : F. T. BENDIMERAD
 - 5 - M. Y. BOUGHERARA, « Etude des performances du système MIMO-MC-CDMA dans le domaine fréquentiel ». **Juillet 2012.** Encadré par : S. M. BAHRI
 - 6 - L. HADJAZ et A. BENFKIER, « Estimation du canal de transmission d'un système MIMO-VBLAST associé à la technique MCCDMA ». **Juillet 2013.** Encadrés par S. M. BAHRI.
 - 7 - S. MAHI et N. MEDJAHDI, « Etude et implémentation des codes LDPC pour la technologie WiMAX mobile IEEE 802.16^e ». **Juillet 2013.** Encadrées par : A. BOUACHA
 - 8 - A. HAMZAOUI, « Programmation récursive de la probabilité de détection pour les systèmes radar ». **Juillet 2013.** Encadré par : S. A. DJENNAS
 - 9 - M. ZERROUK, « Etude du QoS et du Handover dans les réseaux LTE (4G) ». **Juillet 2013.**
Encadrée par : A. BOUACHA
 - 10 - B. BENMOSTEFA et M. A. T. GOURARI, « Etude des performances du système MIMO à codage spatio-temporel associé à la modulation multi-porteuses MCCDMA ». **Juillet 2013.**
Encadrés par : M. BAHRI
 - 11 - Z. HADJ ADDA et A. BENMELANI, « Evaluation des antennes MIMO adaptatives pour des systèmes de transmission large bande ». **Octobre 2011.** Encadrés par : S. M. BAHRI.
- (Ingénieurs).**

Annexe F - Participation à des programmes de recherche

Projets CNEPRU :

- Projet de Recherche, n° J0202020100017, intitulé : Diversité et accès multiples pour réseaux sans fils (projet reconduit pour cette année).
- Nouveau projet de recherche, code : J0202020130094, Intitulé : Systèmes de communications à entrées, à sorties et à accès multiples et avancés pour réseaux sans fil (projet agréé à partir de l'année 2014).

Annexe G – Prototypes

Les prototypes et plates formes logiciel des systèmes conçus ou réalisés suivants dans le contexte de ce programme (projet) de recherche (trouveront leur exploitation dans diverses applications nouvelles dans le domaine des Télécommunications, en particulier dans les applications de communications et réseaux sans fil haut débit.

Ils seront certainement d'une utilité capitale dans l'amélioration des performances des caractéristiques radioélectriques des réseaux sans fil (débit, capacité, qualité et sécurité de service, bande passante, gain, rendement, directivité, adaptation, détection, etc.) et à des fins de télécommunications terrestres ou spatiales, à savoir :

- Prototypage logiciel d'une chaîne de transmission MIMO-OFDM.
- Prototypage logiciel de chaînes de transmission MIMO-CDMA et MIMO-MC-CDMA.
- Plate-forme logiciel pour les systèmes et réseaux de télécommunications sans fil de type MIMO-OFDM.
- Plate-forme logiciel pour les systèmes et réseaux de télécommunications sans fil de type MIMO-CDMA.
- Plate-forme logiciel pour les systèmes et réseaux de télécommunications sans fil de type MIMO-MC-CDMA.

Annexe H – Logiciels

Nous avons développé un bon nombre de codes (logiciels) de calcul qui traitent entre autres les techniques d'accès multiples et les systèmes à entrées et sorties multiples constituant ainsi une vraie plateforme pour une résolution assistée par ordinateur (C.A.O.) efficace et qui répond aux besoins actuelles et en perspectives du projet. L'ensemble de ces codes de calcul vont être par la suite compilés pour former un seul module qui se doit d'être performant, optimal et stable afin de répondre et d'une manière infaillible aux objectifs fixés, à savoir :

1. Simulateur d'une chaîne de transmission MIMO-VBLAST-OFDM.
2. Simulateur d'une chaîne de transmission MIMO-STBC-OFDM.
3. Simulateur d'une chaîne de transmission MIMO-MCCDMA.