



UNIVERSITÉ MOHAMMED V - AGDAL  
FACULTÉ DES SCIENCES  
Rabat



N° d'ordre 2431

22TF

## THÈSE DE DOCTORAT

Présentée par :

**Moulay Ahmed FAQIHI**

Discipline : Sciences de l'ingénieur

Spécialité : Informatique et Télécommunications

**Etude et Optimisation des Techniques MC-CDMA pour les  
Futures Générations de Transmission Radio Mobiles**

Soutenue le 22/01/2009

Devant le jury

Président :

Prof. Driss ABOUTAJDINE, PES (Faculté des Sciences de Rabat)

Examineurs :

Prof. Samir SAOUDI, PES (Telecom-Bretagne, Brest)

Prof. Abdellah ADIB, PES (FST, Mohammedia)

Prof. Abdellah AIT OUAHMAN, PES (ENSA, Marrakech)

Prof. Mohammed HAMRI, PES (FS, Rabat)

Prof. Benayad NSIRI, PA (FS Ain Chok, Casablanca)



**DOCTORAT**  
**Résumé de la Thèse\***

Discipline : Sciences de l'ingénieur

Spécialité : Informatiques et Télécommunications

UFR : Informatiques et Télécommunications

Responsable de l'UFR : Prof. Driss ABOUTAJDINE, PES

Période d'accréditation : 2005/2008

---

**Titre de la thèse : Etude et Optimisation des Techniques MC-CDMA  
pour les Futures Générations de Transmission Radio Mobiles**

---

Prénom, Nom : **Moulay Ahmed FAQIHI**

Résumé :

L'évolution rapide des systèmes de transmissions radio mobiles, ainsi que la demande croissante en terme de ressources radio mobiles, nécessitent une analyse judicieuse afin de proposer d'autres techniques alternatives plus robustes et qui garantissent, au système étudié, une bonne gestion des ressources disponibles tout en assurant une transmission fiable, sécurisée et avec le moindre d'erreurs possibles. Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes intéressés à l'évaluation de la chaîne de transmission numérique du système MC-CDMA, Le but était de proposer des algorithmes, moyennant la théorie de l'information, qui permettent d'améliorer la qualité de transmission.

En effet, nous avons proposé un premier schéma synoptique qui concatène les techniques Détecteur/Correcteur d'erreurs, d'une part, et les algorithmes de suppression d'interférences d'autre part, le schéma introduit aussi les algorithmes Hybrid ARQ basés sur la retransmission des trames erronées. Par la suite, nous avons proposé une nouvelle structure pour les algorithmes HARQ où on a exploité fortement l'architecture MIMO, cette nouvelle architecture, a été développée dans le cas d'une égalisation purement aveugle grâce à un algorithme de séparation de Sources qui considère que chaque signal provenant d'une antenne émettrice est une source d'information indépendante. Nous montrons que le schéma proposé réduit significativement la complexité des systèmes classiques tout en assurant des faibles taux d'erreur.

---

**Mots-clefs : OFDM, CDMA, SIC/PIC, Turbo-codes, Hybrid ARQ, MIMO, BSS.**

---

\* Le présent résumé sera publié conformément à l'article 10 du décret N° 96-796 du 19 Février 1997.



---

## RÉSUMÉ

L'évolution rapide des systèmes de transmissions radio mobiles, ainsi que la demande croissante en terme de ressources radio mobiles, nécessitent une analyse judicieuse afin de proposer d'autres techniques alternatives plus robustes et qui garantissent, pour le système étudié, une bonne gestion des ressources disponibles tout en assurant une transmission fiable, sécurisée et avec le minimum d'erreurs possibles. Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes intéressés à l'évaluation de la chaîne de transmission numérique du système MC-CDMA. Le but était de proposer des algorithmes, moyennant la théorie de l'information, qui permettent d'améliorer la qualité de transmission.

En effet, nous avons proposé un premier schéma synoptique qui concatène les techniques Détecteur/Correcteur d'erreurs ; d'une part, et les algorithmes de suppression d'interférences d'autre part, le schéma introduit aussi les algorithmes Hybrid ARQ basés sur la retransmission des trames erronées. Par la suite, nous avons proposé une nouvelle structure pour les algorithmes HARQ où on a exploité fortement l'architecture MIMO, cette nouvelle architecture, a été développée dans le cas d'une égalisation purement aveugle grâce à un algorithme de Séparation Aveugle de Sources qui considère que chaque signal provenant d'une antenne émettrice est une source d'information indépendante. Nous montrons que le schéma proposé réduit significativement la complexité des systèmes classiques tout en assurant de faibles taux d'erreurs.



---

## TABLE DES MATIÈRES

Résumé . . . . .	3
Abstract . . . . .	5
Avant-Propos . . . . .	7
Table des matières . . . . .	14
Table des figures . . . . .	17
1 Introduction . . . . .	23
2 L'étalement de Spectre et les modulations multi-porteuses . . . . .	27
2.1 Chaîne de transmission numérique . . . . .	27
2.1.1 Codage Source . . . . .	28
2.1.2 Codage de Canal . . . . .	28
2.1.3 L'Emetteur . . . . .	29
2.1.4 Le récepteur . . . . .	29
2.2 Techniques de transmission à Etalement de Spectre . . . . .	30
2.2.1 Principe de l'étalement de spectre par séquence directe . . . . .	31
2.2.2 Accès multiples . . . . .	34
2.2.3 Codes d'accès multiples des utilisateurs . . . . .	35
2.2.4 Quelques familles de séquences de codes d'étalement . . . . .	36
2.3 Modulations à porteuses multiples . . . . .	43
2.3.1 Historique . . . . .	43

2.3.2	Porteuses multiples à base de l'OFDM . . . . .	43
2.3.3	Porteuses multiples à base des ondelettes . . . . .	51
2.4	Conclusion . . . . .	56
<b>3</b>	<b>Canal de transmission radio mobile . . . . .</b>	<b>59</b>
3.1	Introduction . . . . .	59
3.2	Propagation des ondes en espace libre . . . . .	60
3.3	Propagation hors l'espace libre . . . . .	61
3.3.1	Phénomènes physiques de propagation dans un environnement réel .	62
3.4	Modélisation d'un canal de transmission numérique . . . . .	63
3.4.1	Influence du bruit . . . . .	63
3.4.2	Canal de transmission à trajets multiples . . . . .	65
3.5	Caractéristiques d'un canal de transmission multitrajets . . . . .	68
3.5.1	Les dispersions temporelles . . . . .	68
3.5.2	Les dispersions fréquentielles . . . . .	70
3.5.3	La notion de sélectivité . . . . .	71
3.5.4	La notion de diversité . . . . .	73
3.5.5	Cas OFDM . . . . .	73
3.6	Conclusion . . . . .	74
<b>4</b>	<b>Les techniques combinant l'étalement de spectre et les transmissions multi-porteuses . . . . .</b>	<b>77</b>
4.1	Introduction . . . . .	77
4.2	Les systèmes combinant l'étalement de spectre et les modulations multi- porteuses . . . . .	78
4.2.1	Les systèmes MC-DS-CDMA . . . . .	78
4.2.2	Les systèmes MT-CDMA . . . . .	78
4.2.3	Les systèmes MC-CDMA . . . . .	78
4.2.4	Les systèmes SS-MC-CDMA . . . . .	79
4.3	Les systèmes MC-CDMA . . . . .	79
4.3.1	Structure de l'Emetteur . . . . .	81
4.3.2	Structure du Récepteur . . . . .	82
4.3.3	Choix de longueur de code et de nombre de sous porteuses . . . . .	89
4.4	Techniques d'égalisation pour les systèmes MC-CDMA . . . . .	90
4.4.1	Notion de l'Egalisation . . . . .	90
4.4.2	La combinaison à gain maximal (MRC) . . . . .	94
4.4.3	La combinaison à gain égal (EGC) . . . . .	94

4.4.4	La combinaison à restauration d'orthogonalité (ORC) : Zero Forcing (ZF) . . . . .	95
4.4.5	La combinaison à erreur quadratique moyenne minimale (MMSE) . . . . .	95
4.4.6	Evaluation du système . . . . .	95
4.5	Le système MC-CDMA et les interférences d'accès multiple . . . . .	97
4.5.1	Introduction . . . . .	97
4.5.2	Technique de suppression successive d'interférences (SIC) . . . . .	98
4.5.3	Technique de suppression parallèle d'interférences (PIC) . . . . .	101
4.5.4	Suppression d'interférences pour les systèmes MC-CDMA . . . . .	104
4.6	Conclusion . . . . .	106
<b>5</b>	<b>Performances des systèmes MC-CDMA utilisant le codage Turbo et les algorithmes Hybrid ARQ . . . . .</b>	<b>109</b>
5.1	Introduction . . . . .	109
5.2	Codage de canal convolutif . . . . .	110
5.2.1	Introduction . . . . .	110
5.2.2	Représentation des codes convolutifs . . . . .	112
5.2.3	Décodage du codes convolutifs . . . . .	115
5.3	Turbo-codes . . . . .	115
5.3.1	Introduction . . . . .	115
5.3.2	Principe de Turbo-codage convolutif . . . . .	116
5.3.3	Principe de turbo-décodage : Treillis . . . . .	116
5.4	Log-Likelihood Ratio : Rapport de vraisemblance logarithmique . . . . .	118
5.5	Les techniques de transmission HARQ . . . . .	121
5.5.1	Introduction . . . . .	121
5.5.2	Les techniques de retransmission ARQ . . . . .	122
5.5.3	Techniques de combinaison ARQ . . . . .	123
5.5.4	Techniques de retransmissions HARQ pour un système MC-CDMA . . . . .	124
5.6	Conclusion . . . . .	131
<b>6</b>	<b>Algorithmes HARQ pour des applications MIMO . . . . .</b>	<b>133</b>
6.1	Introduction . . . . .	133
6.2	Systèmes de transmission MIMO . . . . .	134
6.2.1	Définition . . . . .	134
6.2.2	Capacité d'un Canal MIMO . . . . .	134
6.2.3	Diversité spatiale . . . . .	135
6.3	Egalisation aveugle par des algorithmes de séparation de sources . . . . .	135
6.3.1	Introduction . . . . .	135

---

6.3.2	Formulation du problème . . . . .	136
6.4	Algorithme Hybrid ARQ pour les systèmes MC-CDMA utilisant la SAS . .	137
6.4.1	Modèle du Système . . . . .	137
6.4.2	Simulations . . . . .	140
6.5	Conclusion . . . . .	142
<b>7</b>	<b>Conclusion . . . . .</b>	<b>143</b>
	<b>Bibliographie . . . . .</b>	<b>147</b>
	<b>Publications . . . . .</b>	<b>155</b>