



N° d'ordre : 04/2012

THESE DE DOCTORAT

Présentée par

Mr : Mohammed EL GHZAOUI

Spécialité :

Transmission et traitement de l'information

Sujet de la thèse :

**Optimisation des paramètres d'une Modulation Multi-
porteuses pour l'amélioration du débit des réseaux PLC**

Thèse présentée et soutenue à la FST de Fès le 10 juillet 2012, devant le jury composé de :

<i>Pr.</i> Moulhime EL BEKKALI	Vice Président de l'USMBA- Fès	Président
<i>Pr.</i> Abdelkebir EL AMRI	Professeur à l'EST- Casablanca	Rapporteur
<i>Pr.</i> Farid ABDI	Professeur à la FST- Fès	Rapporteur
<i>Pr.</i> Mounir RIFI	Directeur du Laboratoire RITM- EST UHII Casablanca	Rapporteur
<i>Pr.</i> Mostafa MRABTI	Directeur de l'ENSA de Fès	Examineur
<i>Pr.</i> Saad Dosse BENNANI	Professeur à l'ENSA de Fès	Examineur
<i>Pr.</i> Ali BENBASSOU	Directeur du Laboratoire LTTI- EST USMBA Fès	Co-directeur
<i>Pr.</i> Jamal BELKADID	Professeur à l'EST de Fès	Directeur de Thèse

Laboratoire d'accueil : Laboratoire de Transmission et Traitement de l'information

Etablissement : Ecole Supérieure de Technologie de Fès



Résumé

Les excellents résultats obtenus avec les techniques de modulation multi-porteuses dans les canaux multi-trajets, ont permis de les adopter pour la transmission des données haut débits, telle que les normes HomePlug A/V et WiMax mobile. Néanmoins, la technologie impose quelques inconvénients qui doivent être considérés lors de la conception d'un modem OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

La motivation principale de notre thèse, est de diminuer les erreurs de transmission se produisant au cours de la propagation d'un signal multi-porteuses sur un canal PLC tout en tenant compte des contraintes du débit. La robustesse des techniques multi-porteuses sur un canal PLC, ainsi que son efficacité ont été étudiées dans des réseaux domotiques complexes.

Nous avons constaté, d'une part que la modulation OFDM basée sur une mise en forme spectrale rectangulaire, possède des inconvénients notables comme une densité spectrale de puissance ayant des lobes secondaires très élevés et une mauvaise localisation temps-fréquence. D'autre part, l'OFDM a l'inconvénient d'un PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) élevé en raison du traitement parallèle d'un certain nombre de données à la fois tout en utilisant une transformée de Fourier rapide.

D'autres types de modulations ont alors été développés pour lutter contre ces problèmes. Pour palier au premier problème, nous avons proposé dans ce travail, une étude de la modulation OFDM suréchantillonné sur plusieurs aspects critiques des transmissions via un canal PLC (Power Line Communication). Pour le second inconvénient, nous avons proposé la modulation OFDM à enveloppe constante (CE-OFDM) qui permet de réduire le PAPR à 0dB.

Nous avons appliqués les techniques OFDM et OFDM suréchantillonnés et CE-OFDM au réseau PLC afin de réaliser une transmission fiable sur le réseau d'énergie. Nous avons aussi fait une étude détaillée de l'influence de la topologie du réseau PLC et des paramètres des modulations utilisées dans cette thèse afin d'améliorer la transmission sur le réseau d'énergie. Les résultats obtenus sont assez satisfaisant et nous avons trouvé un accord parfait entre les résultats de mesure et ceux de simulation.

Ce travail a été effectué dans le cadre du projet R&D établi entre Maroc Telecom et l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellah de Fés contrat N° 10510007559.06.PI (2008-2010) intitulé : "La transmission de l'information haut débit par réseau d'énergie électrique Power Line Communication (PLC) : aspect Compatibilité Electronique".

Mots clés : PLC, modulation OFDM, OFDM avec intervalle de garde, OFDM suréchantillonnée, densité spectrale de puissance, taux d'erreurs bits, CE-OFDM, PAPR, HomePlug.

Table des matières

INTRODUCTION GÉNÉRALE	7
CHAPITRE 1 : TRANSMISSION DE L'INFORMATION SUR LE RÉSEAU PLC.....	13
Introduction.....	13
1.1. La transmission de données par courant porteur en ligne	13
1.1.1. Le réseau des lignes d'énergie	14
1.1.2. Partitionnement du réseau électrique	14
1.1.3. Le réseau extérieur (Outdoor)	16
1.1.4. Le réseau intérieur (Indoor)	16
1.1.5. Fonctionnement des technologies PLC indoor	19
1.1.6. Couplage du signal haute fréquence sur le réseau électrique	19
1.2. Environnement de transmission PLC	20
1.2.1. Réponse du canal	20
1.2.2. Bruit rencontré pour les transmissions basées sur PLC	25
1.3. Contraintes de transmission en haute fréquence sur ligne d'énergie	28
1.3.1. Les limites à respecter.....	28
1.3.2. Respect des limites d'émissions électromagnétiques.....	28
1.3.3. Limitations définies aux accès de télécommunication	29
1.3.4. Limites d'émission utilisées en pratique	30
1.3.5. Les paramètres utilisés pour différents systèmes PLC	31
1.4. Description de la chaîne de transmission	31
1.4.1. Transmission basée sur PLC	31
1.4.2. Signal en bande de base.....	32
1.4.3. Description de la chaîne d'émission	33
1.4.4. La présentation succincte de la chaîne de réception	35
Conclusion	36
CHAPITRE 2 : CARACTÉRISATION ET IMPLÉMENTATION DE LA MODULATION MULTI-PORTEUSES DANS UN CONTEXTE PLC	37
Introduction.....	37
1.2. Description du signal OFDM en bande de base.....	37
2.1.1. Signal OFDM en bande de base	38
2.1.2. Analyse théorique du procédé de modulation/démodulation	40

2.1.3.	Intervalle de garde	42
2.2.	Calcul analytique de la densité spectrale de puissance	44
2.2.1.	Densité spectrale de puissance	44
2.3.	Les caractéristiques du signal OFDM	49
2.3.1.	Distribution du signal OFDM	49
2.3.2.	Définition et analyse du PAPR	51
2.4.	L'égalisation fréquentielle	54
2.5.	Chaîne de communication basée sur la modulation OFDM adaptée à la norme Homeplug	55
2.5.1.	Homeplug 1.0	56
2.5.2.	Homeplug AV	59
2.6.	Les avantages et les limites de l'OFDM	63
2.6.1.	Avantages	63
2.6.2.	Inconvénients	66
2.7.	OFDM suréchantillonné	67
2.7.1.	OFDM suréchantillonné à temps discret	68
2.7.2.	La localisation temps-fréquence	69
2.7.3.	La minimisation de l'énergie hors-bande	70
2.7.4.	Densité spectrale de puissance du signal OFDM suréchantillonné	70
2.7.5.	Application de différentes modulations OFDM sur un canal PLC	73
Conclusion	78
 CHAPITRE 3 : RÉDUCTION DE PAPR POUR L'OFDM DANS UN CONTEXTE PLC		79
Introduction	79
3.1.	Etat d'art de la technique de réduction de PAPR	79
3.1.1.	Clipping	79
3.1.2.	Codage	80
3.1.3.	Selected Mapping	81
3.1.4.	Partial Transmit Séquence	82
3.1.5.	Méthode de la Tone Reservation	84
3.2.	OFDM à constante enveloppe	89
3.2.1.	Description du signal CE-OFDM	89
3.2.2.	Spectral efficiency	92
3.2.3.	Egalisation dans le domaine fréquentiel FDE	94
3.2.4.	Récepteur CE-OFDM	95
3.2.5.	Diversité par trajets multiples du système CE-OFDM	99
Conclusion	101

CHAPITRE 4 : APPLICATION DE LA MODULATION CE-OFDM-CPM SUR LE RÉSEAU PLC	102
Introduction.....	102
4.1. CE-OFDM-CPM dans les canaux PLC	103
4.2. Egalisation fréquentielle.....	104
4.3. Résultats des mesures de la fonction de transfert du canal PLC	106
4.3.1. Influence des Branches	107
4.3.2. Influence des charges sur le réseau	109
4.4. Analyse expérimentale du débit.....	113
4.4.1. Mesure de débit sur un tronçon du réseau PLC sans rallonge.....	114
4.4.2. Mesure de débit sur un tronçon du réseau PLC en présence d'un bruit impulsif généré par générateur de fonction programmable	115
4.4.3. Mesure de débit sur un tronçon du réseau PLC avec et sans rallonge en présence de différent type de charge (effet du bruit indirect)	117
4.4.4. Mesure de débit sur le réseau PLC expérimental de longueur $L_c=17m$ en présence de différents types de charges (effet du bruit indirect)	118
4.5. Résultats de simulation	122
4.5.1. Influence du nombre de branche	123
4.5.2. Influence des charges résistives sur le TEB.....	123
4.5.3. Influence de différents appareils électriques sur le TEB de la liaison	124
4.5.4. L'Egaliseur MMSE contre ZF.....	126
4.5.5. Influence de la valeur de l'indice de modulation sur le TEB	127
4.5.6. L'influence de l'ordre de modulation et de l'indice de modulation sur l'efficacité spectrale du système CE-OFDM-CPM	128
4.5.7. Modulation OFDM contre CE-OFDM	131
Conclusion	134
CONCLUSION GÉNÉRALE	135
ANNEXE A : LIEN ENTRE LES MODULATIONS OFDM AVEC FORME D'ONDE ET LA THÉORIE DES BANCS FILTRES.....	139
ANNEXE B : GÉNÉRATION DES VALEURS RÉELLES DU SIGNAL OFDM AVEC LA TRANSFORMATION DE FOURIER DISCRÈTE	143
REFERENCES.....	148
