

الجزائرية الديمقراطية الشعبية الجمهورية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département d'Electronique

N° : ...../2023

## MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE: Télécommunications

SPECIALITE : Systèmes des Télécommunications

### Thème

**Transfert et sécurisation des images médicales par courant porteur en ligne**

Présenté Par : Roumaissa Amira

Encadré Par : Dr. Morad Grimes

Sabah Zazoua

Date de soutenance : ...../...../.....

#### Jury de Soutenance

Président : Faycel Boukerroum

MCA

Univ. MSB Jijel

Encadreur : Morad Grimes

MCA

Univ. MSB Jijel

Examineur 1 : Ammar Sokkou

MCA

Univ. MSB Jijel

Examineur 2 : A. R. ARID

Ingénieur

Société Sonelgaz-Jijel

Membre de l'incubateur : Abd El Karim Boukabou Pr

Univ. MSB Jijel

Promotion : 2022 /2023

## *Dédicaces*

*Nous dédions notre modeste travail avant tout à nos parents, qui ont tout sacrifié pour notre bien et qui ont éclairé notre route par leur compréhension, leur soutien, et leur amour.*

*À nos frères, nos sœurs, à nos plus chères, nos collègues spécialement du parcours Master Systèmes de Télécommunication, nous avons passé des années inoubliables.*

*À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de nos projets. Nous exprimons notre profonde gratitude.*

# *Remerciements*

*Louanges et gratitude à Toi, Ô Allah, le Créateur suprême, le Bienfaiteur ultime de toute chose. C'est avec humilité et reconnaissance que nous nous tournons vers Toi en ce moment solennel pour exprimer notre gratitude infinie pour ton soutien, ta guidance et ta miséricorde tout au long de notre parcours d'études et la réalisation de ce mémoire de fin d'études.*

*Au terme de cette étude, nous souhaitons remercier chaleureusement notre encadrant de mémoire Mr Grimes Morad pour son suivi et ses encouragements, ses orientations et ses précieux conseils, Nous remercions aussi tous nos professeurs qui, de près ou de loin ont contribué à notre formation*

*Un grand merci aussi à tous les membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'accepter d'évaluer et de juger notre travail.*

*Sans oublier de rendre un grand hommage à nos parents, frères et sœurs qui nous ont encouragés et aidés de toutes leurs ressources pour que nous puissions terminer notre projet.*

*Grâce à vos encouragements, nous avons pu surmonter les obstacles, relever les défis et atteindre nos objectifs académiques. Votre soutien indéfectible et votre amour inconditionnel ont été une source d'inspiration et de motivation tout au long de notre parcours. Vos valeurs, votre éthique de travail et votre exemple nous ont guidés, façonnant nos personnalités et nos aspirations. Nous sommes profondément reconnaissants de l'immense impact que vous avez eu sur nos vies, et nous sommes fiers des individus que nous sommes devenus grâce à vous.*

***Roumaissa & Sabah***

# Résumé

L'objectif principal de ce projet est de développer un système efficace et sécurisé pour le transfert d'images médicales entre différents acteurs du domaine de la santé à l'intérieur de leurs lieux de travail tels que les hôpitaux, les cliniques et les laboratoires, en utilisant la technologie des courants porteurs en ligne qui est une technique permettant la transmission de données à travers le réseau électrique existant. Ce faisant, on pourra non seulement optimiser l'usage des câbles électriques afin qu'ils assurent le transport des données numériques, mais aussi compléter le réseau de communication existant. Après avoir mis en évidence l'efficacité de la modulation multiporteuses, nous avons retenu la modulation multiporteuse OFDM comme étant la technique de transmission appropriée, combinée à un algorithme de chiffrement basé sur le chaos pour renforcer la sécurité des données médicales transférées.

**Mots clés : Réseau CPL, OFDM, modélisation, sécurisation.**

## Abstract

The main objective of this project is to develop an efficient and secure system for the transfer of medical images among different stakeholders in the healthcare field within their workplaces such as hospitals, clinics, and laboratories, using the Power Line Communication technology, which is a technique that enables data transmission through the existing electrical network lines. By doing so, we can not only optimize the use of electrical lines to carry digital data but also complement the existing communication network. After highlighting the effectiveness of multi-carrier modulation, we have chosen Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) as the appropriate transmission technique, combined with a chaos-based encryption algorithm to enhance the security of the transferred medical data.

**Key words: PLC network, OFDM, modelling, security.**

## ملخص

الهدف الرئيسي لهذا المشروع هو تطوير نظام فعال وآمن لنقل الصور الطبية بين مختلف جهات الرعاية الصحية داخل أماكن عملهم مثل المستشفيات والعيادات والمختبرات، باستخدام تقنية حامل التيار الكهربائي عبر الانترنت. وهي تقنية تسمح بنقل البيانات عبر الشبكة الكهربائية الموجهة. ومن خلال ذلك، يمكننا ليس فقط تحسين استخدام الكابلات الكهربائية لضمان نقل البيانات الرقمية، ولكن أيضاً استكمال الشبكة الاتصالات الموجودة. بعد إظهار فعالية التردد المتعدد، اخترنا تعدد الحاملات المتعامدة المتعدد كتقنية نقل مناسبة، بالإضافة إلى خوارزمية تشفير معتمدة على الفوضى لتعزيز أمان البيانات الطبية المنقولة. **الكلمات المفتاحية** □ التيار الحامل، التعدد الترددي المتعامد المتعدد، النمذجة، التأمين.

---

# Table des matières

---

<b>Table des matières</b>	<b>i</b>
<b>Liste des acronymes</b>	<b>v</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>vi</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>vii</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>

## Chapitre I

### Technologie des courants porteurs en ligne

I.1 Introduction.....	3
I.2 Historique .....	3
I.3 Principe de fonctionnement de la technologie CPL.....	5
I.4 Classification des réseaux électriques .....	6
I.4.1 Réseaux haut tension (HT) .....	6
I.4.2 Réseaux moyenne tension (MT) .....	7
I.4.3 Réseaux basse tension (BT) .....	7
I.5 Méthode de couplage du réseau électrique .....	7
I.5.1 Couplage capacitive .....	8
I.5.2 Couplage inductive .....	8
I.6 Classification des systèmes CPL .....	8
I.6.1 Classification selon le débit .....	8
I.6.2 Classification selon l'architecture.....	9
I.6.2.1 « Outdoor » .....	9
I.6.2.2 « Indoor » .....	10
I.7 Normes et standardisation.....	10
I.8 Cadre juridique et réglementation .....	11
I.9 Equipement du CPL .....	12
I.10 Applications du CPL .....	13
I.10.1 Réseau intelligent.....	13
I.10.2 Comptage intelligent.....	13

I. 10.3 Promotion de la télémédecine.....	14
I. 10.4 Communication embarqué .....	14
I.11 Conclusion .....	15

## **Chapitre II**

### **Techniques de communication numérique**

II.1 Introduction.....	16
II.2 Type de modulation numérique.....	16
II.2.1 Modulation d’amplitude ASK.....	16
II.2.2 Modulation de fréquence FSK.....	17
II.2.3 Modulation de Phase PSK.....	18
II.2.4 BPSK.....	19
II.2.5 QPSK.....	20
II.3 Code Division Multiple Access CDMA.....	20
II.4 Étalement de spectre par séquence directe.....	21
II.5 Orthogonal Frequency Division Multiplexing OFDM.....	22
II.5.1 FDM.....	22
II.5.2 OFDM.....	22
II.5.2.1 Principe de la modulation.....	23
II.5.2.2 Principe de la démodulation.....	24
II.6 Implémentation de IFFT et FFT.....	25
II.6.1 IFFT (Inverse Fast Fourier Transform).....	25
II.6.2 FFT (Fast Fourier Transform).....	25
II.6.2.1 Notion d’orthogonalité.....	26
II.7 Les Problèmes d’interférences.....	27
II.7.1 L’interférence intersymbole (ISI).....	27
II.7.2 L’interférence interporteuse (ICI).....	27
II.8 L’intervalle de garde.....	28
II.9 Préfixe cyclique.....	28
II.10 Conclusion.....	29

## Chapitre III

### Modélisation des canaux CPL

III.1 Introduction.....	30
III.2 Analyse des canaux CPL.....	30
III.2.1 Approche ascendante « Bottom-up ».....	30
III.2.1.1 Détermination la fonction de transfert par matrice S.....	31
III.2.2 Approche descendante « Top-Down ».....	32
III.2.2.1 Modèle de Zimmerman.....	32
III.2.2.2 Autres modèles.....	35
III.3 Modélisation du bruit additif.....	36
III.3.1 Bruit de fond coloré.....	36
III.3.2 Bruit impulsionnel.....	37
III.4 Techniques de réduction du bruit impulsif.....	38
III.4.1 Clipping.....	38
III.4.2 Blanking.....	38
III.4.3 Clipping / Blanking.....	39
III.5 Sécurité des systèmes CPL.....	39
III.5.1 Cryptographie.....	39
III.5.2 Classes des algorithmes cryptographiques.....	40
III.5.2.1 Algorithmes de chiffrement asymétrique.....	41
III.5.2.2 Algorithmes de chiffrement symétrique.....	41
III.6 Systèmes chaotiques.....	42
III.6.1 Fonctions chaotiques.....	42
III.6.2 Propriétés des systèmes chaotiques.....	43
III.6.2.1 Non- linéarité.....	43
III.6.2.2 Déterministe.....	43
III.6.2.3 Sensibilité aux conditions initiales.....	43
III.7 Conclusion.....	44

## **Chapitre IV**

### **Transmission robuste des images médicales sur les réseaux CPL**

IV.1 Introduction.....	45
IV.2 Implémentation sur Matlab.....	45
IV.3 Implémentation du système OFDM.....	45
IV.3.1 Paramètres d'évaluation.....	48
IV.4 Implémentation du model de canal.....	51
IV.5 Applications de l'algorithme proposé.....	51
IV.5.1 Algorithme de chiffrement proposé.....	52
IV.6 Résultats de simulations.....	54
IV.7 Conclusion.....	55
Conclusion générale.....	57
Références biblio-webographiques.....	58

---

## Liste des Acronymes

---

<b>AES</b>	<b>A</b> dvanced <b>E</b> ncryption <b>S</b> tandard
<b>ARCEP</b>	Autorité de <b>R</b> égulation <b>C</b> ommunication <b>E</b> lectroniques des <b>p</b> ostes
<b>ASK</b>	<b>A</b> mplitude <b>S</b> hift <b>K</b> eying
<b>BPSK</b>	<b>B</b> inary <b>P</b> hase <b>S</b> hift <b>K</b> eying
<b>BT</b>	<b>B</b> asse <b>T</b> ension
<b>CDMA</b>	<b>C</b> arrier <b>D</b> ivision <b>M</b> ultiple <b>A</b> ccess
<b>CFS</b>	<b>C</b> arrier <b>F</b> requency <b>S</b> ystem
<b>CP</b>	<b>C</b> yclic <b>P</b> refix
<b>CPL</b>	<b>C</b> ourant <b>P</b> orteur en <b>L</b> igne
<b>DES</b>	<b>D</b> ata <b>E</b> ncryption <b>S</b> tandard
<b>DS-CDMA</b>	<b>D</b> irect <b>S</b> equence <b>C</b> arrier <b>D</b> ivision <b>M</b> ultiple <b>A</b> ccess
<b>DSP</b>	<b>D</b> ensité <b>S</b> pectrale <b>d</b> e <b>P</b> uissance
<b>FDM</b>	<b>F</b> requency <b>D</b> ivision <b>M</b> ultiplexing
<b>FFT</b>	<b>F</b> ast <b>F</b> ourier <b>T</b> ransform
<b>FH-CDMA</b>	<b>F</b> requency <b>H</b> op <b>C</b> arrier <b>D</b> ivision <b>M</b> ultiple <b>A</b> ccess
<b>FIIPS</b>	<b>F</b> ederal <b>I</b> nformation <b>P</b> rocessing <b>S</b> tandard
<b>FSK</b>	<b>F</b> requency <b>S</b> hift <b>K</b> eying
<b>HT</b>	<b>H</b> aut <b>T</b> ension
<b>IAM</b>	<b>I</b> nterference <b>A</b> ccess <b>M</b> ultiple
<b>ICI</b>	<b>I</b> nter <b>C</b> arrier <b>I</b> nterference
<b>IFFT</b>	<b>I</b> nverse <b>F</b> ast <b>F</b> ourier <b>T</b> ransform
<b>ISI</b>	<b>I</b> nter <b>S</b> ymbol <b>I</b> nterference
<b>LED</b>	<b>L</b> ight <b>E</b> mitting <b>D</b> iode
<b>MT</b>	<b>M</b> oyenne <b>T</b> ension
<b>OFDM</b>	<b>O</b> rthogonal <b>F</b> requency <b>D</b> ivision <b>M</b> ultiplexing
<b>PSK</b>	<b>P</b> hase <b>S</b> hift <b>K</b> eying
<b>QPSK</b>	<b>Q</b> uadrature <b>P</b> hase <b>S</b> hift <b>K</b> eying
<b>RSA</b>	<b>R</b> ivest- <b>S</b> hamir- <b>A</b> dleman
<b>TDMA</b>	<b>T</b> ime <b>D</b> ivision <b>M</b> ultiple <b>A</b> ccess
<b>TEB</b>	<b>T</b> aux d'erreur du <b>B</b> it
<b>WDM</b>	<b>W</b> avelength <b>D</b> ivision <b>M</b> ultiplexing

---

## Liste des Figures

---

### Chapitre I

<b>Figure I.1</b>	Principe de fonctionnement du CPL.....	5
<b>Figure I.2</b>	Architecture d'installation du CPL.....	6
<b>Figure I.3</b>	Exemple d'une architecture CPL outdoor [4] .....	9
<b>Figure I.4</b>	Exemple d'une architecture CPL indoor [4].....	10
<b>Figure I.5</b>	Boitiers CPL.....	12

### Chapitre II

<b>Figure II.1</b>	Modulation d'amplitude ASK.....	16
<b>Figure II.2</b>	Modulation de fréquence FSK.....	17
<b>Figure II.3</b>	Modulation de phase PSK.....	18
<b>Figure II.4</b>	Diagrammes de constellation BPSK et QPSK.....	19
<b>Figure II.5</b>	Principe de l'étalement du spectre.....	20
<b>Figure II.6</b>	L'utilisation de la bande passante en FDM et OFDM.....	21
<b>Figure II.7</b>	Schéma bloc de l'émission et récepteur OFDM .....	22
<b>Figure II.8</b>	Principe de modulateur OFDM.....	23
<b>Figure II.9</b>	Principe de démodulateur OFDM.....	24
<b>Figure II.10</b>	Exemple d'une base orthogonale.....	25
<b>Figure II.11</b>	Interférences entre porteuses ICI.....	26
<b>Figure II.12</b>	L'intervalle de garde.....	27
<b>Figure II.13</b>	Préfixe cyclique .....	27

### Chapitre III

<b>Figure III.1</b>	Les ondes incidentes et réfléchies dans un réseau à deux port.....	30
<b>Figure III.2</b>	Propagation par trajet multiple du signal.....	32
<b>Figure III.3</b>	Réponse fréquentielle généré par le modèle top-down de Zimmermann .....	33
<b>Figure III.4</b>	Réponse impulsionnelle généré par le modèle top-down de Zimmermann .....	33
<b>Figure III.5</b>	Densité spectrale du bruit impulsif.....	38
<b>Figure III.6</b>	Chiffrement symétrique.....	41
<b>Figure III.7</b>	Cartes chaotiques et leurs sensibilités aux conditions initiales.....	42

### Chapitre IV

<b>Figure IV.1</b>	Image médicale originale de taille 256x256.....	45
<b>Figure IV.2</b>	Schéma bloc de la modulation OFDM avec bruit additif .....	45
<b>Figure IV.3</b>	Signal temporelle transmis .....	45
<b>Figure IV.4</b>	Signal temporelle modulé et transmis a travers le canal de transmission .....	46
<b>Figure IV.5</b>	Signal temporelle démodulé .....	46
<b>Figure IV.6</b>	Variation du pourcentage d'erreurs et du BER en fonction du SNR .....	48
<b>Figure IV.7</b>	Image de récue a travers d'un canal de transmission avec bruit additif.....	49
<b>Figure IV.8</b>	Schéma bloc d'un processus de transfert d'image sur un canal CPL.....	51
<b>Figure IV.9</b>	Organigramme de l'algorithme proposé.....	52
<b>Figure IV.10</b>	Image originale et son histogramme avant le bloc OFDM.....	53
<b>Figure IV.11</b>	Image chiffré par l'algorithme proposé et son histogramme.....	53
<b>Figure IV.12</b>	image récue déchiffrée apres passage dans le canal CPL et son histogramme... ..	54

---

# Liste des Tableaux

---

## Chapitre III

<b>Tableau III.1</b> Paramètres $g_i$ et $d_i$ du canal CPL pour chaque chemin .....	34
<b>Tableau III.2</b> Cartes chaotiques continues et discrètes .....	41

## Chapitre IV

<b>Tableau IV.1</b> Résultats des différents paramètres en fonction du SNR pour les différents types de modulation numérique.....	47
<b>Tableau IV.2</b> Les cartes chaotiques utilisées pour le chiffrement .....	52

---

# **Introduction générale**

---

# Introduction générale

De nos jours, les réseaux informatiques jouent un rôle essentiel dans la transmission des données entre utilisateurs. Grâce à une variété de supports de transmission disponibles, ces réseaux facilitent l'échange d'informations à travers différentes plateformes. Que ce soit par le biais de câbles physiques ou de connexions sans fil, Les médias de communication filaire ont connu des évolutions telles que les câbles à paires torsadées et les câbles coaxiaux, tandis que les réseaux sans fil utilisent des liaisons hertziennes basées sur les ondes électromagnétiques. Les liaisons par satellite sont particulièrement utilisées pour les transmissions transocéaniques, tandis que le Wi-Fi est très répandu. Malgré les progrès importants réalisés dans la recherche sur les médias de communication, ces technologies rencontrent encore certaines difficultés, ce qui incite les chercheurs à se concentrer sur la résolution de ces problèmes.

Les réseaux électriques offrent une solution à cette problématique grâce à la technologie du CPL. En effet, tous les abonnés à l'électricité sont connectés entre eux via le réseau électrique, ce qui permet d'utiliser ce dernier comme support physique pour un réseau informatique. Ainsi, il devient possible de transmettre des données sans avoir besoin de créer de nouvelles infrastructures.

Au cours des dernières décennies, les systèmes de communication ont connu une évolution significative dans tous les domaines de la société, y compris la médecine. Il devient possible de transmettre des données médicales via les réseaux CPL sans nécessiter l'installation de câbles supplémentaires ou de réseaux sans fil autonomes, simplifiant ainsi l'adoption de la technologie et réduisant les coûts.

L'objectif principal de cette recherche est de développer un système de transmission des données médicales par CPL. Nous explorerons également les mesures de sécurité nécessaires pour protéger la confidentialité et l'intégrité de ces données sensibles lorsqu'elles sont transmises via le CPL.

La recherche sera menée en utilisant une approche méthodique, comprenant une revue approfondie de la littérature scientifique existante sur le sujet, des expérimentations pratiques et des analyses comparatives. Nous analyserons les protocoles de transmission du CPL, les aspects de sécurité et les performances de transfert des images médicales, en mettant l'accent sur la qualité, la vitesse et la fiabilité de la transmission.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres, chacun abordant un aspect spécifique de la recherche. Voici un aperçu de la structure et du contenu de chaque chapitre :

**Chapitre 1 :** Le premier chapitre explore en détail les réseaux CPL en tant que méthode de transmission pour les communications numériques. Il présente les principes fondamentaux des CPL.

**Chapitre 2 :** Ce chapitre se concentre sur les techniques de communication numérique utilisées. Il explore différentes méthodes de codage et de modulation pour une transmission efficace des données numériques

**Chapitre 3 :** Ce chapitre examine la modélisation des canaux de transmission CPL. Il explique comment modéliser et caractériser les canaux CPL à l'aide de techniques de modélisation mathématique et de simulation. Les paramètres clés de modélisation, tels que le bruit, et l'atténuation.

**Chapitre 4 :** Le dernier chapitre se concentre sur la transmission robuste des images médicales sur les CPL. Il décrit en détail les algorithmes proposés et les méthodes mises en œuvre pour assurer une transmission fiable des images médicales.

Enfin, on termine par une conclusion générale et quelques perspectives ouvertes pouvant être envisagées comme suite à notre projet.

---

**Chapitre I**

**Technologie des courants porteurs**

**En ligne**

---

## I.1 Introduction

Les courants porteurs en ligne sont une technologie de communication qui utilise les lignes électriques existants pour transmettre des signaux numériques. Les données sont transmises à travers les fils électriques et peuvent être captées par des récepteurs CPL connectés au même réseau électrique. Les CPL ont été développés comme une alternative aux technologies de communication filaires et sans fil, et ils sont souvent utilisés pour fournir des services de communication haut débit dans les zones où les autres technologies ne sont pas disponibles ou sont coûteuses à mettre en place.

L'objectif de ce chapitre est de fournir les bases de notre compréhension du CPL en explorant ses fondements essentiels et en mettant en évidence les multiples applications qu'il offre. Nous commencerons par examiner les principes de cette technologie fascinante, en expliquant comment les données peuvent être transmises à travers les fils électriques qui alimentent nos maisons et nos entreprises.

Ce chapitre introductif fournit donc une vue d'ensemble des concepts clés liés au CPL, préparant ainsi le terrain pour les chapitres suivants qui exploreront en détail chaque aspect de cette technologie fascinante et en constante évolution.

## I.2 Historique

L'histoire des réseaux CPL remonte au début du 20<sup>ème</sup> siècle, lorsque des scientifiques ont commencé à explorer la possibilité de transmettre des signaux électriques à travers des fils électriques. Les recherches ont continué au fil des décennies, et des progrès ont été réalisés dans les techniques de modulation et de démodulation des signaux de haute fréquence sur les fils électriques. Au cours des années 1980, des expériences ont été menées avec des CPL pour transmettre des signaux de communication bas débit, tels que les données de télésurveillance

En 1920, l'utilisation de systèmes à fréquences porteuses (CFS) sur des lignes haute tension a permis de transmettre des consignes de commande et de faire du monitoring. La fréquence des porteuses était comprise entre 15 et 500 kHz. Une puissance émise de 10 W était souvent suffisante pour couvrir des distances de plus de 500 km. Ces lignes à hautes tensions se révélaient être de bons canaux de transmission à ces fréquences [1].

En 1975, l'évolution des produits a permis une communication bidirectionnelle. Parmi les leaders de ce marché, on peut citer par exemple, l'entreprise 'General Electric' qui développa le relevé de compteurs à distance 'AMR'. En 1980, des recherches ont été menées afin de caractériser

les propriétés du réseau électrique en tant que support pour le transfert de données. Le rapport signal sur bruit et l'atténuation du signal par le réseau électrique étaient les principales mesures réalisées. L'utilisation des réseaux de distribution électrique pour la diffusion de données (multimédia, informatique,...) est apparue en 1990 avec le développement de l'Internet [1].

En 1997, les premiers tests de transmission de signaux de données bidirectionnelles sur le réseau électrique ont été réalisés. Le coût séduisant de la technologie CPL et les récents progrès réalisés dans les domaines des communications numériques et du traitement de signal ont permis aux CPL de connaître un regain d'intérêt durant les dix dernières années. Plusieurs alliances entre différentes associations et groupes industriels se sont formées dans le but de promouvoir la technologie CPL. Parmi ces associations, on peut nommer l'alliance internationale HomePlug créée en 2000 qui compte plusieurs industriels tel que EDF, France Telecom, Sony et d'autres. On retrouve également l'alliance 'Power Line Communication Association' (PLCA) en Amérique du nord et 'Power Line Communication Japan' (PLC-J) qui ont été créées respectivement en 2001 et 2003. La technologie CPL a bien évolué durant ces quelques dernières années. Différents essais ont été effectués afin de mettre en évidence la faisabilité de la technologie CPL dans les applications domestiques (accès internet, mise en réseau des appareils électriques, ...) et d'analyser les éventuels problèmes liés à la mise en œuvre de cette technologie [1].

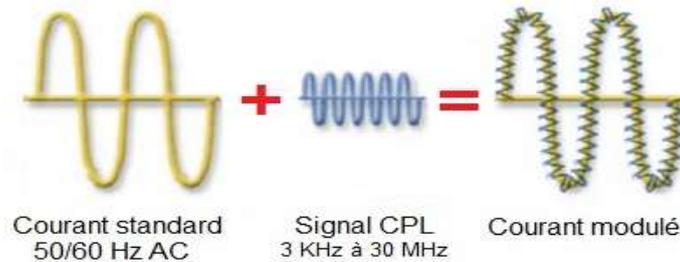
En 2005, la technologie CPL est commercialisée dans le monde entier. On note l'arrivée de la norme HomePlug 1.1 turbo 85Mbits est le début de réglementation au niveau européen.

En 2007, on trouve des modems à hauts débits arrivant jusqu'à 200 Mbits/s tel le HomePlug AV 200 Mbits/s. La technologie CPL présente de nouvelles fonctionnalités à prix abordable. La société IEEE prévoit la mise en œuvre d'une norme commune permettant l'interopérabilité des différents systèmes CPL [1].

Aujourd'hui, les CPL sont largement utilisés dans le monde entier pour fournir des services de communication haut débit aux utilisateurs domestiques et professionnels. La technologie des CPL continue de s'améliorer et de se développer, avec des entreprises qui cherchent à augmenter les vitesses de transmission, à réduire les coûts et à améliorer la sécurité. Les CPL ont encore des limites, mais leur utilisation est en constante évolution et leur potentiel est immense pour les services de communication du futur.

### I.3 Principe de fonctionnement de la technologie CPL

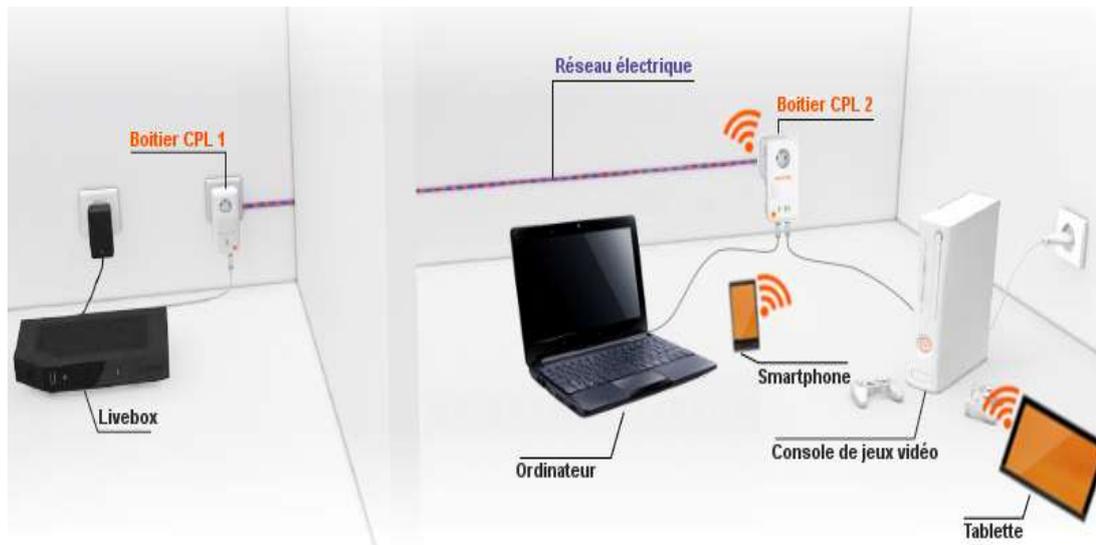
Le principe de fonctionnement des CPL repose sur l'utilisation d'ondes hautes fréquences pour transmettre des signaux à travers les câbles électriques domestiques. Ces signaux hautes fréquences sont superposés aux signaux basse fréquence de l'alimentation électrique (fréquences égale à 50 Hz ou 60 Hz selon les pays), qui est normalement utilisée pour l'éclairage et les appareils électroménagers.



**Figure I.1** Principe de fonctionnement du CPL

Les fréquences radio sont injectées sur le réseau électrique à travers des boîtiers CPL, un boîtier émetteur et un boîtier récepteur. Le boîtier émetteur est branché sur une prise électrique près du routeur Internet, et il envoie les données à travers les câbles électriques du domicile en utilisant des ondes de haute fréquence (1–30 MHz). Le boîtier récepteur est branché sur une prise électrique à proximité de l'appareil qui doit recevoir les données, comme un ordinateur ou une télévision connectée. Il récupère les signaux CPL transportés par les ondes radiofréquences et les convertit en signaux numériques [2].

Les signaux CPL peuvent circuler simultanément à travers les câbles électriques sans interférence grâce au principe de superposition, qui utilise une opération de couplage inductif ou capacitif pour transférer l'information sur les lignes d'énergie. Les coupleurs doivent assurer une séparation galvanique efficace entre les lignes électriques et les appareils de communication, et ils agissent en réception comme un filtre passe-haut pour séparer les signaux d'information des signaux de puissance. De cette façon, les signaux CPL peuvent être acheminés de manière efficace et fiable à travers les câbles électriques, sans perturber le fonctionnement des autres équipements électriques dans la maison ou le bâtiment [3]. La figure ci-dessous exprime l'architecture d'installation du CPL



**Figure I.2** Architecture d'installation du CPL

## I.4 Classification des réseaux électriques

Les CPL offrent une solution pratique et économique pour établir des connexions réseau supplémentaires sans nécessiter de nouveaux câblages dédiés. Par conséquent, la classification des réseaux électriques selon la tension demeure pertinente dans le contexte des CPL, car elle permet de prendre en compte les particularités et les normes propres à chaque catégorie lors de la mise en place de ces réseaux intelligents. Que ce soit pour le déploiement de CPL dans les réseaux domestiques (BT), les réseaux d'entreprises (MT) ou les infrastructures publiques (HT), cette classification aide à garantir la compatibilité, la sécurité et les performances optimales des systèmes CPL intégrés.

### I.4.1 Réseau Haut Tension (HT)

Les réseaux HT sont des infrastructures essentielles pour la transmission de l'énergie électrique sur de longues distances. Ces réseaux sont utilisés pour acheminer l'électricité produite par les centrales électriques vers les centres de consommation, tels que les zones urbaines et industrielles. Les réseaux HT fonctionnent généralement à des tensions supérieures à 60 000 Volts (60 kV) et peuvent atteindre plusieurs centaines de kilovolts (kV). Ils sont composés de lignes électriques aériennes ou de câbles souterrains spécialement conçus pour supporter les niveaux élevés de tension et de puissance.

L'énergie électrique est transportée à des niveaux de haute tension (HT) afin de minimiser les pertes d'énergie lors de la transmission sur de longues distances. Les principales pertes qui se produisent dans les lignes HT sont la perte de chaleur due à la résistance des matériaux des lignes

électriques et les pertes de fuite. Ces pertes de chaleur peuvent être réduites en augmentant la tension nominale [4].

#### **I.4.2 Réseau Moyenne Tension (MT)**

Le réseau MT est généralement utilisé pour fournir de l'électricité dans les zones rurales, les petites villes et les entreprises industrielles individuelles. Les lignes électriques MT transportent typiquement des niveaux de tension compris entre 10 kV et 30 kV et ont des longueurs d'environ 5 à 25 km. Les lignes aériennes et les câbles souterrains sont tous deux utilisés dans le réseau MT pour la transmission et la distribution de l'électricité. Cependant, dans les zones urbaines densément peuplées, seuls les câbles souterrains sont utilisés.

Les lignes aériennes MT nécessitent des poteaux relativement petits et des sections de fils plus petites par rapport aux lignes de transmission haute tension (HT). Cela est dû aux niveaux de tension plus faibles utilisés dans les lignes MT. En ce qui concerne la structure physique, les fils MT sont principalement composés de cuivre et d'aluminium, avec différentes formes de sections transversales, y compris des formes rondes, en forme de secteur et ovales [4].

#### **I.4.3 Réseau Basse Tension (BT)**

Le réseau BT est le dernier maillon de la chaîne de distribution de l'électricité, assurant l'alimentation des utilisateurs finaux tels que les résidences, les petits commerces et les bâtiments publics. Les lignes électriques BT sont conçues pour transporter l'électricité à des niveaux de tension inférieurs à 1 000 volts (1 kV).

Les réseaux BT sont généralement configurés en une distribution en étoile, où chaque utilisateur est connecté à un transformateur de distribution situé à proximité. Ce transformateur réduit la tension de distribution provenant du réseau MT à une tension appropriée pour une utilisation domestique ou commerciale, généralement 230/400 Volts [4].

Les technologies CPL utilisent les réseaux électriques basse tension (BT) pour fournir des services de communication aux maisons, aux hôpitaux, aux bureaux et pour établir des réseaux au sein des immeubles en utilisant les lignes électriques existantes [4].

### **I.5 Méthodes de couplage du réseau électrique**

Pour assurer un bon fonctionnement du réseau CPL, il est crucial de veiller à une installation soignée de l'injection du signal sur le réseau électrique. Le couplage de l'équipement CPL au réseau électrique est un élément clé pour garantir la qualité de la transmission du signal sur toutes les phases. En effet, l'objectif du couplage est de maintenir une qualité de signal homogène sur toutes

les phases. Il existe deux méthodes pour assurer le couplage optimal de l'équipement CPL au réseau électrique : couplage capacitif et couplage inductif.

### **I.5.1 Couplage capacitif**

Le couplage capacitif est un phénomène qui se produit lorsque deux conducteurs électriques sont séparés par un matériau isolant, formant ainsi un condensateur. Dans ce cas, le matériau isolant agit comme une capacité entre les deux conducteurs, permettant le transfert de charge électrique [3].

Le couplage capacitif est largement utilisé dans les systèmes CPL Indoor pour transmettre des signaux de données à haute fréquence sur les lignes électriques. Les condensateurs ont une impédance relativement faible à des fréquences élevées, ce qui les rend efficaces pour le transfert de signaux à haute fréquence entre des étages de circuits électroniques [3].

### **I.5.2 Couplage inductif**

Le couplage inductif se produit lorsque deux circuits électriques sont situés à proximité l'un de l'autre et qu'ils partagent un champ magnétique commun. Ce couplage se produit grâce à l'interaction des champs magnétiques créés par le courant électrique qui circule dans les conducteurs.

Lorsqu'il y a un couplage inductif entre deux circuits, un courant induit est généré dans le deuxième circuit en raison des variations du champ magnétique créé par le premier circuit. Ce phénomène est largement utilisé dans les transformateurs, les bobines d'induction et les dispositifs de transmission sans fil tels que les bobines d'induction pour le chargement sans fil.

Le couplage inductif est plus adapté pour les longues distances car il est moins affecté par l'atténuation et la perte de signal qui se produisent sur les câbles électriques. Utilise des bobines pour induire un champ magnétique qui transporte le signal CPL à travers les câbles électriques. Les bobines sont placées sur les fils électriques et sont conçues pour transmettre les signaux de haute fréquence tout en bloquant les signaux de basse fréquence [3].

## **I.6 Classification des systèmes CPL**

### **I.6.1 Classification selon le débit**

Les différentes technologies CPL permettent un large spectre d'utilisation qui s'étend aux usages nécessitant du « haut débit » comme le multimédia jusqu'aux usages dits « bas débit » comme la domotique. Les technologies CPL grand public et professionnels utilisent deux bandes de fréquences, la bande 3 à 148 KHz pour les technologies bas débit et la bande 1 à 30 MHz pour les

technologies haut débit. La modulation de signaux électriques entraîne un rayonnement d'ondes électromagnétiques sur certaines bandes de fréquence [6].

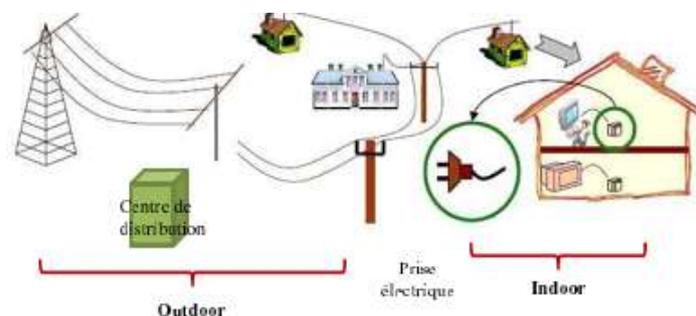
- **CPL à bas débit** : Ces systèmes ont un débit de données allant jusqu'à 100 Mbps . Ils sont principalement utilisés pour la surveillance et la commande de l'équipement électrique, ainsi que pour la domotique.
- **CPL à débit moyen** : Ces systèmes ont un débit de données allant de 100 Mbps à 500 Mbps. Ils sont utilisés pour les applications de communication de données à haut débit, telles que l'accès à Internet et les réseaux domestiques.
- **CPL à haut débit** : Ces systèmes ont un débit de données supérieur à 500 Mbps selon les technologies utilisées. Le câble électrique étant un média partagé et sensible aux bruits radio, l'évolution des CPL vers des technologies à haut débit a bénéficiée de la maturité des techniques de modulation et de codage permettant notamment un meilleur contrôle [6].

## I.6.2 Classification selon l'architecture

### I.6.2.1 Outdoor « accès extérieur »

Le CPL Outdoor Consiste à acheminer, via le réseau électrique, un flux haut débit depuis un point d'accès préexistant. Concrètement, la transmission de données s'effectue sur le réseau électrique BT, par la mise en place d'équipements spécifiques au niveau du transformateur MT/BT (ou HTA/BT) et au niveau de l'utilisateur final. Les CPL « Outdoor » utilisent la bande de fréquences 1.6 à 13.5 MHz. A l'instar de l'accès via câble modem, le débit disponible via une connexion CPL est partagé entre les utilisateurs [4].

Lorsqu'il s'agit d'une architecture CPL en extérieur, les adaptateurs CPL doivent être conçus pour résister aux conditions extérieures, comme l'humidité, les variations de température et les interférences électromagnétiques. La Figure (I.2) représente l'architecture CPL en extérieur.



**Figure I.3** Exemple d'une architecture outdoor [4]

### I.6.2.2 Indoor « accès intérieur »

Le CPL Indoor désigne la partie du réseau CPL qui est située à l'intérieur des locaux, que ce soit dans un bureau, un domicile ou un hôpital. Il s'agit essentiellement d'une extension du réseau local existant qui permet d'accéder à internet à haut débit [4]. L'objectif est de créer un réseau local interne qui permettra à chaque ordinateur de communiquer simplement en se connectant au réseau électrique via un modem CPL. Grâce à cette technologie, le réseau électrique devient un support de transmission des données. Le CPL Indoor offre la possibilité de partager une connexion internet, des fichiers, de la vidéo et même de la voix.

Appelé aussi l'accès domestique, il permet d'acheminer les flux de données vers toutes les prises électriques du bâtiment, à partir d'un accès Internet haut débit. Cet accès peut être via ADSL ou autre moyen. Les CPL permettent donc d'élaborer un réseau local informatique. Cette technologie est appropriée pour les établissements privés ou publics ne disposant pas, pour des raisons techniques ou financières, de réseau local. Elle est également mise en avant pour le développement des réseaux domestiques. Les CPL « indoor » utilisent la bande de fréquences allant jusqu'à à 30 MHz [4].

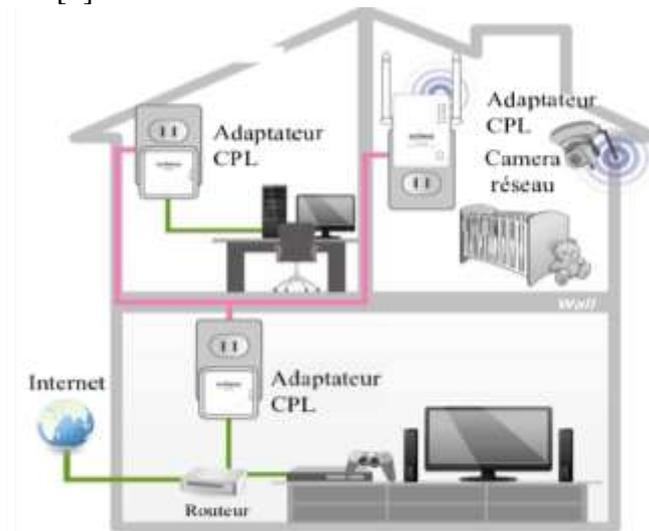


Figure I.4 Exemple d'une architecture CPL Indoor [4]

## I.7 Normes et standardisation

Les CPL se trouvent à la frontière de plusieurs domaines concernant différents corps de réglementation :

- L'électricité.
- Les télécommunications.
- La compatibilité électromagnétique.
- La gestion du plan de fréquence.

Tous les équipements commercialisés à ce jour pour le grand public sont des produits « HomePlug ». Ce standard est le seul standard qui existe, il est américain. Le HomePlug ne concerne que les installations « Indoor » qui ne sont pas interopérables avec les installations « Outdoor » existantes [7]. Les protocoles les plus connus sont :

- **HomePlug AV (HPAV)** : C'est l'un des premiers protocoles CPL largement adoptés. Il offre des vitesses de transfert allant jusqu'à 200 Mbps (mégabits par seconde) en utilisant la bande de fréquences de 2 à 28 MHz.
- **HomePlug AV2 (HPAV2)** : C'est la version améliorée du protocole HomePlug AV. Il prend en charge des vitesses de transmission plus élevées, allant jusqu'à plusieurs centaines de Mbps voire plus d'1 Gbps (gigabit par seconde).
- **HomePlug Green PHY (IEEE 1905.1)**: Cette norme, également développée par l'IEEE, vise à faciliter la communication entre les appareils électriques domestiques, favorisant ainsi le développement de l'Internet des objets (IoT) dans le secteur résidentiel.
- **G.hn (ITU-T G.9960 - G.9964)**: Cette série de normes développées par l'union Internationale des Télécommunications - Secteur de la normalisation des télécommunications) vise à offrir une solution de communication de données sur les réseaux électriques, ainsi que sur les lignes téléphoniques et les câbles coaxiaux.
- **IEEE P1901** : Un protocole basé sur les normes IEEE qui définit des spécifications pour les communications sur courant porteur. Il couvre les couches physiques (PHY) et les couches MAC pour assurer une communication fiable.
- **IEEE 1905.1a**: Cette extension du standard HomePlug Green PHY (IEEE 1905.1) fournit des améliorations supplémentaires pour la communication entre les appareils domestiques intelligents, facilitant ainsi l'interopérabilité.

## I.8 Cadre juridique et réglementations

Toute technique qui travaille sur une bande de fréquence définie doit rentrer dans un cadre juridique. Les réseaux CPL sont à la fois des réseaux électriques et des réseaux de télécommunication, ce qui fait que les autorités ont du mal à définir leur cadre juridique. De plus, il n'existe pas encore de réglementation précise pour les équipements et les réseaux CPL. Ainsi la mise en place de réseaux CPL est libre pour ce qui est des installations derrière un compteur privé (il s'agit de « Indoor »), sous réserve de ne pas créer de nuisances, auquel cas le matériel doit être retiré. Pour ce qui est des installations extérieures (appelées Outdoor) où le signal est injecté au

niveau du transformateur HTA/BT pour des créations de boucles locales électriques, des autorisations d'expérimentation sont en général nécessaires, selon le pays concerné. Ainsi, en France par exemple, de telles autorisations sont à demander auprès de l'ARCEP [7].

## I.9 Equipements du CPL

Les équipements CPL comprennent un modem CPL et des adaptateurs CPL, qui sont utilisés pour transporter des données numériques à travers les fils électriques. Ces équipements sont disponibles dans une variété de vitesses et de configurations pour répondre aux besoins des utilisateurs.

Le modem CPL est l'équipement principal utilisé pour transporter les données numériques à travers les fils électriques. Il se connecte au réseau électrique domestique et à un périphérique, tel qu'un ordinateur ou un routeur, via un câble Ethernet.

En général, il existe deux types de modems CPL : les modems de bureau, qui sont des boîtiers à poser sur une table ou un support et se branchent sur la prise électrique à l'aide d'un cordon, et les modems muraux, qui sont des boîtiers plus compacts se branchant directement sur les prises électriques. Le boîtier du modem comprend plusieurs voyants ou LED, ainsi que des ports de connexion tels que des ports USB, RJ45 et RJ11. Les voyants indiquent la présence du signal électrique, du signal CPL ainsi que le niveau de ce signal [6].

Les adaptateurs CPL, quant à eux, sont des dispositifs qui se branchent directement sur les prises électriques murales. Ils sont utilisés pour étendre la portée du réseau CPL à travers la maison ou le bureau. Les adaptateurs CPL sont disponibles dans différentes vitesses, ce qui permet de choisir celui qui convient le mieux à ses besoins.



**Figure I.5** Boîtiers CPL

## **I.10 Applications du CPL**

Les réseaux de courants porteurs en ligne (CPL) apportent de nouvelles possibilités dans le domaine des réseaux, la plus importante étant la simplicité d'utilisation pour l'utilisateur, qui peut simplement utiliser les prises électriques existantes pour créer un réseau informatique. Une fois installé, ce réseau offre des débits suffisants pour des applications en temps réel et multimédias. De plus, il peut être utilisé en tant que backbone pour un réseau Wi-Fi, ce qui en fait un complément idéal pour étendre la couverture et optimiser les performances de cette technologie

### **I.10.1 Réseau intelligent**

Les réseaux intelligents est, également connus sous le nom de réseaux électriques intelligents ou Smart Grids, sont des réseaux électriques qui utilisent des technologies numériques et avancées pour surveiller et gérer le transport de l'électricité depuis toutes les sources de production pour répondre aux demandes d'électricité variables des utilisateurs finaux. Les réseaux intelligents coordonnent les besoins et les capacités de tous les producteurs, opérateurs de réseau, utilisateurs finaux et parties prenantes du marché de l'électricité pour exploiter toutes les parties du système de manière aussi efficace que possible, minimisant les coûts et les impacts environnementaux tout en maximisant la fiabilité, la résilience, la flexibilité et la stabilité du système [8].

L'application du CPL dans un réseau intelligent permet de fournir des données en temps réel sur la consommation d'énergie et la qualité de l'électricité aux fournisseurs d'énergie et aux consommateurs. En utilisant cette technologie, les fournisseurs d'énergie peuvent surveiller plus efficacement la consommation d'énergie et optimiser la distribution de l'électricité en temps réel en fonction des besoins des consommateurs.

De plus, le CPL permet également de contrôler à distance les équipements électriques connectés au réseau, tels que les compteurs intelligents et les appareils ménagers, pour réguler la consommation d'énergie. Cela permet aux consommateurs de mieux gérer leur consommation d'énergie, de réduire les coûts d'électricité et de contribuer à la durabilité environnementale.

### **I.10.2 Comptage intelligent**

Le comptage intelligent avec les systèmes CPL est une application importante dans le domaine de l'énergie., appelé comptage avancé ou comptage communicant, servent à produire des factures sur la consommation réelle, à repérer des gaspillages, des pertes en ligne ou les postes qui coûtent le plus au client. Ils peuvent éventuellement l'informer de microcoupures ou de pertes des réseaux électriques [9].

Les compteurs intelligents sont équipés de modems CPL pour transmettre les données de consommation aux fournisseurs d'énergie via les réseaux électriques existants. Les données sont transmises à intervalles réguliers, généralement toutes les 15 minutes, et peuvent être utilisées pour la facturation, la tarification dynamique, l'optimisation de la production et la planification de la demande.

### **I.10.3 Promotion de la télémédecine**

La télémédecine est une méthode de soins de santé à distance qui permet aux patients de consulter des professionnels de la santé à distance grâce aux technologies de l'information et de la communication. En utilisant le CPL, les données médicales peuvent être transmises de manière sécurisée et rapide à travers le réseau électrique domestique, sans avoir besoin d'installer des câbles supplémentaires ou de recourir à des réseaux sans fil qui pourraient poser des problèmes de sécurité ou de confidentialité

Cela permettrait aux professionnels de la santé de surveiller et de diagnostiquer les patients à distance, de fournir des conseils médicaux, des consultations et même des traitements en temps réel. En utilisant des appareils connectés tels que des capteurs de santé portables ou des dispositifs de surveillance à domicile, les patients pourraient transmettre des données médicales telles que la pression artérielle, la fréquence cardiaque ou la glycémie à leurs médecins, qui pourraient ensuite les utiliser pour suivre et ajuster les traitements en conséquence.

### **I.10.4 Communication embarqué**

L'utilisation de la technologie CPL dans les véhicules offre de nombreux avantages. Elle permet une communication en temps réel entre les différents systèmes, permettant ainsi un échange rapide et efficace de données. Elle améliore également la sécurité en permettant une communication rapide entre les systèmes de sécurité tels que les freins et les airbags en cas d'urgence.

De plus, la technologie CPL permet la mise à jour à distance des logiciels embarqués, ce qui permet aux constructeurs automobiles de fournir des mises à jour de sécurité, des améliorations de performances et des fonctionnalités supplémentaires à leurs clients plus facilement et plus rapidement [10].

## **I.11 Conclusion**

Ce chapitre nous a offert une vue d'ensemble complète de la technologie CPL, allant de son historique jusqu'à ses applications pratiques. Nous avons examiné en détail le principe de fonctionnement de cette technologie, les différents types de couplage au réseau électrique, les classifications des systèmes CPL, ainsi que les normes et réglementations à suivre. Nous avons également étudié les équipements nécessaires pour la mise en place d'un système CPL, ainsi que les différentes applications possibles en intérieur et en extérieur, pour un usage domestique ou professionnel. Dans le chapitre suivant, nous aborderons les techniques de communication numérique, afin de mieux comprendre comment les données sont transmises par le CPL et d'approfondir notre compréhension de cette technologie prometteuse.

---

**Chapitre II**

**Techniques de communication**

**Numériques**

---

## II.1 Introduction

L'avènement de l'ère numérique a transformé en profondeur la manière dont nous communiquons, que ce soit à titre personnel ou professionnel. La communication numérique est devenue un élément essentiel de la société moderne, offrant des canaux pour échanger des informations à travers le monde. Les techniques de communication numérique impliquent souvent l'utilisation de signaux numériques modulés pour transmettre des données via différents canaux tels que les réseaux sociaux, les e-mails, les applications de messagerie instantanée, les forums de discussion, les blogs, les vidéos en ligne, etc.

Au cours de ce chapitre, nous allons aborder les différents aspects de la communication numérique en nous focalisant sur les types de modulation numérique les plus couramment utilisés tels que l'ASK, le FSK, le PSK, BPSK, QPSK, CDMA, et l'OFDM, on examinera les caractéristiques propres à chacune de ces techniques.

## II.2 Type de modulation numérique

La modulation est l'un des processus clés de la communication numérique. Elle permet d'encoder des informations numériques dans des signaux porteurs, Les formats numériques sont également compatibles avec les services de données numériques, offrant une sécurité accrue des données, une meilleure qualité de transmission et une disponibilité immédiate des systèmes.

Le but des modulations numériques est d'assurer un débit maximum de données binaires, avec un taux d'erreur acceptable [11].

Les signaux numériques peuvent être modulés de différentes manières, en fonction des exigences spécifiques du système de communication. Parmi les techniques de modulation couramment utilisées, on trouve :

### II.2.1 Modulation d'amplitude ASK

La modulation ASK consiste à faire varier l'amplitude d'un signal porteur pour représenter des données numériques [12].

L'équation mathématique qui décrit un signal modulé en ASK est la suivante :

$$v_{ask}(t) = [1 + v_m(t)] \left[ \frac{A}{2} \cos(\omega ct) \right] \quad (\text{II. 1})$$

Avec :

$v_{ask}(t)$  : onde du signal modulé.

$v_m(t)$  : signal d'information numérique (modulant) (volts).

$\frac{A}{2}$  : amplitude de la porteuse non modulée (volts).

$\omega c$  : fréquence radian porteuse analogique.

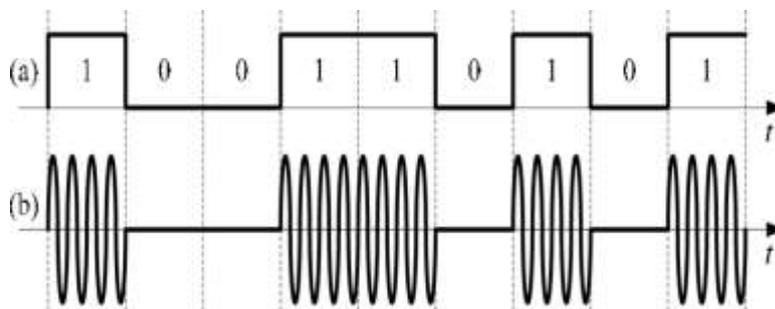
Dans l'équation (II.1), le signal de modulation  $v_m(t)$  est une forme d'onde binaire normalisée, où  $+1 \text{ V} = 1$  logique et  $-1 \text{ V} = 0$  logique. Par conséquent, pour une entrée logique 1,  $v_m(t) = +1 \text{ V}$ , l'équation (II.1) se réduit à :

$$v_{ask}(t) = [1 + v_m(t)] \left[ \frac{A}{2} \cos(\omega ct) \right] \quad (\text{II. 2})$$

$$v_{ask}(t) = A \cos(\omega ct) \quad (\text{II. 3})$$

Et pour une entrée logique 0,  $v_m(t) = -1 \text{ V}$ , l'équation (II.1) se réduit à :

$$v_{ask}(t) = [1 - 1] \left[ \frac{A}{2} \cos(\omega ct) \right] = 0 \quad (\text{II. 4})$$



**Figure II.1** Modulation d'amplitude ASK

## II.2.2 Modulation de fréquence FSK

La modulation par déplacement de fréquence est une forme de modulation d'angle à amplitude constante similaire à la modulation de fréquence standard (FM) sauf le signal modulant est un signal binaire qui varie entre deux niveaux de tension discrets plutôt que d'un changement continu forme d'onde analogique [12]. Deux fréquences sont utilisées pour représenter les deux symboles

Binaires (0 et 1) à transmettre. L'équation mathématique générale de la modulation FSK est :

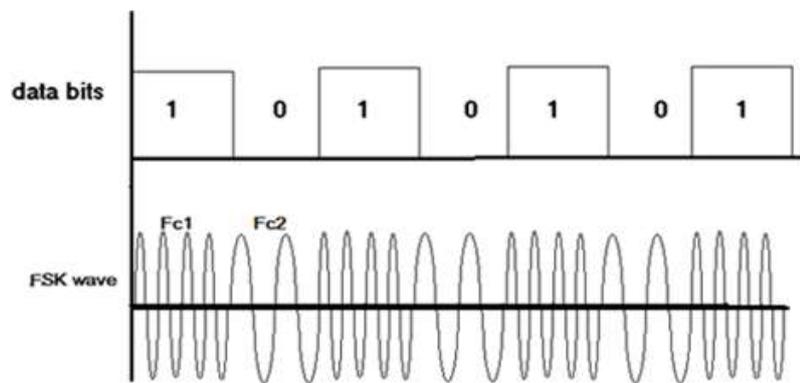
$$v_{FSK}(t) = v_C(t) \cdot \cos(\omega ct) \{2\pi[f_c + v_m(t) \cdot \Delta f]t\} \quad (\text{II. 5})$$

À partir de l'équation (II.5) on peut voir que le changement de la fréquence porteuse  $\Delta f$  est proportionnel à l'amplitude de signal d'entrée binaire  $v_m(t)$ , et la direction du décalage est déterminée par la polarité. Le signal de modulation est une forme d'onde binaire normalisée logique 1 = +1 V et une logique 0 = -1 V. Ainsi, pour une entrée logique  $v_m(t) = +1$ , l'équation (II.5) peut être réécrite comme ceci

$$v_{FSK}(t) = v_C(t) \cdot \cos(\omega ct) \{2\pi[f_c + \Delta f]t\} \quad (\text{II. 6})$$

Pour une entrée logique 0,  $v_m(t) = -1$ , l'équation (II.5) devient :

$$v_{FSK}(t) = v_C(t) \cdot \cos(\omega ct) \{2\pi[f_c - \Delta f]t\} \quad (\text{II. 7})$$



**Figure II.2** Modulation de fréquence FSK

### II.2.3 Modulation de Phase PSK

La modulation par déplacement de phase (PSK) est une forme de modulation numérique où la phase de la porteuse est modifiée pour représenter les bits de données à transmettre. Il existe plusieurs variantes de la modulation PSK, notamment la PSK binaire, la PSK quadrature (QPSK), la PSK 8-ary (8PSK) et la PSK 16-ary (16PSK), chacune représentant un nombre différent de bits par symbole [3]. Le signal modulé PSK s'écrit :

$$u(t) = \sum_k \cos(2\pi f_c t + \varphi_k) r(t - kT) \quad (\text{II. 8})$$

Avec :  $\varphi_k$  représente la phase émise dans l'intervalle  $K$ . cette expression peut se réécrire sous la forme :

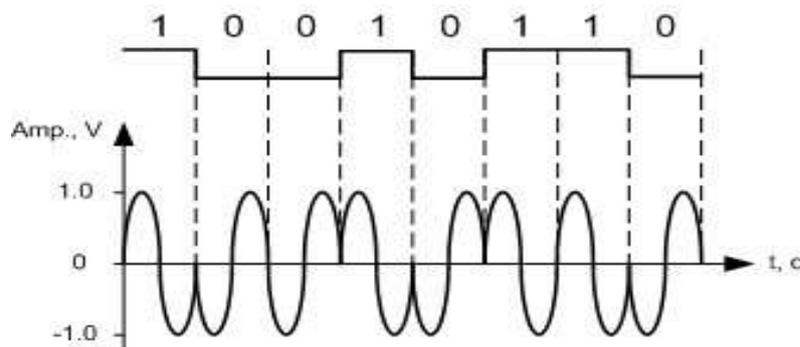
$$u(t) = Z_I(t) \cos(2\pi f_c t) - Z_Q(t) \sin(2\pi f_c t) \quad (\text{II. 9})$$

Avec :

$$Z_I(t) = \sum_k \cos(\varphi_k) r(t - kT) \quad (\text{II. 10})$$

$$Z_Q(t) = \sum_k \sin(\varphi_k) r(t - kT) \quad (\text{II. 11})$$

Le signal  $u(t)$  modulé PSK est obtenu en combinant linéairement deux modulations d'amplitude en quadrature : le signal  $Z_I(t)$ , modulant la porteuse  $\cos(2\pi f_c t)$ , et le signal  $Z_Q(t)$  modulant la porteuse en quadrature (déphasée de  $\pi/2$ )  $\sin(2\pi f_c t)$



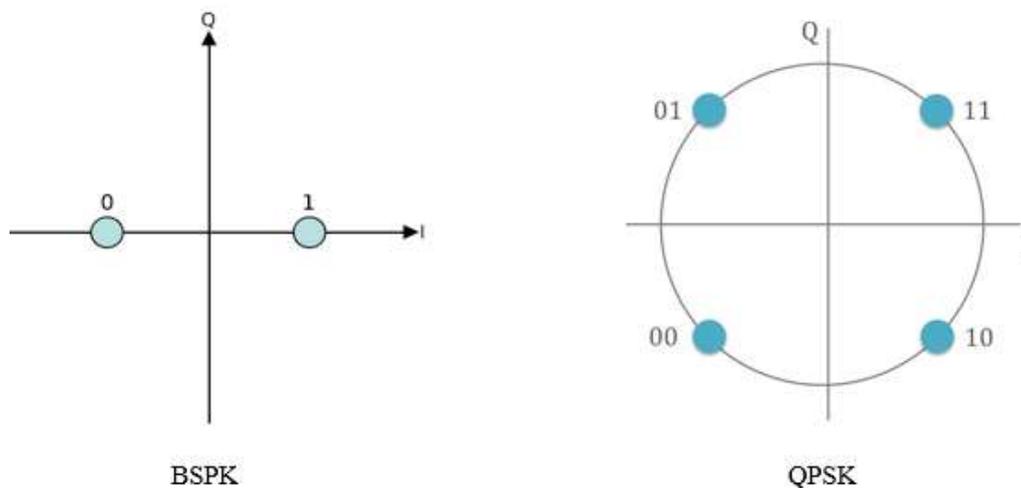
**Figure II. 3** Modulation de phase PSK

## II.2.4 BPSK

En mode déphasage binaire (BPSK), le signal transmis est une sinusoïde d'amplitude fixe. BPSK est la forme la plus simple de PSK. Il utilise deux phases qui sont séparées de 180 degrés, et peuvent donc aussi être appelées 2-PSK. Il a une phase fixe lorsque les données se trouvent à un niveau, et lorsqu'elles se trouvent à un autre, la phase est différente de 180 degrés. Peu importe l'emplacement exact des points de la constellation, ils sont représentés sur l'axe réel à 0 degré et à 180 degrés. Cette modulation est la plus robuste de toutes les PSK, car il faut beaucoup de distorsion pour amener le démodulateur à prendre une décision incorrecte. Cependant, il ne peut moduler que 1 bit / symbole [14].

## II.2.5 QPSK

QPSK (P SK4-aire) implique de changer la phase de la forme d'onde transmise. Chaque changement de phase finie représente des données numériques uniques. Une forme d'onde modulée en phase peut être générée en utilisant les données numériques pour changer la phase d'un signal tandis que sa fréquence et son amplitude restent constantes. Une porteuse modulée QPSK subit quatre changements de phase distincts qui sont représentés sous forme de symboles et peuvent prendre les valeurs de  $\pi/4$ ,  $3\pi/4$ ,  $5\pi/4$  et  $7\pi/4$ . Chaque symbole représente deux bits de données binaires [14].



**Figure II.4** Diagrammes de constellations BPSK et QPSK

## II.3 Code Division Multiple Access

Le CDMA est une méthode de transmission de données sans fil qui permet à plusieurs utilisateurs de partager la même bande de fréquences simultanément sans nécessiter de synchronisation entre eux., contrairement aux techniques TDMA, FDMA et WDM. Dans cette technique, chaque utilisateur se voit attribuer un code unique qui est utilisé pour moduler sa transmission de données sur une même fréquence porteuse partagée par tous les utilisateurs. Cette technique trouve son utilisation dans les communications radiofréquences et sans fils [15] [16].

La capacité de multiplexage du CDMA n'est pas limitée par des paramètres physiques (intervalles de temps disponibles, fréquences ou longueurs d'ondes utilisables ... etc.) mais par la capacité à générer un maximum de séquences de codes, celles-ci étant choisies de manière à minimiser les Interférences d'accès Multiple (IAM) [17].

Il existe deux principales variétés de CDMA :

➤ **FH-CDMA** (Frequency Hop). Dans ce système, on fait de l'évasion de fréquence : la clé de chaque utilisateur code pour une suite de fréquences qui feront alternativement office de porteuse. Ce système ressemble à un multiplexage fréquentiel dans lequel l'attribution des fréquences varierait rapidement (par rapport au débit d'informations à transmettre) [18].

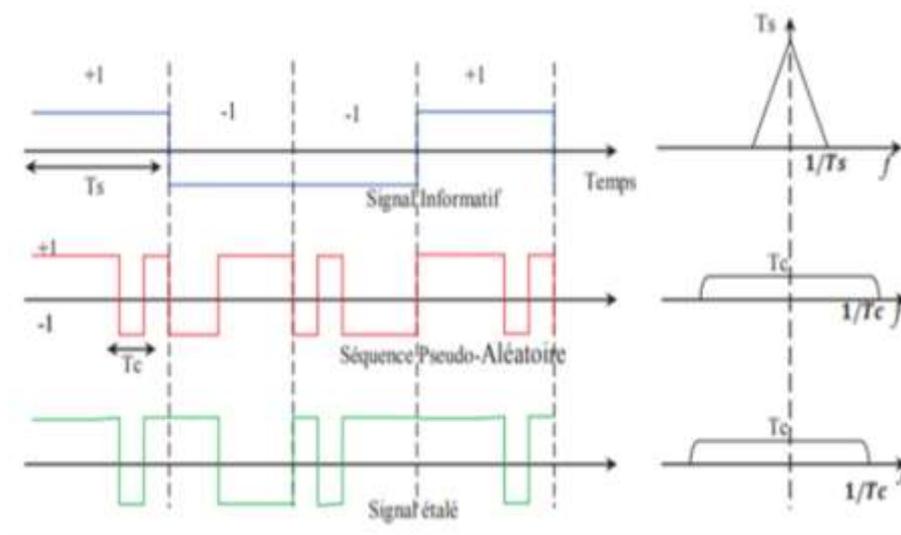
➤ **DS-SS-CDMA** (Direct Sequence). C'est à ce type de CDMA qu'on fait généralement référence quand on parle de CDMA, et c'est celui que nous avons étudié aussi bien théoriquement qu'expérimentalement. Ici, on multiplie directement le message à transmettre par une le code (séquence pseudo-aléatoire). L'étalement spectral du signal codé vient de ce que la fréquence du code est largement supérieure à la fréquence d'envoi des données [18].

Le CDMA appartient à la classe des multiplexages dits à étalement de spectre. En effet, comme nous allons le voir, chaque utilisateur émet sur toute la largeur de bande du canal de communication. Le principe est le suivant : à chaque utilisateur correspond une clé (ou code) à l'aide de laquelle son message est codé avant d'être émis.

## II.4 Étalement de spectre par séquence directe

Le principe de la modulation à étalement de spectre (Spread Spectrum) consiste à « étaler » l'information sur une bande de fréquences beaucoup plus large que la bande nécessaire, dans le but de combattre les signaux interférents et les distorsions liées à la propagation : le signal se confond avec le bruit. Le signal est codé au départ, un code est assigné à chacun des usagers afin de permettre le décodage à l'arrivée. L'étalement est assuré par un signal pseudo aléatoire appelé code d'étalement. A la réception le signal est perçu comme du bruit si le récepteur n'a pas le code [19].

La Figure (II.5) montre le principe de l'étalement par séquence directe. Il consiste à multiplier chaque symbole informatif de période symbole  $T_s$  par une séquence pseudo - aléatoire entière, dont les éléments ou chips ont une période  $T_c$  (période chip) qui sont beaucoup plus faible que  $T_s$ .



**Figure II.5** Principe de l'étalement du spectre

## II.5 Orthogonal Frequency Division Multiplexing OFDM

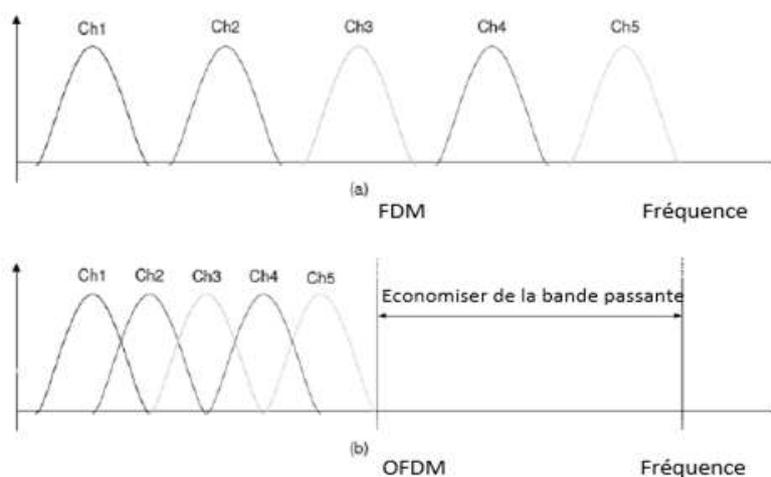
### II.5.1 FDM

Le multiplexage par répartition en fréquence (FDM) est utilisé depuis longtemps pour acheminer plusieurs signaux sur une ligne téléphonique. FDM divise la largeur de bande du canal en sous-canaux et transmet plusieurs signaux à débit relativement faible en portant chaque signal sur une fréquence porteuse distincte. Pour s'assurer que le signal d'un sous-canal ne chevauche pas le signal d'un voisin, il reste une bande de garde entre les différents sous-canaux. De toute évidence, cette bande de garde a montré une dégradation importante en matière d'efficacité spectrale [14].

### II.5.2 OFDM

L'OFDM est une technique de modulation multi-porteuse. Elle consiste à diviser la bande passante en plusieurs sous-bandes ou porteuses espacées de  $\Delta f$ , de façon à ce qu'elles soient orthogonales. Cette condition permet de limiter les interférences inter-porteuses et facilite l'égalisation du canal à la réception des données. Un ensemble d'informations est transmis en une seule fois pendant une durée  $T_s$  (temps du symbole OFDM) tel que  $T_s \Delta = 1$  [20].

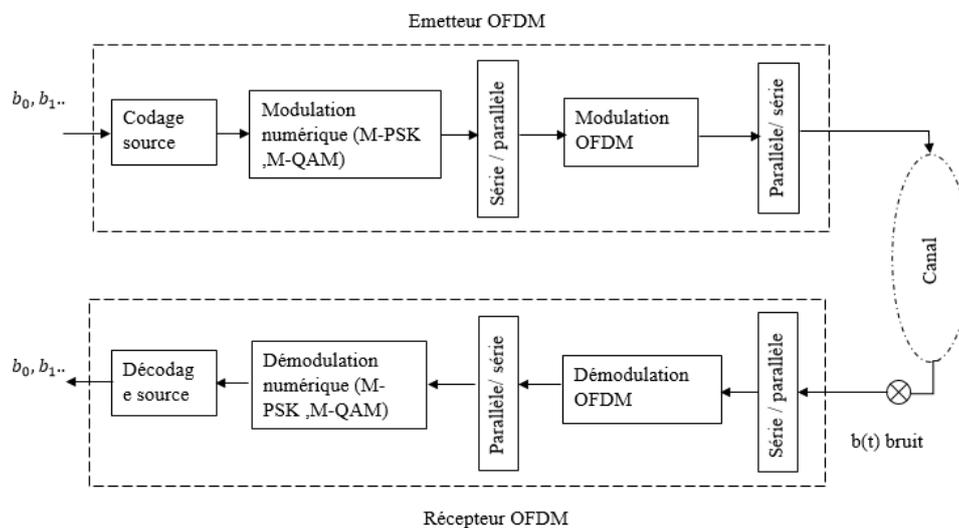
Cette technique combine la modulation et le multiplexage en combinant des signaux indépendants provenant de différentes sources. Le multiplexage fait référence à la transmission de signaux indépendants qui constituent un sous-ensemble du signal principal. Dans cette technique, le signal principal est d'abord divisé en canaux indépendants, puis chaque canal est modulé avec des données spécifiques. Ensuite, les canaux modulés sont remultiplexés pour former une porteuse OFDM. La Figure (II.6) illustre l'utilisation de la bande passante dans le cas du multiplexage par répartition en fréquence (FDM). En utilisant l'OFDM, qui est un cas particulier de FDM, la bande passante est divisée en sous-bandes équidistantes, ce qui permet d'observer l'efficacité spectrale.



**Figure II.6** l'utilisation de la bande passante en FDM et OFDM

Le processus de transmission du signal OFDM se compose généralement de plusieurs étapes, notamment la conversion des données numériques en symboles binaires, la modulation de chaque symbole sur une sous-porteuse spécifique, l'orthogonalisation des sous-porteuses, l'ajout d'un préfixe cyclique (CP) pour éviter les interférences inter-symboles et simplifier la synchronisation du récepteur, et la combinaison des symboles modulés pour former un signal OFDM complet qui est envoyé sur le canal de transmission.

À la réception, le signal est démodulé en utilisant la même procédure que lors de la transmission, mais en sens inverse, avec l'ajout d'une étape de correction des erreurs pour garantir une récupération précise des données transmises. La Figure ci-dessous présente le schéma global de la modulation OFDM



**Figure II.7** Schéma bloc de l'émetteur et récepteur OFDM

### II.5.2.1 Principe de la modulation

Le principe du multiplexage en fréquence est de grouper des données numériques par paquets  $N$ , qu'on appellera symbole OFDM et de moduler par chaque donnée une porteuse différente en même temps. Considérons de  $N$  données  $C_0, C_1, \dots, C_{N-1}$ . Appelons  $T_s$  la durée du symbole. Chaque données  $C_k$  module un signal à la fréquence  $f_k$ . Le signal individuel s'écrit sous forme complexe :  $C_k e^{2j\pi f_k t}$  [21].

$C_k$  Sont des nombres complexes définis à partir des éléments binaires par des constellations de type de la modulation numérique.

Le signal  $S(t)$  total correspondant à toutes les données d'un symbole OFDM est la somme des signaux individuels :

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_K e^{2j\pi f_k t} \quad (\text{II. 12})$$

Le multiplexage est orthogonal si l'espace entre les fréquences est  $1/T_S$  [21].

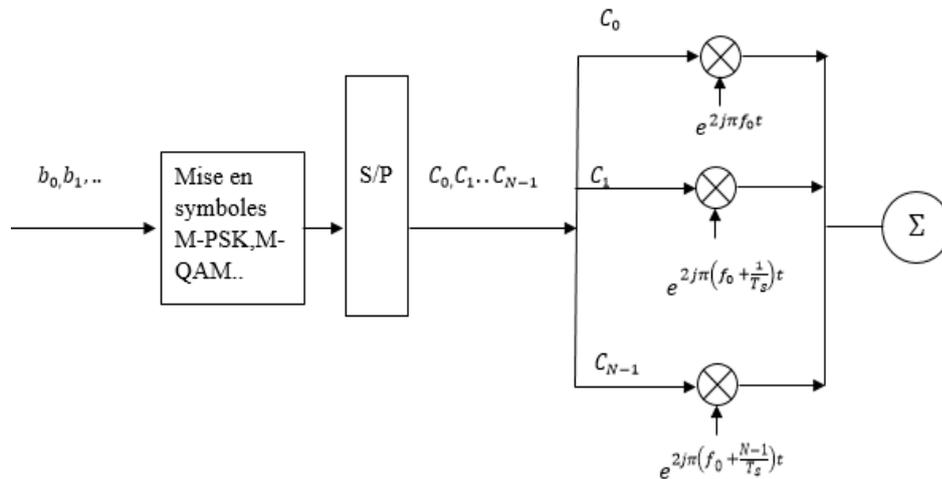
Alors :

$$f_k = f_0 + \frac{k}{T_S} \quad (\text{II. 13})$$

Et

$$s(t) = e^{2j\pi f_0 t} \sum_{k=0}^{N-1} C_K e^{2j\pi \frac{kt}{T_S}} \quad (\text{II. 14})$$

La Figure (II.8) présente le schéma de principe de la modulation OFDM



**Figure II.8** Principe de modulateur OFDM

### II.5.2.2 Principe de la démodulation

Le signal parvenant au récepteur s'écrit, sur une durée symbole  $T_S$  comme suit [21] :

$$y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_K H_K e^{-2j\pi(f + \frac{k}{T_S})t} \quad (\text{II. 15})$$

$H_k(t)$  Est la fonction de transfert du canal autour de la fréquence  $f_k = f_0 + \frac{k}{T_S}$  et au temps  $t$ . Cette fonction varie lentement et on peut la supposer constante sur la période  $T_S$  [21]. La démodulation classique consiste à démoduler le signal suivant les  $N$  sous-porteuses comme le montre le schéma classique ci-dessous. En pratique, comme pour la modulation, on remarque que la démodulation peut être réalisée par transformée de Fourier.

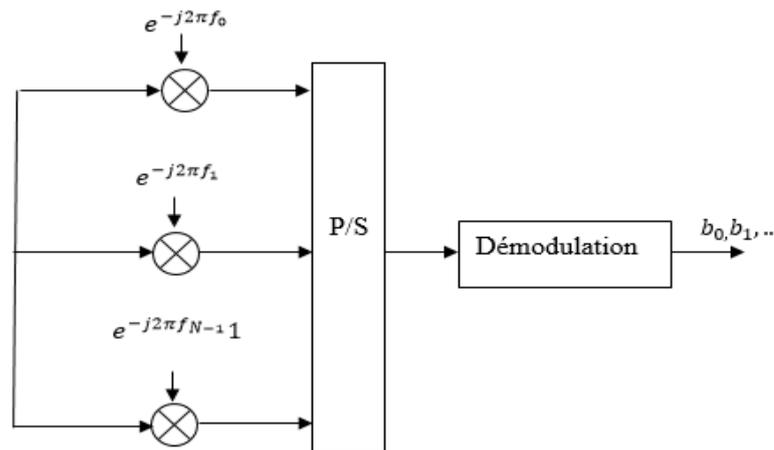


Figure II.9 Principe de démodulateur OFDM

## II.6 Implémentation de IFFT et FFT

### II.6.1 IFFT (Inverse Fast Fourier Transform)

L'IFFT est une version inversée de la transformation de Fourier discrète utilisée pour convertir les sous-porteuses du domaine fréquentiel vers le domaine temporel. Chaque sous-porteuse dans le domaine fréquentiel est représentée par un nombre complexe. Elle prend en entrée une séquence de  $N$  échantillons dans le domaine fréquentiel  $X(k)$  pour  $k = 0, 1, \dots, N - 1$ .

et produit une séquence correspondante dans le domaine temporel  $x(n)$  pour  $n = 0, 1, \dots, N - 1$ . L'équation de transformée de Fourier discrète inverse est donnée par :

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{\frac{j2\pi nk}{N}} \quad (\text{II.16})$$

### II.6.2 FFT (Fast Fourier Transform)

La FFT est utilisée dans le processus de réception OFDM pour convertir les signaux temporels reçus du canal de communication du domaine temporel au domaine fréquentiel. Elle

est appliquée sur chaque sous-porteuse pour obtenir les symboles de données dans le domaine fréquentiel.

Elle prend en entrée une séquence de  $N$  échantillons dans le domaine temporel  $x(n)$ , pour  $n = 0, 1, \dots, N - 1$  et produit une séquence correspondante dans le domaine fréquentiel  $X(k)$ , pour  $k = 0, 1, \dots, N - 1$ . L'équation de transformée de Fourier discrète est donnée par :

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{K=0}^{N-1} X(K) e^{j2\pi k n / N} \quad (\text{II. 17})$$

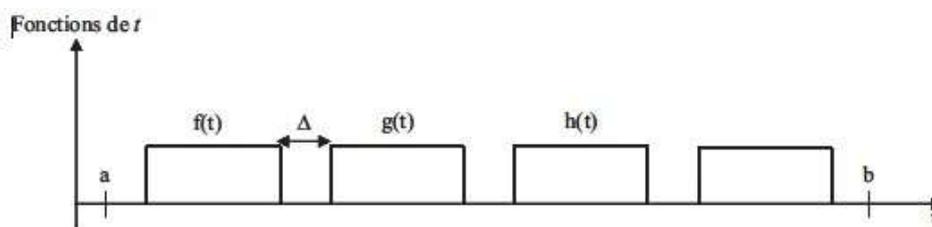
### II.6.2.1 Notion d'orthogonalité

Dans la modulation OFDM, l'orthogonalité se réfère à la propriété mathématique selon laquelle les sous-porteuses (carriers) utilisées pour transporter les données sont mutuellement orthogonales. Cela signifie que le produit scalaire de deux sous-porteuses différentes est égal à zéro, c'est-à-dire qu'elles sont totalement indépendantes les unes des autres [22].

L'orthogonalité de deux fonctions complexes  $f(t)$  et  $g(t)$  dans un intervalle  $[a, b]$  est donnée par l'expression mathématique suivante :

$$\int_a^b f(t) \cdot g(t) dt = 0 \quad (\text{II. 18})$$

Pour réaliser une base orthogonale à  $N$  dimensions, il suffit de trouver  $N$  fonctions orthogonales deux à deux comme le montre la Figure (II.10) ci-dessus. L'ensemble des fenêtres rectangulaires régulièrement espacées d'un intervalle  $\Delta$  sur l'axe de temps constitue une base orthogonale.



**Figure II.10** Exemple d'une base orthogonale

L'orthogonalité des sous-porteuses permet de maximiser l'efficacité spectrale de la transmission, en permettant la transmission simultanée de plusieurs flux de données sur différentes fréquences. Elle réduit également l'interférence entre les différentes sous-porteuses, améliorant ainsi la qualité de la transmission.

## II.7 Les Problèmes d'interférences

Bien que l'OFDM soit une technique de modulation efficace, elle peut être sujette à des problèmes d'interférences. Les principaux types d'interférences rencontrés en OFDM sont les interférences intersymbole (ISI) et les interférences interporteuses (ICI).

### II.7.1 L'interférence intersymbole (ISI)

Les signaux OFDM sont transmis à des intervalles égaux, et ils doivent parcourir un certain trajet pour atteindre le récepteur. Dans le cas d'un canal multi-trajets, un symbole transmis prend différents retards pour arriver au récepteur à cause des différents chemins de propagation, ce qui cause des étalements temporels différents. La prolongation de la durée des symboles fait chevaucher les symboles entre eux, ce qui donne naissance à l'interférence entre symboles (IES)

L'ISI est principalement causé par la dispersion temporelle du canal de transmission, qui provoque une distorsion temporelle des symboles OFDM. Cette distorsion peut rendre difficile la distinction entre les symboles, ce qui entraîne des erreurs de détection [23].

### II.7.2 L'interférence interporteuse (ICI)

L'orthogonalité dans un système OFDM signifie qu'au maximum de chaque spectre d'une sous porteuse, tous les spectres des autres sous porteuses s'annulent, ainsi les spectres des sous-porteuses se recouvrent mais demeurent orthogonaux entre eux. L'interférence entre porteuse (IEP) est causée par une perte d'orthogonalité fréquentielle suite à un décalage fréquentiel ce qui se traduit par la présence des symboles de données des sous-porteuses adjacentes dans la sous-porteuse actuelle

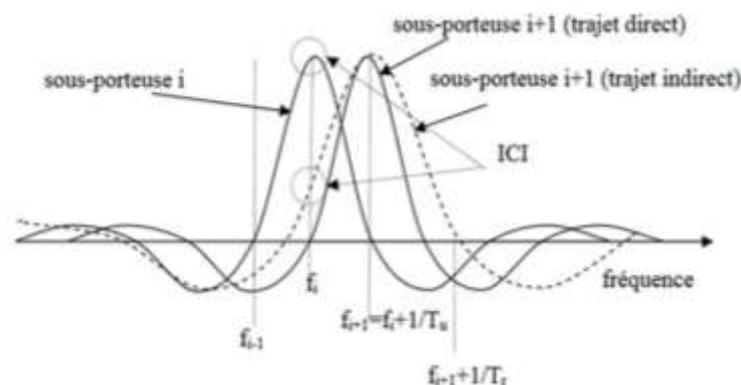


Figure II.11 Interférences entre porteuses ICI

## II.8 L'intervalle de garde

Lorsqu'un signal OFDM traverse le support de communication, le signal reçu peut être dégradé en raison de l'interférence par trajets multiples, le récepteur peut recevoir plusieurs copies retardées de la même forme d'onde transmise. Un symbole OFDM est défini pour avoir  $N$  échantillons. Si deux symboles OFDM adjacents sont transmis sans espace entre eux, la fin d'un symbole peut interférer avec le bord avant d'un autre suivant [24]. Pour éviter ces interférences, on ajoute un intervalle de garde d'une durée  $T_g$ . Chaque symbole est précédé par une extension périodique du signal lui-même, la durée du symbole totale transmis est alors  $T = T_s + T_g$ , afin que les interférences soient éliminées

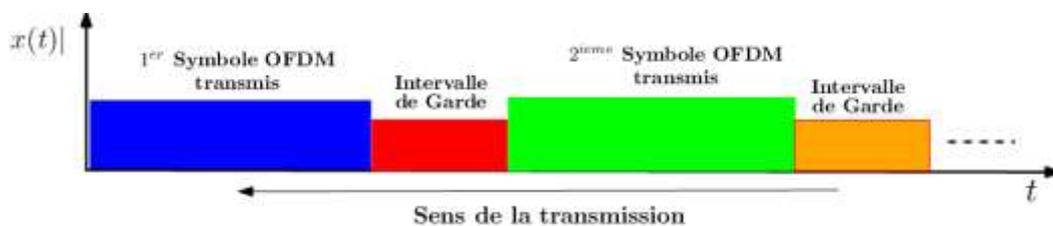


Figure II.12 L'intervalle de garde

## II.9 Préfixe cyclique

Le préfixe cyclique consiste à ajouter une copie des derniers échantillons du symbol précédent à la fin de chaque symbole OFDM. Ce préfixe est appelé préfixe cyclique car il est construit en répétant cycliquement une partie de la fin du symbole précédent à la fin du symbole actuel. Cette technique permet de prévenir les interférences intersymboles en créant une zone de garde entre les symboles OFDM [24].

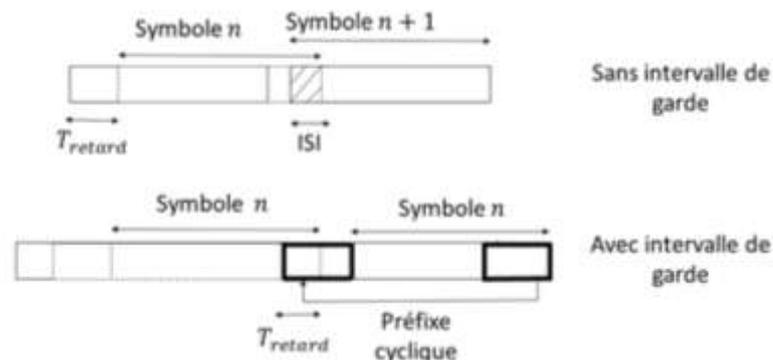


Figure II.13 Préfixe cyclique

## **II.10 Conclusion**

Ce deuxième chapitre nous a permis d'approfondir notre compréhension des aspects techniques essentiels du Courant Porteur en Ligne (CPL). Nous avons exploré en détail les différentes techniques de modulation numérique, telles que l'amplitude ASK, la fréquence FSK et la phase PSK, qui jouent un rôle crucial dans la transmission efficace des données à travers les fils électriques, ainsi que la modulation CDMA, l'étalement de spectre par séquence directe et l'OFDM, qui sont des techniques avancées contribuent à améliorer les performances, la capacité et l'efficacité globale du CPL, en permettant une transmission fiable et rapide des données.

---

# **Chapitre III**

## **Modélisation des canaux CPL**

---

### III.1 Introduction

La modélisation des canaux CPL revêt une importance primordiale dans la conception des systèmes de communication exploitant les réseaux électriques. Elle consiste à décrire de manière mathématique les caractéristiques des canaux CPL, Cette modélisation permet d'évaluer la propagation des signaux CPL en déterminant les fonctions de transfert entre le point d'injection du signal et les points de réception [25].

Ce chapitre se focalise sur les approches ascendantes et descendantes de la communication CPL, ainsi que sur les bruits et les techniques de réduction associées. Qui seront également examinées pour améliorer la fiabilité de la transmission. Enfin, nous aborderons la sécurisation des systèmes CPL, en mettant en évidence les mesures de sécurité nécessaires pour protéger les données et assurer une communication sécurisée.

### III.2 Analyse des canaux CPL

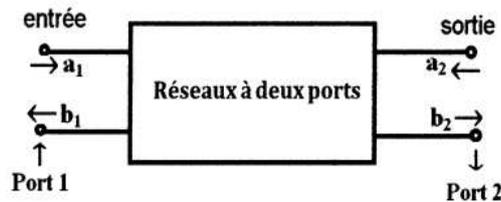
Dans le domaine de la modélisation du canal CPL, la littérature propose deux approches principales l'approche **Bottom-up** et l'approche **top-down**. La première consiste à construire le modèle de canal en se basant sur la théorie de ligne de transmission, sans nécessiter de mesures spécifiques. En revanche, l'approche top-down vise à déterminer le modèle le mieux adapté en se fondant sur des mesures expérimentales telles que les réponses impulsionnelles ou les réponses fréquentielles. Dans ce chapitre, nous adopterons l'approche top-down pour déterminer le modèle de canal le plus approprié.

#### III.2.1 Approche ascendante « Bottom-up »

Les méthodes **Bottom-up** représentent une approche analytique qui nécessite une connaissance approfondie des propriétés physiques du réseau, telles que sa topologie, les types de câbles utilisés, leurs longueurs, ainsi que les charges qui y sont connectées. Ces informations sont essentielles pour modéliser de manière individuelle chaque composant du réseau dans la gamme de fréquences de 9 kHz à 500 kHz. Une fois que les modèles unitaires sont établis, ils sont combinés de manière à calculer les fonctions de transfert pour chaque paire de nœuds présents dans le réseau, comme le nœud émetteur et le nœud récepteur. Cette approche permet ainsi d'obtenir une compréhension globale et détaillée du comportement du réseau dans son ensemble [14].

### III.2.1.1 Détermination la fonction de transfert par matrice S

Dans un système de CPL, la matrice S est utilisée pour décrire les relations entre les signaux incident et réfléchi à chaque port du canal. Les ports peuvent représenter les différentes extrémités du canal, tels que l'émetteur CPL, le récepteur CPL et les différentes charges connectées au canal [26].



**Figure III.1** Les ondes incidentes et réfléchies dans un réseau à deux ports.

Observons que  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ , et  $b_2$  sont les valeurs des ondes incidentes et réfléchies aux endroits spécifiques indiqués par port 1 et port 2 sur la Figure (III.1)

La matrice de répartition S est donnée par :

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (\text{III. 1})$$

Les paramètres  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{22}$  qui représentent des coefficients de réflexion et de transmission sont appelés les paramètres de répartition du réseau à deux ports.

Le terme  $S_{11}a_1$  représente la contribution à l'onde réfléchie  $b_1$  due à l'onde incidente  $a_1$  au port 1. De la même façon le terme  $S_{12}a_2$  représente la contribution à l'onde réfléchie  $b_1$  due à l'onde incidente  $a_2$  au port 2 et ainsi de suite [26].

Avec :

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} \text{ Coefficient de réflexion à l'entrée lorsque la sortie est adaptée.}$$

$$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} \text{ Coefficient de transmission en avant lorsque la sortie est adaptée.}$$

$$S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} \text{ Coefficient de réflexion à la sortie lorsque l'entrée est adaptée.}$$

$$S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} \text{ Coefficient de transmission en arrière lorsque l'entrée est adaptée.}$$

Les coefficients de la matrice  $S$  sont utilisés pour calculer les amplitudes et les phases des signaux transmis et réfléchis, ce qui permet de déterminer la fonction de transfert, cette dernière peut être utilisée pour analyser et prédire le comportement du canal CPL à différentes fréquences.

On peut étudier l'atténuation du signal, les pertes, les réflexions indésirables et d'autres caractéristiques du canal. Cela permet de concevoir des systèmes de communication efficaces en ajustant les paramètres du système en conséquence.

### III.2.2 Approche descendante « Top-Down »

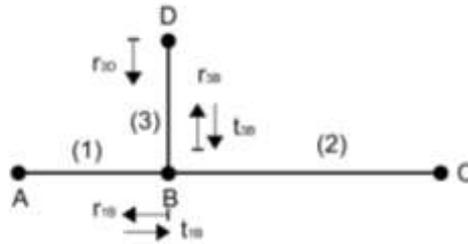
L'approche Top-Down, ou approche descendante, est une méthode de modélisation du réseau électrique qui considère ce dernier comme une entité complexe et mystérieuse, semblable à une boîte noire. Dans cette approche, la fonction de transfert du réseau électrique est déterminée en ajustant une fonction paramétrique basée sur de nombreuses mesures, qui capturent le comportement du réseau dans le domaine temporel ou fréquentiel [14].

Nous avons choisi le modèle de Zimmermann pour illustrer cette approche qui est brièvement expliqué ci-après.

### III.2.3 Modèle de Zimmerman

Plusieurs études ont été menées sur la modélisation du réseau électrique vis-à-vis des canaux de propagation. Les premiers travaux dans le domaine sont ceux de Philips et Zimmerman sur l'approche multi-trajet souvent qualifiée de méthode empirique car les paramètres du modèle sont extraits de la mesure [18].

Le modèle de Zimmerman est basé sur le phénomène des trajets multiples. Il propose une approche analytique permettant de décrire les fonctions de transfert complexes des réseaux de lignes électriques classiques en utilisant un ensemble réduit de paramètres. Il se fonde sur les effets de propagation du signal physique dans des réseaux comportant de nombreuses branches et des désadaptations d'impédance. Les trajets multiples du canal CPL sont générés par la présence des branches du réseau électrique, tandis que les désadaptations d'impédance entraînent des réflexions multiples comme indiqué dans la Figure (III.2).



**Figure III.2** Propagation par trajets multiples du signal

Dans une section de D à C. [14]

Chaque chemin dans le système électrique, représenté par les points A, B, C et D, est associé à un facteur de pondération spécifique  $g_i$ . Ce facteur de pondération prend en compte à la fois les réflexions et les transmissions le long du chemin. Les réflexions sont caractérisées par les facteurs de réflexion  $\Gamma_{1B}$ ,  $\Gamma_{3D}$  et  $\Gamma_{3B}$  tandis que les transmissions sont représentées par les facteurs de transmission  $t_{1B}$  et  $t_{3B}$  [14].

Il est important de noter que les facteurs de réflexion et de transmission sur les lignes électriques sont généralement inférieurs ou égaux à un. Cela s'explique par le fait que la transmission ne se produit que dans les jonctions, où la connexion en parallèle de deux câbles ou plus entraîne une impédance résultante inférieure à l'impédance caractéristique du câble d'alimentation. Ainsi, ces facteurs de réflexion et de transmission reflètent les caractéristiques physiques et électriques du système.

Le signal reçu est influencé par la trajectoire suivie et la longueur du trajet, ce qui a un impact sur sa puissance et son TEB (Taux d'Erreur du Bit). La propagation à travers plusieurs trajets est également responsable du retard ( $\tau_i$ ) dans les canaux CPL. Ce retard est déterminé par des facteurs tels que les réflexions, les diffractions et les interactions avec l'environnement, et il peut varier en fonction de la configuration du réseau et des obstacles présents [4]. Il est donné par :

$$\tau_i = \frac{d_i \sqrt{\epsilon_r}}{c_0} = \frac{d_i}{v_p} \quad (\text{III. 2})$$

Avec :  $d_i$  est la longueur du trajet,  $c_0$  est la vitesse de lumière,  $\epsilon_r$  est le constant diélectrique

La fonction de transfert du réseau électrique entre deux points d'accès est modélisée par l'équation suivante [27] :

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i \cdot e^{-(a_0 + a_1 f^k) d_i} \cdot e^{-j2\pi f \left(\frac{d_i}{v_p}\right)} \quad (\text{III. 3})$$

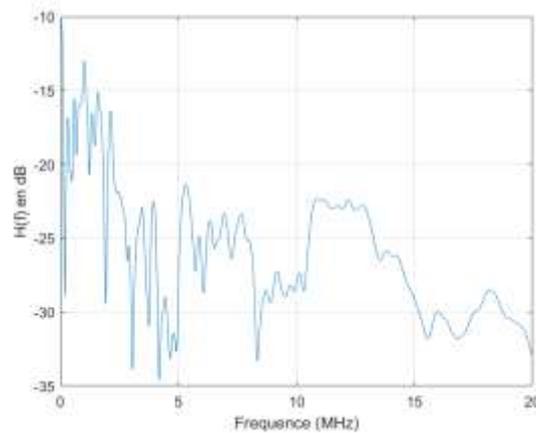
Avec  $N$  : Le nombre de trajets considérés

$g_i$  : Le coefficient de transmission du trajet  $i$        $g_i \leq 1$

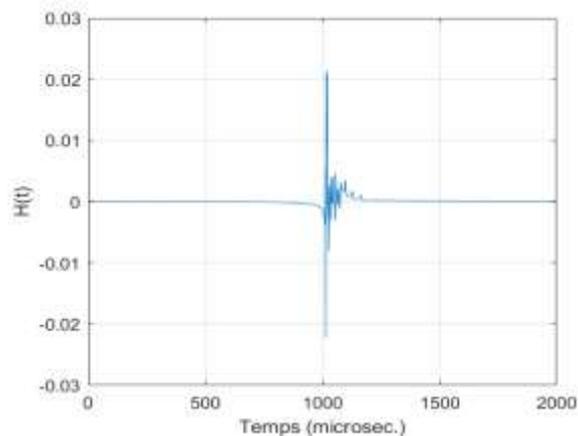
$f$  : La fréquence

$a_0, a_1$  Et  $k$  : Sont les paramètres du profil d'atténuation de la fonction de transfert estimés à partir des mesures de la fonction de transfert en utilisant la méthode des moindres carrés

$d_i$  : La distance du trajet  $i$  calculée à partir du temps de propagation et de la vitesse de propagation,



**Figure III.3** Réponse fréquentielle générée par le modèle top-down de Zimmermann



**Figure III.4** Réponse impulsionnelle générée par le modèle top-down de Zimmermann

Ce modèle a été implémenté avec des paramètres d'atténuation  $\alpha_0 = 0$   $\alpha_1 = 7.8 \times 10^{-10}$

Le tableau ci-dessous présente les valeurs des paramètres  $g_i$  et  $d_i$  pour chaque chemin du canal CPL. Les valeurs de  $g_i$  représentent la magnitude de la réponse fréquentielle à une fréquence spécifique, tandis que les valeurs de  $d_i$  indiquent le décalage de phase correspondant à cette fréquence.

**Tableau III.1** Paramètres  $g_i$  et  $d_i$  du canal CPL pour chaque chemin.

$i$	$g_i$	$d_i$	$i$	$g_i$	$d_i$
1	0.029	90	9	0.071	332
2	0.043	102	10	-0.035	411
3	0.103	4	11	0.065	490
4	-0.058	113	12	0.065	567
5	-0.045	143	13	-0.055	740
6	-0.040	148	14	0.059	960
7	0.038	200	15	0.049	1250
8	-0.038	260			

Ces paramètres permettent d'analyser les propriétés fréquentielles et temporelles du canal CPL, offrant ainsi des informations essentielles pour la conception et l'optimisation des systèmes de communication utilisant ce type de canal.

### III.2.3.1 Autres modèles

#### a) Modèle de Tlich

Ce modèle déterministe offre une approche simplifiée pour décrire les réseaux électriques. En utilisant uniquement un paramètre, il représente l'amplitude et la phase de la fonction de transfert complexe, ce qui facilite l'analyse et la prédiction des performances du réseau [14].

#### b) Modèle de Galli

Le modèle de canal (1,8-30 MHz) proposé par Galli se différencie par son utilisation d'une analyse statistique dans le domaine temporel. En considérant des mesures telles que la moyenne des canaux, le gain et le délai de propagation, ce modèle offre une représentation plus complète et réaliste des variations du canal, ce qui est essentiel pour l'analyse et la conception de systèmes de communication dans cette plage de fréquences [14].

### c) Modèle de Tonello

Tonello a développé un générateur aléatoire de canaux basé sur le modèle de Zimmermann, qui produit des canaux corrélés en introduisant une phase aléatoire dans chaque chemin du canal SISO. Bien que cette méthode ne soit pas théoriquement étayée, elle peut être utilisée dans des applications pratiques pour obtenir des canaux synthétiques avec des propriétés de corrélation spécifiques [14].

## III.3 Modélisation du bruit additif

Dans la modélisation du bruit additif, on suppose généralement que le signal observé est la somme du signal d'intérêt et du bruit additif. Mathématiquement, cela peut être représenté par :

$$Y(t) = x(t) + n(t) \quad (\text{III. 4})$$

Où  $y(t)$  est le signal observé,  $x(t)$  est le signal d'intérêt (sans bruit) et  $n(t)$  est le bruit additif.

Le bruit additif est souvent supposé être un processus aléatoire, avec une certaine distribution statistique. La nature du bruit (stationnaire ou non-stationnaire, la variance, etc.) peut varier en fonction de l'application et des caractéristiques spécifiques du système.

La modélisation du bruit additif permet de caractériser et d'estimer l'impact du bruit sur le signal d'intérêt. Elle est utilisée dans de nombreux domaines, tels que la communication sans fil, le traitement audio, le traitement d'images, etc. En utilisant des techniques statistiques et de filtrage appropriées, il est possible de réduire ou d'éliminer les effets du bruit indésirable et de récupérer le signal d'intérêt de manière plus précise.

### III.3.1 Bruit de fond coloré

Le bruit de fond coloré, également connu sous le nom de bruit rose, est un type de bruit aléatoire dont la densité spectrale de puissance (DSP) est inversement proportionnelle à la fréquence. Contrairement au bruit blanc, qui a une DSP constante sur toute la plage de fréquences, le bruit de fond coloré a une DSP décroissante à mesure que la fréquence augmente [4].

IL est utilisé dans divers domaines, tels que l'audio, la musique, la communication, l'électronique et les sciences physiques. En audio, il est souvent ajouté intentionnellement pour simuler les caractéristiques du bruit ambiant naturel, ce qui peut contribuer à une expérience d'écoute plus réaliste. Dans les communications, il peut être utilisé pour étudier les performances des systèmes de transmission dans des conditions réalistes.

D'après [4] un bruit de fond coloré  $c_k$  peut-être modélisée en utilisant la DSP suivante :

$$P_{c_k} = a + b \cdot f^{-q} \frac{\text{dBm}}{\text{Hz}} \quad (\text{III. 5})$$

Avec :  $a$ ,  $b$  et  $q$  sont les paramètres d'ajustement et  $f$  est la fréquence en MHz.

### III.3.2 Bruit impulsionnel

Le bruit impulsionnel se manifeste sous la forme d'impulsions brèves et intenses superposées au signal principal. Il est généralement indésirable car il peut perturber la qualité du signal et introduire des erreurs de mesure ou de transmission.

Peut-être causé par différentes sources, telles que des interférences électromagnétiques, perturbations atmosphériques effet de circuits à courant fort, des défauts de transmission ou des distorsions dans les systèmes de communication. Il peut se manifester sous différentes formes, notamment des impulsions positives ou négatives de durée variable [28].

Un bruit impulsionnel est caractérisé par son amplitude, sa durée et son temps d'arrivée. Ce bruit peut être défini par le modèle de l'expression [29].

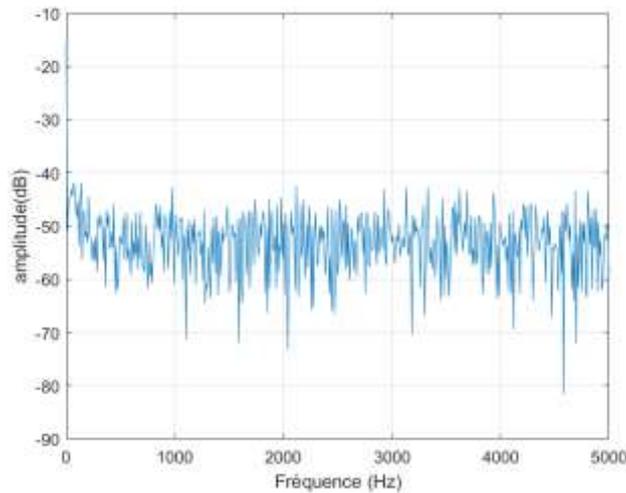
$$b(t) = A_p e^{-\frac{f_0}{4}} * \sin(2\pi f_0 t) * \text{rect}\left(\frac{t}{t_p}\right) \quad (\text{III. 6})$$

Avec :  $A_p$  : Amplitude des oscillations du bruit impulsif

- $t_p$  : Durée d'oscillation.
- $f_0$  : fréquence d'oscillation.
- $\text{rect}$  : fonction rectangulaire égale à l'unité dans l'intervalle  $[0, T_p]$

La Figure (III.5) montre la densité spectrale impulsionnel en considérant les valeurs des paramètres du bruit suivantes :  $f_0 = 6$  kHz,  $T_p = 4/f_0$  et  $A_p = 1$  V .

La courbe présente des pics ou des fréquences dominantes, indiquant les composantes les plus fortes du bruit impulsif. Ces fréquences dominantes correspondent à des sources de bruit spécifiques ou à des phénomènes particuliers présents dans le système et les variations d'amplitude indique des changements dans l'intensité du bruit dans différentes gammes de fréquences.



**Figure III.5** Densité spectrale du bruit impulsif

### III.4 Techniques de réduction du bruit impulsif

Pour atténuer les effets du bruit impulsif, des techniques de réduction de bruit impulsif ont été développées visent à réduire ou à éliminer les impulsions de bruit sans altérer excessivement le contenu du signal utile. L'objectif est d'améliorer la qualité du signal en préservant les informations importantes et en minimisant les distorsions indésirables.

#### III.4.1 Clipping

Le processus de clipping peut être mis en œuvre de différentes manières. L'une des méthodes courantes est l'utilisation d'un limiteur, qui limite l'amplitude maximale du signal. Lorsque le signal dépasse le seuil de clipping, le limiteur réduit instantanément l'amplitude du signal. Cela permet d'éviter la distorsion ou la saturation qui pourrait se produire si les amplitudes dépassaient les limites admises. Les amplitudes du signal dont la valeur absolue est supérieure à un seuil donné  $\gamma$  sont remplacées par la valeur du seuil [4].

$$\hat{r}_k = \begin{cases} r_k, & \text{si } |r_k| \leq \gamma \\ \gamma \exp(j \arg(r_k)), & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{III. 7})$$

Avec  $\hat{r}_k$  représente la sortie non-linéaire du signal.

#### III.4.2 Blanking

Les amplitudes du signal dont la valeur absolue est supérieure à un seuil donné  $\gamma$  sont supprimées ou remplacées par zéro,

$$\hat{r}_k = \begin{cases} r_k, & \text{si } |r_k| \leq \gamma \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{III. 8})$$

### III.4.3 Clipping / Blanking

La méthode de clipping/Blanking vise à éliminer les grandes amplitudes tout en écrêtant les moyennes. Pour ce faire, deux seuils,  $\gamma_1$  et  $\gamma_2$ , sont utilisés afin de réguler cette suppression et cet écrêtage [4].

$$\hat{r}_k = \begin{cases} r_k, & \text{si } |r_k| \leq \gamma \\ \gamma \exp(j \arg(r_k)) & \text{si } \gamma_1 \leq |r_k| \leq \gamma_2 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{III. 9})$$

## III.5 Sécurité des systèmes CPL

La transmission de données à travers les réseaux électriques présente des défis uniques qui nécessitent une attention particulière pour garantir la protection des informations sensibles [4].

L'un des problèmes majeurs associés aux systèmes CPL réside dans la vulnérabilité potentielle des câbles électriques utilisés pour la transmission des données. Étant donné que ces câbles sont physiquement accessibles, ils peuvent être exposés à des risques de compromission de la confidentialité, de l'intégrité et de la disponibilité des données. De plus, l'interconnexion des systèmes CPL avec d'autres réseaux, tels que l'Internet, expose ces systèmes à des menaces supplémentaires, notamment les attaques malveillantes et les violations de sécurité.

Pour garantir la sécurité des systèmes CPL, il est essentiel de mettre en place des mesures de protection solides. Cela comprend l'utilisation de techniques de cryptage robustes pour sécuriser les données transmises, la mise en œuvre des mécanismes d'authentification et de contrôle d'accès pour garantir l'identité des utilisateurs et des dispositifs connectés, ainsi que la protection contre les attaques physiques et les vulnérabilités logicielles.

### III.5.1 Cryptographie

Le mot cryptographie désigne l'ensemble des techniques permettant de chiffrer des messages, c'est à dire permettant de les rendre inintelligibles sans une action spécifique. Un algorithme de cryptographie est une fonction mathématique utilisée lors du processus de cryptage et de décryptage. Cet algorithme est associé à une clé (un mot, un nombre ou une phrase), afin de crypter des données. Avec des clés différentes, le résultat du cryptage variera également. La sécurité des

données cryptées repose entièrement sur deux éléments : l'invulnérabilité de l'algorithme de cryptographie et la confidentialité de la clé [30]. Les objectifs de la cryptographie sont :

1. **La confidentialité** : consiste à rendre l'information intelligible à d'autres personnes que les acteurs de la transaction.
2. **Authentification** : consiste à assurer l'identité d'un utilisateur, c.-à-d. de garantir à chacun des correspondants que son partenaire est bien celui qu'il croit être un contrôle d'accès peut permettre l'accès à des ressources uniquement aux personnes autorisées.
3. **Intégrité** : vérifier l'intégrité des données consiste à déterminer si les données n'ont pas été altérées durant la communication.
4. **Non- répudiation de l'information** : est la garantie qu'aucun des correspondants ne pourra nier la transaction.

### III.5.2 Classes des algorithmes cryptographiques

Les algorithmes de chiffrement peuvent être classés en deux grands types : algorithmes à clé secrète et algorithmes à clés publiques.

#### III.5.2.1 Algorithmes de chiffrement asymétrique

Le chiffrement asymétrique utilise une paire de clés, une clé publique et une clé privée, la clé publique est partagée avec le monde entier, tandis que la clé privée est gardée secrète par le propriétaire. Lorsqu'une personne souhaite envoyer des données sécurisées à une autre personne, elle utilise la clé publique du destinataire pour chiffrer les données. Une fois les données chiffrées, seule la clé privée correspondante détenue par le destinataire peut les déchiffrer avec succès. Parmi les algorithmes de chiffrement asymétrique, l'algorithme RSA (Rivest-Shamir-Adleman) est le plus utilisé.

##### a) Algorithme RSA

Ce système repose sur la génération d'une paire de clé : la clé  $K_c$  pour le chiffrement ou la signature des données confidentielles, qu'est publique et la clé  $K_d$  pour le déchiffrement qu'est privée. L'émetteur chiffre le message à envoyer avec la clé publique du destinataire, à la réception ce dernier le déchiffre avec sa clé privée. Grâce à ce procédé de chiffrement, tous les correspondants ont librement accès aux clés publiques qui sont stockées dans des annuaires, alors que la clé secrète est générée localement par chaque correspondant et n'est jamais communiquée [31].

Les étapes principales de l'algorithme RSA sont les suivantes [32] :

### 1) Génération des clés

- Choisir au hasard deux grands nombres premiers P et Q. Il faut que P et Q contiennent au moins 100 chiffres décimaux chacun
- Calculer N le produit des deux nombres  $N=P \times Q$ , il est difficile de retrouver P et Q de N, (P et Q sont gardés secrets).
- Calculer le nombre d'Euler du nombre N :  $\varphi(N) = (P-1)(Q-1)$ .
- Choisir un nombre entier  $K_c \in \varphi(N)$  et premier avec  $\varphi(N)$ .
- Calculer  $K_d$  tel que  $K_d = K_c^{-1} \text{ mod } \varphi(N)$ . Choisir un des deux nombres  $(K_c, K_d)$  comme clé secrète  $K_s$  et l'autre comme clé publique  $K_p$

### 2) Chiffrement

Le chiffrement C est obtenu par :

$$C = M^{K_c} \text{ mod } N \quad (\text{III.10})$$

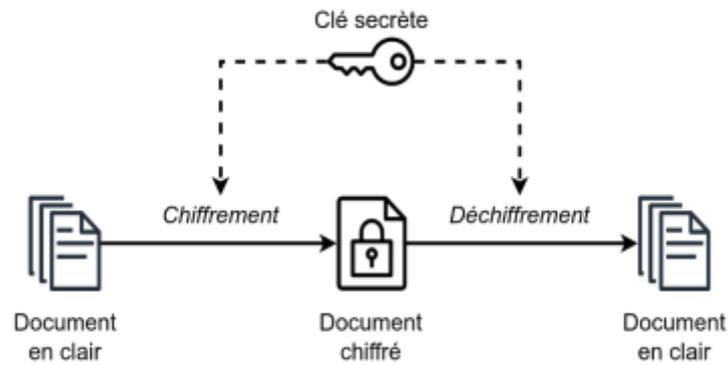
### 3) Déchiffrement

Le déchiffrement du message chiffré est :

$$C^{K_d} \text{ mod } N \equiv M^{K_c K_d} \text{ mod } N \equiv M \quad (\text{III.11})$$

## III.5.2.2 Algorithmes de chiffrement symétrique

Les algorithmes symétriques utilisent une seule clé à la fois pour chiffrer et déchiffrer les données Figure (III.6), cela signifie que la clé doit être partagée de manière sécurisée entre les parties concernées. Les algorithmes de chiffrement symétrique populaires incluent DES (Data Encryption Standard), AES (Advanced Encryption Standard), générateurs pseudo-aléatoires utilisant des fonctions mathématiques. Nous nous intéressons dans ce travail au dernier type qui est basé sur la théorie du chaos.



**Figure III.6** Chiffrement symétrique

### III.6 Systèmes chaotiques

Le cryptage chaotique est une méthode de chiffrement basée sur la théorie du chaos. Observée pour la première fois par Jacques Hadamard et Henri Poincaré au début du XXe siècle, a été formalisée à partir des années 1960 par de nombreux chercheurs. Il est caractérisé par une sensibilité extrême aux conditions initiales et dépend de plusieurs paramètres. Il utilise des systèmes dynamiques chaotiques pour générer des clés de chiffrement aléatoires et pour effectuer des opérations complexes sur les données à chiffrer. Le caractère imprévisible et non linéaire du chaos rend le cryptage chaotique robuste contre les attaques cryptographiques traditionnelles [32].

#### III.6.1 Fonctions chaotiques

Il existe plusieurs cartes ou fonctions chaotiques dans la littérature. Le tableau (III.2) présente les cartes les plus utilisées dans la cryptographie.

**Tableau III.2** Cartes chaotiques continues et discrètes

Carte	Equation mathématique
Carte logistique	$x_{n+1} = px_n(1 - x_n)$
Carte sine	$x_{n+1} =  \sin(p\pi x_n) $
Carte tangent-feedback	$x_{n+1} = px_n(1 - \tan(0.5x_n))$
Carte logarithm-feedback	$x_{n+1} = px_n(1 - \log(1 + x_n))$
Carte Exactly solvable	$x_n = \sin^2 \pi \theta k^n$
Carte tent	$x_{n+1} = 1 -  px_n - 1 $
Carte sawteeth	$x_{n+1} = p/qx_n \text{ mod } 1$

Dans ce travail nous nous intéressons seulement à la carte Sine et la carte Logarithme-feedback.

## III.6.2 Propriétés de système chaotique

### III.6.2.1 Non- linéarité

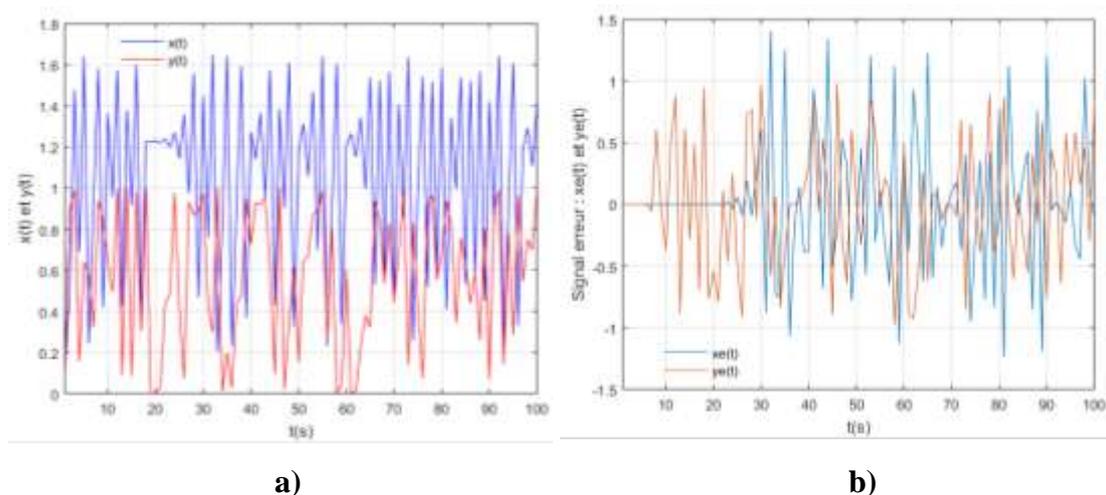
Dans le contexte des systèmes dynamiques, la non-linéarité signifie que les interactions et les relations entre les composantes du système ne suivent pas une fonction linéaire, où un changement proportionnel dans une variable entraînerait un changement proportionnel dans une autre variable [33].

### III.6.2.2 Déterministe

Le déterminisme veut dire qu'à partir d'un événement d'un phénomène (passé ou présent) on peut prédire le futur de ce phénomène. Un système chaotique généralement régi par des équations différentielles non linéaires qui décrivent son comportement dynamique, et qui nous permet de prédire son évolution au cours du temps [33].

### III.6.2.3 Sensibilité aux conditions initiales

Une séquence pseudo aléatoire parfaite doit être sensible aux conditions initiales, c'est à dire qu'un très léger changement de la valeur initiale peut conduire à deux séquences complètement différentes, la Figure (III.7.a) illustre les deux fonctions chaotiques sélectionnées ( $x$  pour la carte Sine et  $y$  pour la carte Logarithm-feedback). L'aspect de la sensibilité aux conditions initiales de ces cartes est montré sur la Figure (III.7.b), dont la carte Logarithm-feedback est plus sensible que la carte Sine. Cette caractéristique garantit que les cartes croisées pourraient être plus adapté à la sécurité de l'information.



**Figure III.7** Cartes chaotiques et leurs sensibilités aux conditions initiales avec  $x_0 = 0.11$ ,

$$y_0 = 0.13, r = 5, \text{erreur} = 0.0000001$$

### III.7 Conclusion

Ce chapitre explore deux approches principales pour la modélisation des canaux CPL : l'approche ascendante (bottom-up) et l'approche descendante (top-down). L'approche ascendante qui nécessite une connaissance détaillée des propriétés physiques du réseau électrique. En revanche, l'approche descendante utilise des mesures expérimentales pour ajuster une fonction paramétrique représentant la fonction de transfert du réseau. Un exemple d'approche descendante présenté est le modèle de Zimmermann, qui utilise le phénomène des trajets multiples pour décrire les fonctions de transfert complexes des réseaux électriques. Nous avons également étudié le système de chiffrement chaotique qui revêt une grande importance dans la sécurisation des réseaux CPL. Le chiffrement chaotique offre une méthode de cryptage robuste et non linéaire qui peut renforcer la confidentialité des données transmises à travers les canaux CPL, la sécurisation des réseaux CPL est donc un aspect essentiel à prendre en compte pour garantir un environnement sécurisé et fiable. Les utilisateurs des réseaux CPL peuvent être assurés que leurs données sont protégées, que les accès non autorisés sont prévenus et que leurs systèmes restent intègres.

---

**Chapitre IV**

**Transmission robuste des images  
médicales sur les réseaux CPL**

---

### IV.1.1 Introduction

L'utilisation des réseaux CPL pour la transmission des données médicales tel que les images a ouvert de nouvelles opportunités en utilisant les infrastructures électriques déjà existantes. Cette méthode offre une solution pratique et économique pour envoyer des flux d'images haute résolution sur de grandes distances. L'un des principes fondamentaux employés pour la transmission de données via les réseaux CPL est la modulation OFDM qui a permis d'améliorer considérablement les performances de transmission d'images.

La technique de modulation OFDM permet de surmonter les effets de distorsion et de bruit causés par le canal de transmission électrique. En utilisant des sous-porteuses orthogonales, l'OFDM offre une résistance accrue aux interférences et une meilleure capacité de récupération du signal envoyé. Ainsi, la transmission d'image médicale dans les réseaux CPL bénéficie grandement de l'utilisation de l'OFDM.

Pour comprendre et analyser le processus de transmission des images médicales dans les réseaux CPL, nous pouvons décomposer la chaîne de communication en trois blocs : l'émetteur, le canal de transmission et le récepteur. Dans ce chapitre, nous allons simuler ce processus de communication utilisant le logiciel Matlab et des images médicales.

### IV.2 Implémentation sur Matlab

Les résultats présentés dans ce projet sont obtenus en exécutants des programmes Matlab version R2018a sur Intel(R) Core(TM) i5-8350U qui possède les propriétés suivantes :

- Processeur : Intel(R) Core(TM) i5-8350U CPU @ 1.70GHz 1.90 GHz
- Mémoire installée (RAM) : 8,00 Go.
- Type du système : Système d'exploitation 64 bits, processeur x64 (windows10).

### IV.3 Implémentation du système OFDM

L'implémentation du système OFDM est une étape cruciale pour la mise en œuvre d'une transmission efficace de données avec la technologie courant porteur en ligne. L'OFDM est la technique de modulation la plus utilisée dans les systèmes de communication modernes en raison de sa capacité à surmonter les problèmes de distorsion du canal et de réduction de l'interférence entre les sous-porteuses.

Dans ce travail, la modulation OFDM est adoptée pour la transmission à haut débit des images médicales. La Figure (IV.2) illustre la structure du système de transmission OFDM à travers un canal avec un bruit additif. A partir d'une image à l'entrée Figure (IV.1), une séquence de données est construite, qui est la version binaire de l'image originale, passe à

travers les étages suivants : codage source, modulation numérique, conversion série/parallèle, IFFT, conversion parallèle/série et ajout d'intervalle de garde. Un exemple du signal temporel résultant des opérations précédentes est donné par la Figure (IV.2).

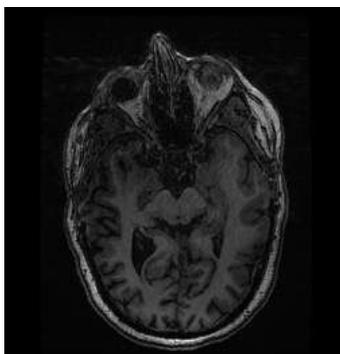


Figure IV.1 Image médicale originale de taille 256×256

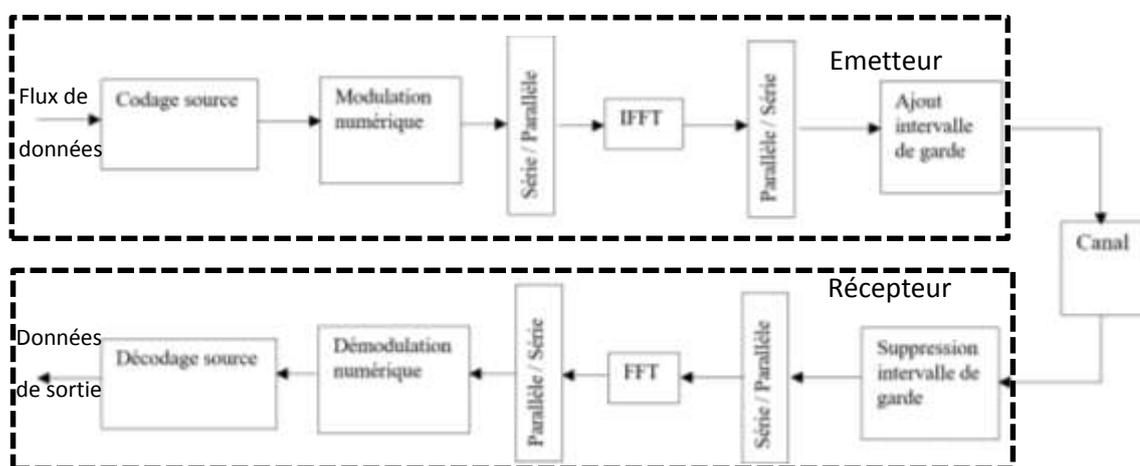


Figure IV.2 Schéma bloc de la modulation OFDM avec bruit additif

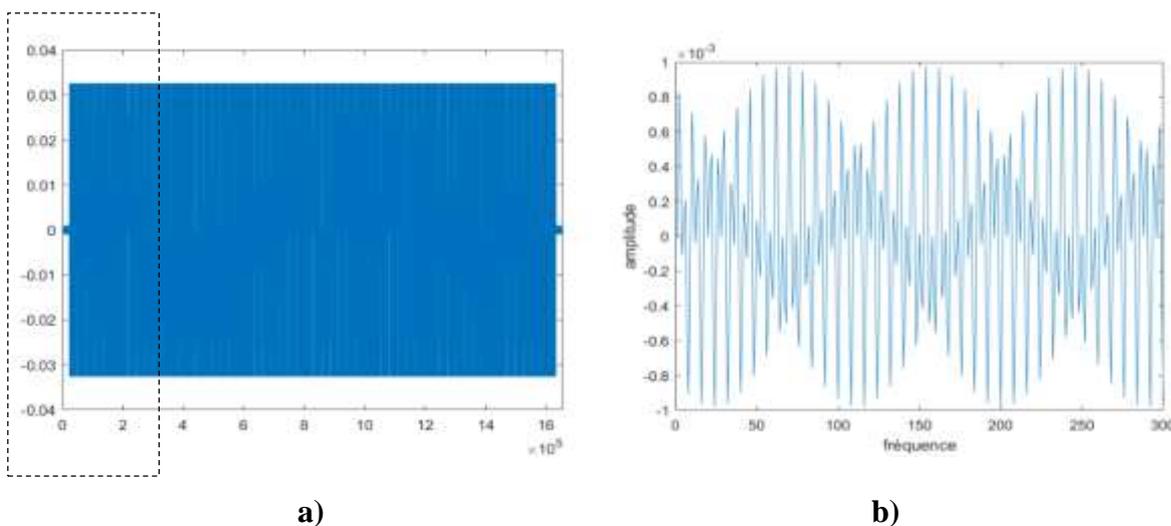


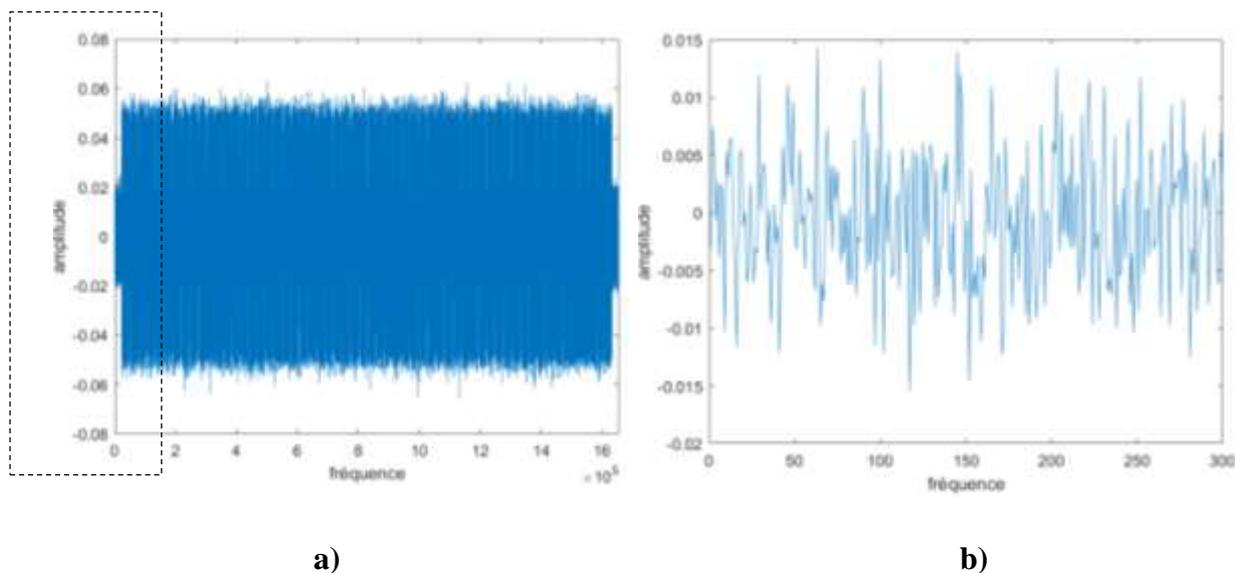
Figure IV.3 Signal temporel transmis a) Signal complet, b) Zoom du signal temporel

Ce signal est obtenu en utilisant la modulation BPSK avec un SNR=10 dB et clipping =10 dB sur l'image médicale donnée dans la Figure (IV.1).

Le signal transmis passe à travers le canal avec bruit additif (Figure IV.4). Le signal OFDM reçu est donné dans le domaine temporel par :

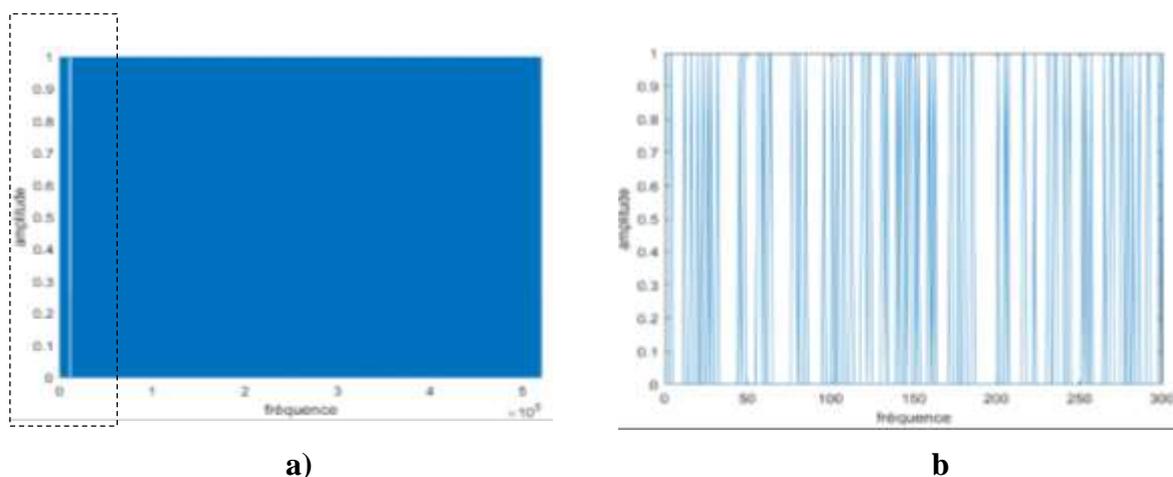
$$r_k = s_k + w_k, k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (IV.1)$$

Avec  $s_k$  est le signal transmis,  $w_k$  est le bruit blanc gaussien (AWGN).



**Figure IV.4** Signal temporel modulé et transmis à travers le canal de transmission a) Signal complet, b) Zoom du signal temporel

Ensuite, le signal passe par le bloc de suppression d'intervalle de garde, conversion série/parallèle, FFT, conversion parallèle/série, démodulation numérique et le bloc de décodage. Le signal à la sortie du système OFDM est donné par la Figure (IV.5)



**Figure IV.5** Signal temporel démodulé a) Signal complet, b) Zoom du signal temporel

### IV.3.1 Paramètres d'évaluation

L'évaluation des performances des techniques de modulation numérique étudiées dans ce travail est faite en utilisant les paramètres suivants : perte de données, variation de taux d'erreur des bits (BER), erreur de phase et pourcentage d'erreur des pixels d'image reçue.

- a) **Perte de données** : Une ou plusieurs lignes complètes de pixels peuvent être manquantes à la sortie du récepteur.
- b) **Taux d'Erreur des Bits (Bit Error Ratio - BER)** : Les données démodulées sont comparées aux données d'origine pour trouver le nombre total d'erreurs. En divisant le nombre total d'erreurs par le nombre total de symboles démodulés, on obtient le taux d'erreur des bits (BER).
- c) **Erreur de phase** : est définie par la différence entre la phase reçue et la phase traduite pour le symbole correspondant avant la transmission. Des valeurs d'erreur de phase plus faibles indiquent une meilleure précision de la transmission en termes de cohérence de phase.
- d) **Pourcentage d'erreur des pixels dans l'image reçue** : Cela se fait en comparant l'image reçue et l'image originale pixel par pixel. Des pourcentages d'erreur plus faibles indiquent une meilleure précision de la transmission.

Le tableau ci-après présente les résultats de simulation par différents types de modulation numérique (BPSK, QPSK, 16PSK, 256PSK) en fonction du rapport SNR.

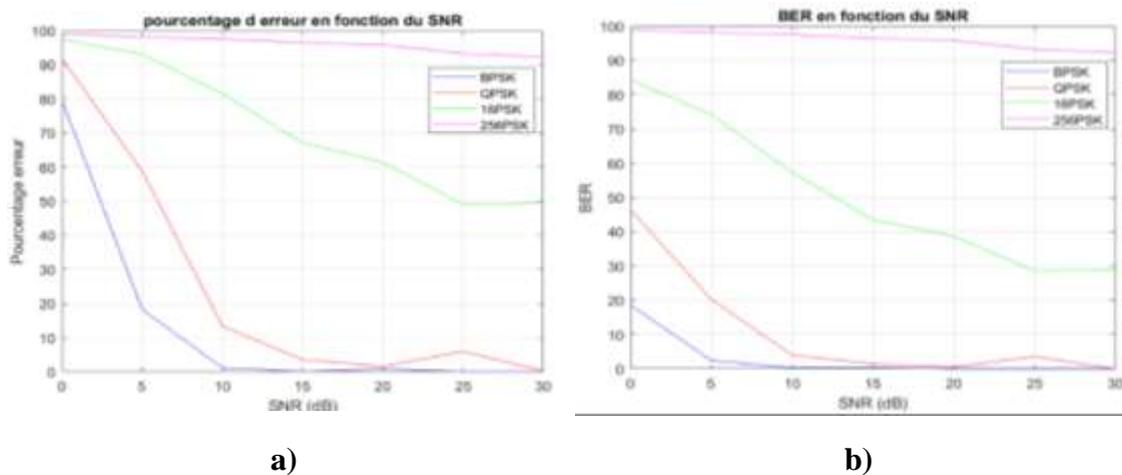
**Tableau IV.1** Résultats de différents paramètres en fonction du SNR pour les différents types de modulation numérique

Type de modulation	$T_E$ (s)	$T_R$ (s)	Pertes de données (%)	Nombre d'erreur	BER (%)	Erreur de phase (dégrée)	Pourcentage d'erreur (%)
BPSK SNR=0	1.260024	3.343751	0.896835	96606	18.592880	53.065149	79.475271
BPSK SNR=5	1.290970	1.343654	0.896835	12779	2.459458	27.964443	18.190207
BPSK SNR=10	1.937102	2.435561	0.896835	1672	0.321795	15.151457	1.188792
BPSK SNR=15	1.254789	1.335570	0.896835	1651	0.317753	7.926658	0.061516
BPSK SNR=20	1.963161	2.440398	0.896835	0	0.000000	5.085304	0.816622
BPSK SNR=25	2.021822	1.593482	0.896835	0	0.000000	2.553179	0.061516
BPSK SNR=30	1.298853	1.339714	0.896835	0	0.000000	1.424923	0.061516
QPSK SNR=0	1.671946	2.100344	2.253342	119054	46.462455	51.872453	91.761081
QPSK SNR=5	0.897106	1.200574	2.253342	51940	20.270297	29.136811	58.772722
QPSK SNR=10	1.499738	1.960929	2.253342	10429	4.070060	17.249686	13.382408
QPSK SNR=15	1.159585	1.284454	2.253342	3785	1.477148	13.036916	3.534300
QPSK SNR=20	1.471193	1.953243	2.253342	1323	0.516319	10.456038	1.595182
QPSK SNR=25	1.135308	1.265447	2.253342	9279	3.621257	11.481030	5.952751
QPSK SNR=30	1.441466	1.981278	2.253342	28	0.010927	8.816126	0.244335
16PSK SNR=0	1.277241	1.931864	1.502228	109026	84.448851	50.253644	97.545084
16PSK SNR=5	0.740042	1.137332	1.502228	95698	74.125311	30.154688	93.118515
16PSK SNR=10	1.296924	1.885216	1.502228	74091	57.389061	17.620142	81.551075

16PSK SNR=15	0.749609	1.113862	1.502228	56242	43.563666	14.459012	67.161252
16PSK SNR=20	1.214799	2.035931	1.502228	49946	38.686940	11.384512	61.451643
16PSK SNR=25	0.802006	1.128901	1.502228	36936	28.609715	8.416294	49.048913
16PSK SNR=30	1.296801	2.131828	1.502228	37493	29.041153	8.470184	49.539896
/							
256PSK SNR=0	1.301517	2.161320		64911	99.046326	50.626420	99.046326
256PSK SNR=5	0.670228	1.130393		64346	98.184204	27.151406	98.184204
256PSK SNR=10	1.289909	1.797832		63970	97.610474	27.222466	97.610474
256PSK SNR=15	0.670228	1.130393		63229	96.479797	22.199856	96.479797
256PSK SNR=20	1.567750	1.090833		62856	95.910645	22.781687	95.910645
256PSK SNR=25	0.691719	1.097429		61171	93.339539	7.673943	93.339539
256PSK SNR=30	1.282732	2.048932		60517	92.341614	7.390726	92.341614

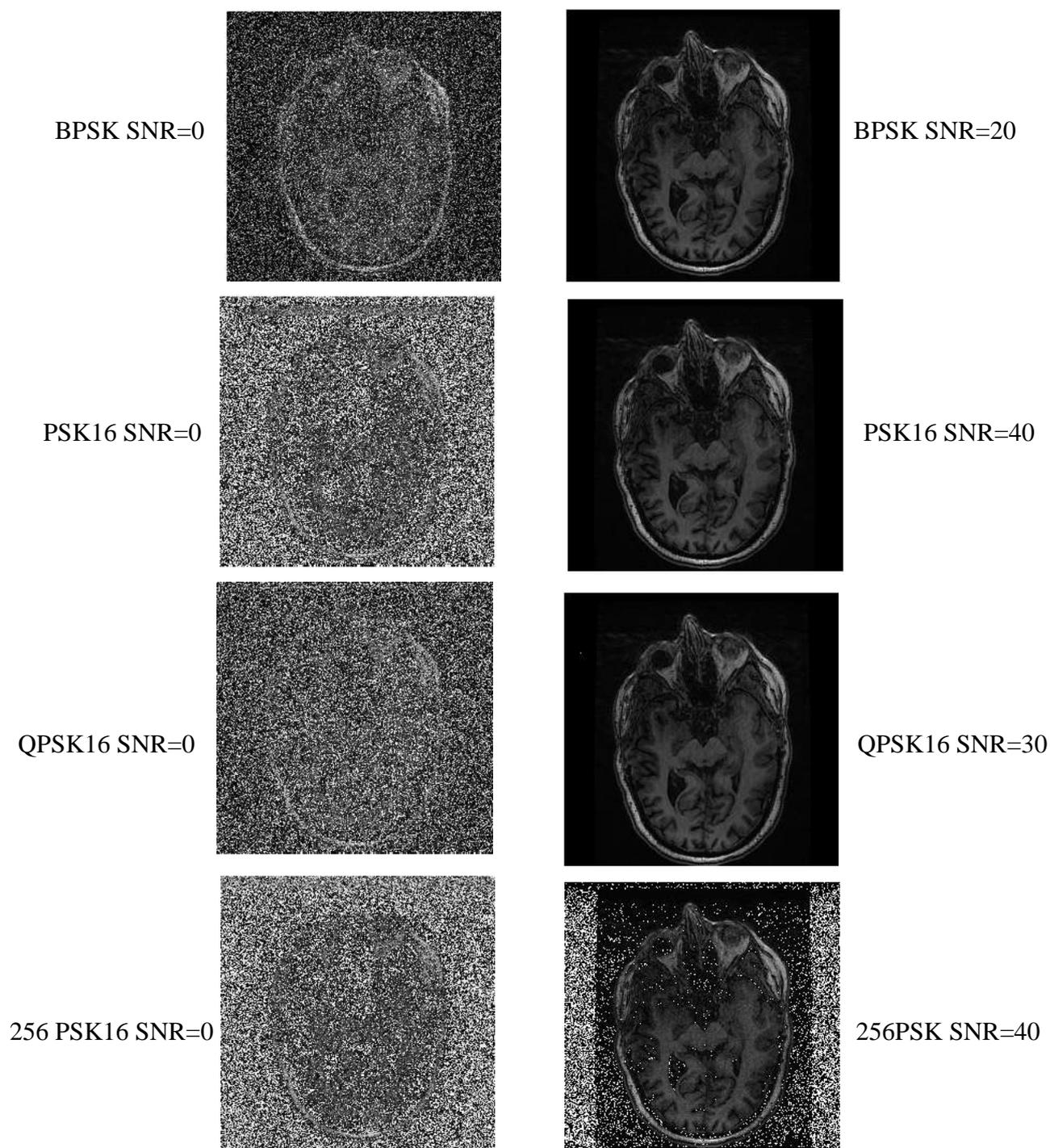
A partir de ces résultats, certaines observations peuvent être faites :

1. Temps d'émission ( $T_E$ ) et temps de réception ( $T_R$ ) : Ces valeurs varient pour chaque modulation, ce qui influe la durée de transmission des images médicales dans le système OFDM. Des temps de transmission plus courts peuvent indiquer une meilleure synchronisation entre les partenaires de transmission.
2. Pertes de données (%) : Les pourcentages de pertes de données varient également selon la modulation. Il est souhaitable d'avoir des pertes de données aussi faibles que possible pour une transmission fiable. Dans notre cas la modulation BPSK a un taux de perte de données plus faible par rapport aux autres modulations Figure (IV.6.a).
3. Nombre d'erreurs et BER : Les modulations sont évaluées en termes de nombre d'erreurs et de taux d'erreur des bits (BER). Un nombre d'erreurs plus faible et un BER plus bas indiquent une meilleure performance de la modulation en termes de précision de la transmission, d'après les résultats du tableau (IV.1) la modulation BPSK a un BER plus faible par rapport aux autres modulations Figure (IV.2).



**Figure IV.6** Variation du pourcentage d'erreurs et du BER en fonction du SNR a) Pourcentage d'erreurs, b) Taux d'erreur des bits (BER)

La Figure (IV.6) met en évidence la relation entre le taux d'erreur des bits et le rapport du signal/bruit, tel qu'on a observé dans le tableau précédent. Il est clair que les modulations PSK256 et PSK16 nécessitent un SNR relativement élevé pour transmettre des données avec un pourcentage d'erreur acceptable, Ainsi, une modulation PSK d'ordre supérieur exige un SNR plus élevé pour minimiser le taux d'erreur des bits. La Figure suivante donne les images reçues avec les différents types de modulation à différentes valeurs du SNR.



**Figure IV.7** Image reçue à travers d'un canal de transmission avec un bruit additif

Certaines images reçues avec un faible SNR, en particulier les images modulées en 256PSK, présentent un taux d'erreur binaire (BER) assez élevé, la plupart des informations dans les images reçues restent observables. Par exemple, à un SNR de 15 dB, même si l'image reçue en 256-PSK a un BER de 96,47 %, l'image est toujours observable. Cela s'explique par le fait que, pour les images numériques en niveaux de gris, si la valeur décodée d'un pixel diffère légèrement de quelques niveaux de gris, cela n'est pas facilement observable par l'œil humain, mais sera comptabilisé comme une erreur de bit. En réalité, en basculant entre l'image originale et l'image reçue dans ce cas, il est évident que le niveau de gris de la plupart des pixels a changé, mais les contenus relatifs sont encore en quelque sorte intacts.

Selon ces résultats, la modulation BPSK semble fournir les meilleurs résultats en termes de taux d'erreur des bits (BER) pour tous les niveaux de SNR examinés. Toutefois, il est important de souligner que le choix de la modulation dépend également d'autres critères de performance et des contraintes spécifiques du système de communication.

#### IV.4 Implémentation du model de canal

Pour mettre en place le canal CPL, il a été nécessaire de comprendre les techniques de modulation et de démodulation spécifiques à ce type de canal. Ainsi, on utilise des méthodes de modulation appropriées, telles que la modulation OFDM pour transmettre les données sur les sous-porteuses du signal électrique.

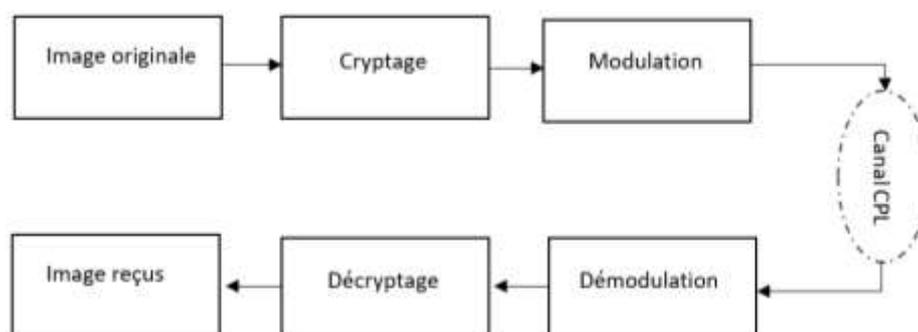
Dans le cadre de cette implémentation dans Matlab, le modèle du canal choisi est celui de Zimmerman. Ce modèle adopte une approche descendante (top-down) et repose sur le concept des trajets multiples. Zimmerman propose une approche analytique permettant de décrire les fonctions de transfert complexes des réseaux électriques.

La fonction de transfert du réseau électrique entre deux points d'accès est modélisée par l'équation (III.3). Dans cette étude, nous supposons que le canal CPL est composé de 15 trajets, le facteur de pondération  $g_i$  le long du  $i$ -ème chemin avec la distance  $d_i$  sont indiqués dans le tableau (III.1) du chapitre III.

#### IV.5 Applications de l'algorithme proposé

Le système implémenté est évalué dans une deuxième étape en appliquant le canal CPL proposé par Zimmerman qui a été expliqué dans le chapitre III. Pour cela, la performance de l'algorithme a été testé pour une modulation BPSK avec une taille de l'image de 256×256, clipping=10 dB et SNR=15 dB.

Le schéma proposé qui décrit le processus de transmission OFDM dans un canal CPL multi trajets est donné par la Figure (IV.8) . Il comporte les différentes étapes nécessaires pour assurer une transmission sécurisée, efficace et fiable des images médicales.



**Figure IV.8** Schéma bloc du processus de transfert des images médicales sur un canal CPL

Tout d'abord, l'image médicale est chargée et stockée dans l'ordinateur. Ensuite, les valeurs des pixels de l'image subissent un processus de cryptage basé sur des cartes chaotiques. Les valeurs chiffrées sont ensuite enregistrées et modulées à l'aide de la technique OFDM.

Deux modèles de canal ont été implémentés sur Matlab pour, l'un est celui de Tonello, et l'autre est celui de Zimmermann, ces deux modèles se basent sur l'approche descendante. Le modèle de Zimmermann est défini par :

Le code Matlab simule également le modèle de canal de Zimmermann avec 15 trajets. Le signal reçu est enregistré, puis démodulé afin de permettre la récupération de l'image originale. Cette étape comprend le décodage du signal OFDM, le filtrage, le traitement des interférences et du bruit, ainsi que la démodulation des symboles.

Une fois le signal est démodulé, le processus de déchiffrement est effectué pour récupérer les valeurs originales des pixels de l'image

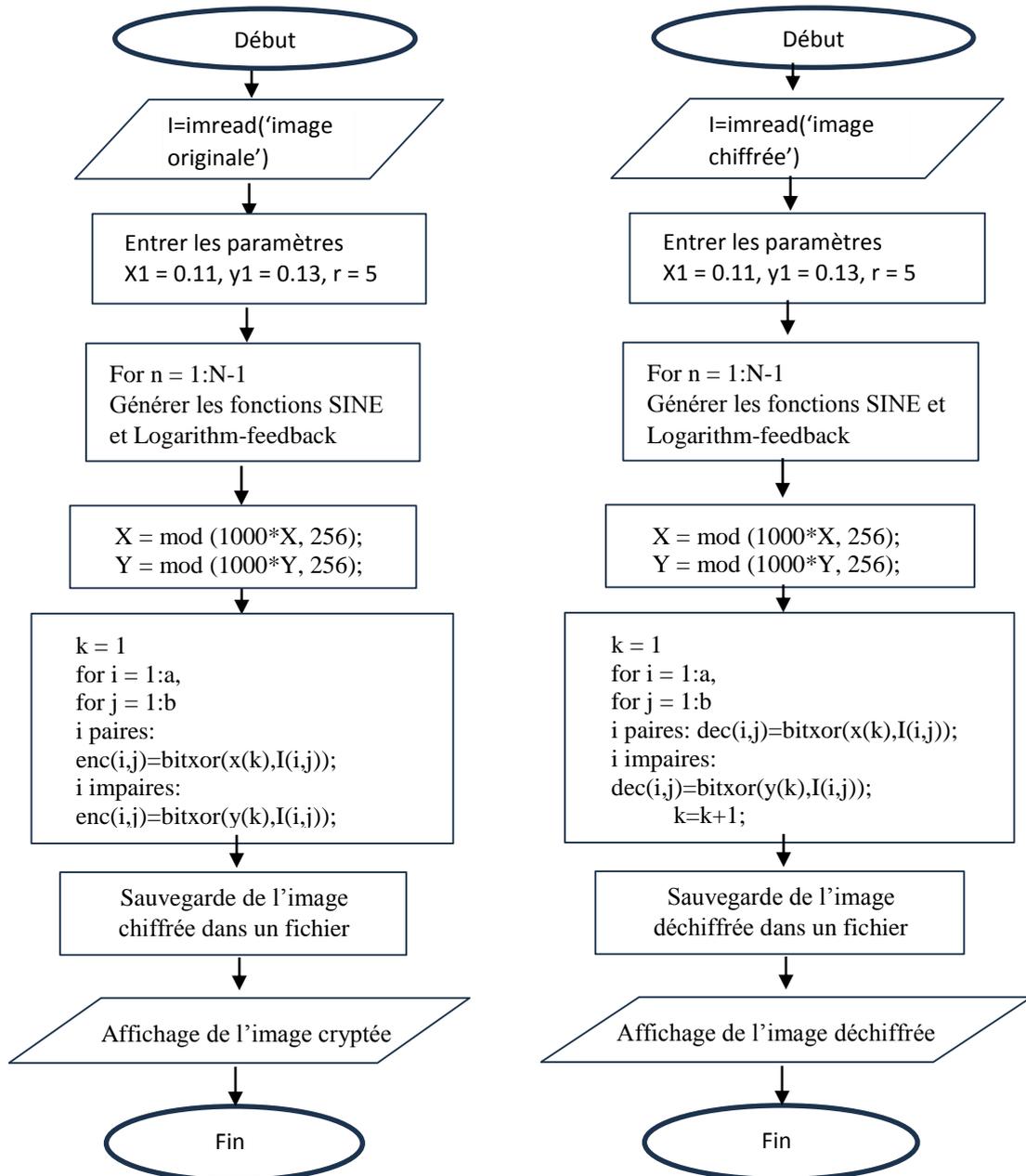
### IV.5.1 Algorithme de chiffrement proposé

Dans cette partie, nous proposons un algorithme de chiffrement pour la sécurisation des images médicales qui sont considérées comme des données particulières en raison de leurs qualités d'information. Cet algorithme est basé sur les deux fonctions chaotiques données par les tableaux IV.3. Les conditions initiales et les paramètres de contrôle  $r$  sont fixés comme suit :  $x_0 = 0.11$ ,  $y_0 = 0.13$ ,  $r = 5$ .

**Tableau IV.2** Les cartes chaotiques utilisées pour le chiffrement

Carte chaotique	Equation mathématique
Carte sine	$x_{n+1} =  \sin(r \pi x_n) $
Carte logarithm-feedback	$x_{n+1} = r x_n (1 - \log(1 + x_n))$

L'algorithme de chiffrement/déchiffrement développé est donné la Figure ci-dessous :

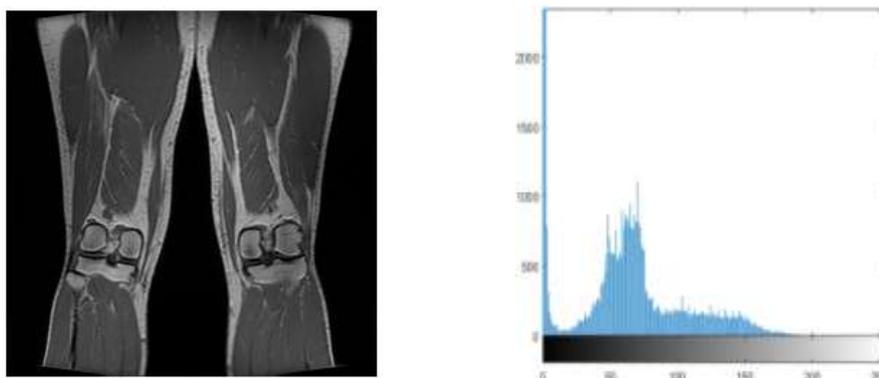


**Figure IV.9** Organigramme de l'algorithme de chiffrement proposé

## IV.6 Résultat de simulations

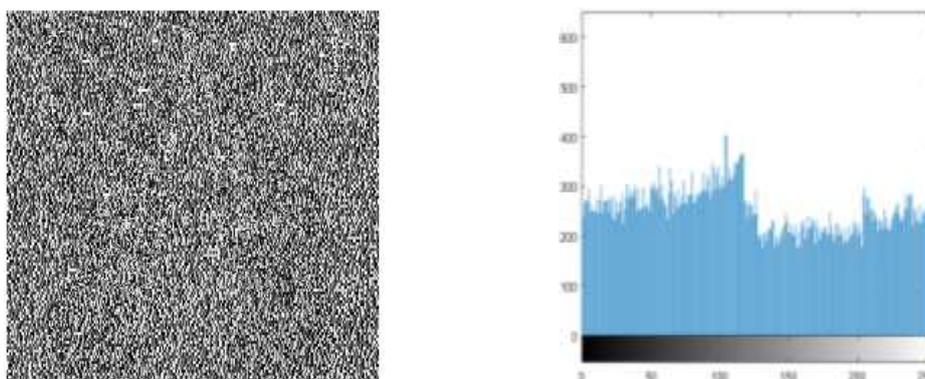
Nous présentons dans ce qui suit les résultats obtenus dans notre système de transmission avec chiffrement de l'image originale avant transmission, les paramètres initiaux des fonctions chaotiques sont considérés comme des clefs symétriques pour l'algorithme du chiffrement et du déchiffrement de l'image originale.

La Figure (IV.10) montre l'image originale et son histogramme avant l'opération du chiffrement par l'algorithme proposé.



**Figure IV.10** Image originale et son histogramme avant le bloc OFDM

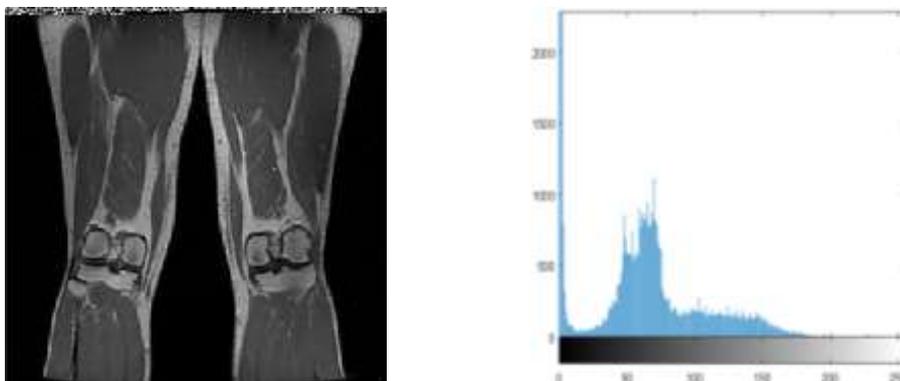
La Figure (IV.11) montre le résultat du chiffrement par l'algorithme proposé qui est basé sur deux fonctions chaotiques. La fonction SINE est utilisée pour chiffrer les pixels des lignes impaires de l'image originale, tandis que les lignes paires de l'image sont chiffrées par la deuxième fonction chaotique (logarithm-feedback).



**Figure IV.11** Image chiffré par algorithme proposé et son histogramme

L'histogramme de l'image chiffré est quasi uniforme et nettement différent de l'histogramme de l'image originale en clair. L'image originale est différents de façon

significatif par rapport à l'image en claire. Par conséquent, il ne fournit aucune information utile aux attaquants pour effectuer tout type d'attaque par un cryptanalyste sur l'image chiffrée. Donc, l'algorithme de chiffrement proposé a passé le test de l'histogramme avec succès.



**Figure IV.12** Image reçue déchiffrée après passée dans le canal CPL et son histogramme

L'histogramme de l'image déchiffrée est quasi similaire à celui l'image originale mais avec une légère différence non perceptible par l'œil humain, cette différence se traduit par un bruit coté supérieure de l'image déchiffrée. Il est dû au SNR et l'effet du canal de transmission.

## IV.7 Conclusion

Ce chapitre a exploré la transmission robuste des images sur les réseaux CPL en utilisant la modulation OFDM. L'utilisation des réseaux CPL offre une solution pratique et économique pour la distribution d'images et de vidéos sur de grandes distances en utilisant les infrastructures électriques existantes. L'OFDM s'est avéré être une technique de modulation efficace pour surmonter les distorsions et les interférences rencontrées dans le canal de transmission électrique.

La mise en œuvre d'un système OFDM a été présentée à l'aide du logiciel Matlab, permettant de simuler une communication et d'évaluer les performances du système. Différentes modulations, telles que BPSK, QPSK, 16PSK et 256PSK, ont été comparées en termes de paramètres d'évaluation tels que le taux d'erreur binaire (BER), l'erreur de phase, le pourcentage d'erreur des pixels et les pertes de données

Les résultats ont montré que la modulation BPSK offre les meilleurs résultats en termes de taux d'erreur binaire (BER) pour tous les niveaux de rapport signal/bruit (SNR) examinés. Les

modulations à plus basse densité spectrale, telles que BPSK, ont également démontré une meilleure robustesse face aux perturbations du canal de transmission.

Cependant, il est important de noter que le choix de la modulation dépend des critères de performance spécifiques et des contraintes du système de communication. Les résultats obtenus peuvent servir de référence pour la conception et l'optimisation des systèmes de transmission d'images sur les réseaux CPL, en prenant en compte les performances, la robustesse et l'efficacité des différentes modulations.

En conclusion, la transmission robuste des images sur les réseaux CPL représente une solution prometteuse pour la distribution d'images et de vidéos à grande échelle. La modulation OFDM et le choix approprié de la modulation peuvent améliorer les performances de transmission et assurer une qualité d'image acceptable, même dans des conditions de faible rapport signal/bruit. Ces avancées ouvrent de nouvelles perspectives pour l'utilisation des réseaux CPL dans le domaine de la transmission d'images et de vidéos.

---

# **Conclusion générale**

---

## Conclusion générale

En conclusion, ce mémoire a exploré en détail la technologie du Courant Porteur en Ligne dans le contexte de la transmission des images médicales. Nous avons examiné les principes de fonctionnement du CPL, les différentes techniques de modulation, la modélisation des canaux et la sécurisation des réseaux CPL.

Ce travail de fin d'études a démontré que le CPL présente de nombreux avantages en tant que solution pratique et économique pour la distribution d'images numériques à grande échelle. En utilisant des techniques avancées telle que l'OFDM, le CPL permet une transmission fiable et efficace des données en utilisant les infrastructures électriques existantes.

Les résultats de nos analyses ont souligné l'importance du choix de la modulation appropriée, avec la modulation BPSK se démarquant comme étant particulièrement performante en termes de taux d'erreur binaire et de robustesse face aux perturbations du canal de transmission. Cependant, il est essentiel de tenir compte des critères spécifiques et des contraintes du système de communication lors de la sélection de la modulation.

Dans l'ensemble, le Courant Porteur en Ligne présente un fort potentiel pour la transmission des images médicales, offrant une connectivité pratique et économique. Avec des efforts de recherche continus et des développements technologiques, le CPL peut devenir une méthode de communication largement utilisée, ouvrant ainsi de nouvelles possibilités pour les applications résidentielles, commerciales et industrielles axées sur la transmission d'images et de vidéos.

À la lumière de nos recherches, plusieurs perspectives se dessinent pour l'avenir du CPL dans la transmission des données médicales. Tout d'abord, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour améliorer les performances du CPL, notamment en termes de capacité de transmission, de réduction des interférences et d'optimisation des paramètres de modulation.

De plus, la sécurisation des réseaux CPL doit être une priorité, avec une attention particulière accordée aux techniques de chiffrement et à la prévention des accès non autorisés. L'évolution vers des réseaux CPL intelligents et l'intégration avec d'autres technologies émergentes, telles que l'Internet des objets (IdO), offrent également des opportunités passionnantes pour étendre les applications du CPL. Enfin, l'adoption et la mise en œuvre du CPL nécessitent une collaboration entre les fournisseurs de services, les fabricants d'équipements et les régulateurs pour garantir l'interopérabilité et l'harmonisation des normes et des réglementations.

---

# **Biblio-Webographie**

---

## Références biblio-webographiques

- [1] M. Mannah, Transmission de données par Courants Porteurs en Ligne sur un réseau Modulé en Largeur d'Impulsion, Thèse de doctorat, école polytechnique de l'université de Nantes, 2010.
- [2] X. Cracelle, power ligne communication in practice, Artech house, 2009.
- [3] S. Roblot, Caractérisation des couplages électromagnétiques dans les réseau filaire cuivre en vue d'optimisation les transmissions à haut débit, Thèse de doctorat, université de Limoges, Octobre 2007.
- [4] Y. Himeur, Contribution à l'amélioration et l'élaboration des technique de communication par courant porteur en ligne, Thèse de doctorat, université de Jijel, 2015.
- [5] K. Dostert, Powerline Communications. Prentice Hall, Inc, Upper Saddle River, NJ 07458: Prentice Hall PTR, 2001.
- [6] R. Nirina, Etude et applications du courant porteur en ligne, Mémoire de fin de cycle en vue de l'obtention du diplôme de licence en génie électrique, Université d'Antananarivo école supérieure polytechnique, 2015.
- [7] L. Heuzé, W. Kwame, Z. Hakima, Les courants porteurs en ligne, Nouvelles Technologies Réseaux, 2005.
- [8] Agence Internationale de l'Energie, Smart Grids, 2010 <https://www.iea.org/reports/smart-grids>, (consulté Le 25 avril à 23 PM)
- [9] [www.actusmartgrid.com](http://www.actusmartgrid.com), (consulté le 26 avril à 11 AM)
- [10] S. C. Mukhopadhyay, Automotive Embedded Systems Handbook, Industrial Electronics Society, 2008, p. 261-265.
- [11] M. Benani, Y. Benyahia, Principe et simulation d'une transmission de type OFDM, Mémoire de fin d'études master académique, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, 2019.
- [12] S. Haykin, Introduction to Analog and Digital Communications, Edition: Phoenix Color Corp, 2007
- [13] M. Ghadjati, Applications des réseaux de neurones aux systèmes de communication numériques, mémoire de Magister en Télécommunications, Université 8Mai 1945 Guelma, 2012

- [14] O. Trad, Réduction du bruit impulsif dans les systèmes de communication par courant porteur en ligne (CPL), mémoire de fin d'étude de l'école Nationale Polytechnique, 2019.
- [15] H. Djellab, Evaluation des performances de la technique CDMA dans la transmission optique, Thèse de doctorat, université de badji mokhtar – Annaba. 2018.
- [16] M. Thériault, Etude des performances d'un système ds CDMA avec détecteur raque dans le contexte uwb , faculté des sciences et de génie université Laval Québec, 2005.
- [17] M. Lourdiane, CDMA à séquence directe appliqué aux communications optiques, Thèse de doctorat , Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, janvier 2005.
- [18] J. Laine, P.Vigneron, Télécommunications numériques Le CDMA, 2010.
- [19] [www.comment.ca/marche.net](http://www.comment.ca/marche.net), (consulté le 17 mai à 21 PM).
- [20] D. Guezgouz, Contribution à la modélisation du réseau électrique domestique en vue de la caractérisation du canal de propagation CPL , Thèse université François - Rabelais de Tours, 2010.
- [21] F. Arab, D. Mokhtari, Réduction du PAR et optimisation de la méthode SLM par les algorithmes génériques dans les systèmes OFDM, Mémoire d'ingénieur, université du Blida, 2009.
- [22] R. Van nee, R. Prasad, OFDM for wireless multimedia communications. Artech House, 2000.
- [23] S. Arab, Une étude sur la réduction du PAPR dans un système OFDM, Mémoire du grade de Maître es science, Université Laval, Canada, 2010.
- [24] Y.J. Liu , Introduction to OFDM receiver design and simulation, Artech house 2020.
- [25] A. Haded, Modélisation du réseau basse tension dans la bande de fréquence utilisée par les courants porteurs en ligne en bande étroite, Thèse de doctorat de l'université Paris-Saclay, 2022.
- [26] A. Amokrane, caractérisation de la fonction de transfert d'un réseau domestique par matrice S, Mémoire de projet fin d'études, Université de Jijel, 2013.
- [27] M. Zimmermann, K. Dostert , A multipath model for the werline channel. IEEE Trans. IEEE Communications Magazine, 50(4), pp. 553-559, 2002.
- [28] S. khedimallah, Rayonnement électromagnétique et propagation des courants porteurs en lignes, thèse de Magister en électrotechnique, Université de Jijel, 2009.

- [29] M. Rousseau, P. Moreau, characterization électromagnétique and optimization of multicarrier technologies over PLC channel, International symposium on power line communications (ISPLC2001).
- [30] S. Simon, Histoire des codes secrets, Editions JC Lattès, 1999.
- [31] S. Allou, K. Allouane , Cryptographie et sécurité des Réseaux Implémentation de l'AES sous MATLAB, mémoire de fin d'études , université mouloud mammeri, Tizi-ouzou, 2008.
- [32] H. ZENASNI , Chiffrement des images médicales par un crypto système basé sur la thorie du chaos, Mémoire de fin d'études université abou bekr belkaid Tlemcen, 2021.
- [33] O. Megherbi. Etude et réalisation d'un système sécurisé à base de système chaotiques .PhD thesis, université Mouloud Mammeri, Tizi-ouzou, 2013.

# Résumé

L'objectif principal de ce projet est de développer un système efficace et sécurisé pour le transfert d'images médicales entre différents acteurs du domaine de la santé à l'intérieur de leurs lieux de travail tels que les hôpitaux, les cliniques et les laboratoires, en utilisant la technologie des courants porteurs en ligne CPL qui est une technique permettant la transmission de données à travers le réseau électrique existant. Ce faisant, on pourra non seulement optimiser l'usage des câbles électriques afin qu'ils assurent le transport des données numériques, mais aussi compléter le réseau de communication existant. Après avoir mis en évidence l'efficacité de la modulation multiporteuses, nous avons retenu la modulation multiporteuse OFDM comme étant la technique de transmission appropriée, combinée à un algorithme de chiffrement basé sur le chaos pour renforcer la sécurité des données médicales transférées.

**Mots clés : Réseau CPL, OFDM, modélisation, sécurisation.**

## Abstract

The main objective of this project is to develop an efficient and secure system for the transfer of medical images among different stakeholders in the healthcare field within their workplaces such as hospitals, clinics, and laboratories, using the Power Line Communication (PLC) technology, which is a technique that enables data transmission through the existing electrical network lines. By doing so, we can not only optimize the use of electrical lines to carry digital data but also complement the existing communication network. After highlighting the effectiveness of multi-carrier modulation, we have chosen Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) as the appropriate transmission technique, combined with a chaos-based encryption algorithm to enhance the security of the transferred medical data.

**Key words: PLC network, OFDM, modelling, security.**

## ملخص

الهدف الرئيسي لهذا المشروع هو تطوير نظام فعال وآمن لنقل الصور الطبية بين مختلف جهات الرعاية الصحية داخل أماكن عملهم مثل المستشفيات والعيادات والمختبرات، باستخدام تقنية حامل التيار الكهربائي عبر الانترنت. وهي تقنية تسمح بنقل البيانات عبر الشبكة الكهربائية الموجهة. ومن خلال ذلك، يمكننا ليس فقط تحسين استخدام الكابلات الكهربائية لضمان نقل البيانات الرقمية، ولكن أيضاً استكمال الشبكة الاتصالات الموجودة. بعد إظهار فعالية التردد المتعدد، اخترنا تعدد الحاملات المتعامدة المتعدد كتقنية نقل مناسبة، بالإضافة إلى خوارزمية تشفير معتمدة على الفوضى لتعزيز أمان البيانات الطبية المنقولة.

**الكلمات المفتاحية** □ التيار الحامل، التعدد الترددي المتعامد المتعدد، النمذجة، التأمين.