

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Kasdi merbah de Ouargla
Faculté Des Nouvelles Technologies De L'information Et De La
Communication
Département d'Électronique et des Télécommunications



Pour l'obtention du Diplome de **MASTER**

En : Électronique

Spécialité : Électronique Des Systèmes Embarqués

Presenté Par :

- Benesseddik Abdessaleme - Benyahkem Lilia Ait Allah

- Gana Walid Abdessamed

Thème

**Étude et Simulation d'un Système de Communication par
Courant Porteur en Ligne**

Soutenu publiquement le : 25/06/2024

devant le jury

NOM Prénom	Grade	Qualité	Établissement
Mr.Tidjani zakaria	MAA	Président	UKM Ouargla
Mr.Melehguegue Nacer	MAA	Examineur	UKM Ouargla
Mme.Gamouh Samia	MCA	Encadreur	UKM Ouargla
Mr.Mokadem Zakaria	Doctorant	Co-encadreur	UMB M'sila

2023/2024

Remerciement

Nous remercions tout d'abord "ALLAH" de nous avoir donné le courage et la volonté d'entamer et de finir ce mémoire dans de bonnes conditions.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à nos directeurs de thèse [Mr Zakaria Mokadem et Dr Gamouh Samia] pour leur encadrement, leur patience et leur confiance tout au long de ce travail de recherche. Leurs précieux conseils, leur expertise et leur soutien indéfectible ont été inestimables et ont grandement contribué au succès de ce projet.

Nous sommes sensibles à l'honneur que nous a fait Mr. Tidjani Zakaria , Maître assistant (A) à l'université Kasdi Merbah Ouargla, en acceptant de présider le jury de ce mémoire de master.

Nous exprimons nos vifs remerciements à Mr Melehguegue Nacer, Maitre assistant (A) à l'université Kasdi Merbah Ouargla, pour avoir voulu examiner ce modeste travail.

Nous remercions également tous les enseignants de notre departement d'électronique et des telecommunications pour leurs contributions a notre formation. Pour terminer, nous adressons nos profondes reconnaissances à toutes celles et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Nous, [Gana Walid Abdessamed], [Benyahkem Lilia Ait Allah], et [Benesseddik Abdessaleme], dédions ce mémoire avec une profonde gratitude à ceux qui ont été des sources d'inspiration et de soutien tout au long de cette aventure académique.

À nos familles :

Pour votre amour inconditionnel, vos encouragements constants et votre soutien indéfectible. Vos sacrifices et votre foi en nous ont rendu cette réalisation possible. Merci du fond du cœur.

À nos amis :

Pour votre amitié sincère, vos encouragements et vos moments de détente partagés. Votre présence a été un réconfort et une source de motivation. Merci pour votre soutien inestimable.

À nous-mêmes :

Pour notre collaboration harmonieuse, notre détermination et notre persévérance. Ce mémoire est le fruit de notre travail collectif et de notre passion partagée. Nous en sommes fiers.

ملخص

في هذا المشروع، كنا مهتمين بتصميم ومحاكاة نظام متقدم لنقل البيانات من العدادات الكهربائية. أولاً وقبل كل شيء، قمنا بدراسة أجهزة قياس الطاقة التقليدية والإلكترونية. بعد ذلك، تناولنا تقنية CPL. وأخيراً، قمنا بمحاكاة النظام باستخدام مجموعة من الفلاتر وشريحة ST7540 للاتصال بين العدادات الكهربائية والخادم المركزي.

الكلمات المفتاحية: شريحة ST7540 ، عداد كهربائي ، نقل البيانات

Abstract

In this project, we focused on designing and simulating an advanced data transmission system from electric meters. First, we studied traditional and electronic energy measuring devices. Then, we addressed the CPL technology. Finally, we simulated the system using a set of filters and the ST7540 chip for communication between electric meters and the central server.

Keywords: Electric meter , Data transmission , ST7540 Chip

Résumé

Dans ce projet, nous nous sommes intéressés à la conception et à la simulation d'un système avancé de transmission de données à partir des compteurs électriques. Tout d'abord, nous avons étudié les appareils de mesure de l'énergie traditionnels et électroniques. Ensuite, nous avons abordé la technologie CPL. Enfin, nous avons simulé le système en utilisant un ensemble de filtres et une puce ST7540 pour la communication entre les compteurs électriques et le serveur central.

Mots Clée : Compteurs électriques , Puce ST7540 , Transmission de données

Table des matières

Remerciement	i
Dédicaces	ii
Abstract	i
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	vii
Liste des abréviations	viii
Introduction Générale	1
Chapitre 1 Comptage De L'énergie Électrique Basse Tension	3
1.1 Introduction	4
1.2 L'énergie Électrique	4
1.2.1 Production d'énergie électrique	4
1.2.2 Transport d'énergie électrique	5
1.2.3 Réseaux de distribution électrique	5
1.3 Mesure des puissances électriques	6
1.3.1 La puissance apparente	6
1.3.2 La puissance active	6
1.3.3 La puissance réactive	7
1.4 Compteurs électriques	7
1.4.1 Compteur électromécanique	8
1.4.1.1 Fonctionnement	8
1.4.1.2 Caractéristiques	9
1.4.1.3 Avantages et Inconvénients	9
1.4.2 Compteur électronique	10
1.4.3 Principe de fonctionnement de compteur électronique	10
1.4.3.1 Mesure des Signaux Électriques	10

1.4.3.2	Conversion Analogique-Numérique	10
1.4.3.3	Traitement des Données	11
1.4.3.4	Stockage des Données	11
1.4.3.5	Affichage et Communication	11
1.4.3.6	Alimentation	11
1.4.3.7	Caractéristiques	12
1.4.3.8	Avantages	13
1.4.3.9	Types	13
1.4.3.10	Applications	13
1.5	Conclusion	14
Chapitre 2 Communicaton par courant porteur en ligne		15
2.1	Introduction	16
2.2	Historique	16
2.3	Canal d'énergie et de communication	17
2.4	Les câbles électriques	17
2.4.1	Paramètres essentiels d'une ligne de transmission(câble électrique)	17
2.4.2	Les paramètres primaires	18
2.4.3	Bruits et perturbations électromagnétiques	19
2.4.3.1	Sources de bruit et perturbations	19
2.4.4	Atténuation	20
2.4.4.1	Causes de l'atténuation	20
2.4.4.2	Mesure de l'atténuation	21
2.4.4.3	Conséquences de l'atténuation	21
2.5	Courants Porteur en Ligne (CPL)	22
2.6	Méthodes Couplage des données CPL	23
2.6.1	Couplage capacitif	23
2.6.2	couplage inductif	24
2.6.3	Modulations	24
2.6.3.1	Modulation de Fréquence	24
2.6.3.2	Techniques de Modulation	25
2.6.3.3	Injection du Signal Modulé	25
2.6.3.4	Séparation des Signaux	25
2.6.3.5	Traitement et Décodage	25
2.6.3.6	Avantages de la Modulation CPL	25
2.6.3.7	Défis et Considérations	26

2.6.4	Modulation analogiques	26
2.6.5	Modulations numériques	27
2.6.6	Modulation OFDM	28
2.7	Standardisation de courant porteur	28
2.7.1	La Norme IEEE1901 Standard	29
2.7.2	La Norme HomePlug Standard	30
2.7.3	La Norme G3 PLC	31
2.8	Conclusion	31
Chapitre 3 Conception et simulation de système de communication CPL		32
3.1	Introduction	33
3.2	Description du système	33
3.2.1	Principe de fonctionnement du système	34
3.3	Architecture du systèmes	35
3.3.1	Partie équipement locale	36
3.3.2	Partie équipement réseaux	38
3.4	Fonctionnement de système	39
3.4.1	Fonctionnement de la partie Équipement Locale	39
3.4.2	Fonctionnement de partie Équipement réseaux	40
3.5	Description des différents modules	40
3.5.1	Modules Transmetteurs/ Récepteurs	41
3.5.1.1	Module ST7540	41
3.5.2	Modules Transcepteurs	42
3.5.2.1	L'interface UART	42
3.5.2.2	L'interface SPI	43
3.5.3	Modules de couplage	43
3.5.4	Modules filtrage	44
3.5.4.1	Filtre passe-bas actif	44
3.5.4.2	Filtre passe-bande passif	45
3.5.4.3	Filtre isolateur	45
3.5.5	Modules de contrôle et surveillance	46
3.5.6	Unité d'alimentation électrique	46
3.6	Exigences matérielles	46
3.6.1	ENC28J60 ethernet board	46
3.6.1.1	Description	46
3.6.1.2	Spécification	47

3.6.1.3	Bloc Diagram	48
3.6.1.4	Principe de fonctionnement du module ethernet ENC28J60	48
3.6.2	LM7805	49
3.6.2.1	Description	49
3.6.2.2	Spécification	49
3.6.2.3	Bloc Diagram	50
3.6.3	Module ST7540	50
3.6.3.1	Description	50
3.6.3.2	Bloc Diagram	51
3.6.3.3	Accès Principal ST7540	52
3.6.3.4	En Mode Transmission De Données	52
3.6.3.5	En mode réception de données	52
3.6.3.6	Interface du processeur hôte	52
3.7	Simulation du systèmes	53
3.7.1	Simulation du filtre isolateur	53
3.7.2	Simulation du filtre passe-bas actif	54
3.7.3	Simulation du filtre passe-bande passif	56
3.8	Parties Commun Émission/ Réception	57
3.9	Partie emission	59
3.10	Partie réception	61
3.11	Problèmes et Défis	62
3.12	Conclusion	63
	Conclusion Générale	65
	Bibliographie	67
	Annexe A	69

Liste des figures

1.1 Réseaux électrique	5
1.2 Compteur électromécanique	8
1.3 Principe de fonctionnement de compteur électronique	12
2.1 Circuit schématique de la ligne électrique	18
2.2 Courants Porteurs en Ligne (CPL)	22
2.3 Couplage capacitif	23
2.4 Couplage inductif	24
2.5 Modulation analogiques	27
2.6 Modulation OFDM	28
2.7 Évolution des générations CPL	29
2.8 La Norme HomePlug Standard	30
3.1 Système de communication par CPL	34
3.2 Architecture du système CPL	36
3.3 Partie équipement locale	37
3.4 Partie équipement réseaux	39
3.5 Connection de UART	43
3.6 Connection de SPI	44
3.7 Schéma de filtre passe bas	44
3.8 Schéma de filtre passe bande	45
3.9 Schéma de filtre isolateur	46
3.10 ENC28J60	47
3.11 Bloc diagram ENC28J60	48
3.12 LM7805	49
3.13 Bloc diagram LM28J60	50
3.14 ST7540	51
3.15 Bloc diagram ST7540	51
3.16 Simulation du filtre isolateur	54
3.17 Résultat de simulation du filtre isolateur	54

3.18	Simulation du filtre passe bas	55
3.19	Resultat de simulation du filtre pass bas	55
3.20	Simulation du filtre passe bande	56
3.21	Résultat de simulation du filtre pass bande	57
3.22	Régulateur de tension	58
3.23	Filtre passe-bas actif	58
3.24	Filtre isolaueu	59
3.25	Filtre passe-bande passif	59
3.26	Modulation/Démodulation	60
3.27	Circuit de la partie émettrice	60
3.28	Modulation/Démodulation	61
3.29	Circuit de la partie réceptrice	62

Liste des tableaux

.1	Tableau des composants électroniques de la partie émettrice	72
.2	Tableau des composants électroniques de la partie réception	73

Liste des abréviations

UART :	Universal asynchronous receiver-transmitter
CPL :	Courant porteur en ligne
SPI :	Serial Peripheral Interface
AM :	Amplitude Modulation
PM :	Phase Modulation
FM :	Frequency Modulation
OFDM :	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
FFT :	Fast Fourier Transform
ASK :	Amplitude Shift Keying
PFC :	Predictive functional control
IEEE :	Institute Of Electrical and Electronics Engineers
FSK :	Frequency Shift Keying
PSK :	Phase Shift Keying
QPSK :	Quadrature Phase Shift Keying
QAM :	Quadrature Amplitude Modulation
SCMA/CA :	Sparse Code Multiple Access / Certification Authority
CMOS :	Comptimentrary Metal-Oxide-Semicanductor
DMOS :	Double deffused Metal-Oxide-Semicanductor

Introduction Générale

Depuis la découverte de l'électricité et sa diffusion parmi les nations, les compteurs électriques ont joué un rôle crucial dans le calcul de la consommation d'énergie. Cependant, avec la prolifération des compteurs dans les villes et l'augmentation rapide de la consommation quotidienne des clients, les fournisseurs d'énergie ont été confrontés à des défis croissants en matière d'établissement des factures, de collecte d'informations et de données de consommation.

Face à ces défis, des ingénieurs ingénieux ont mis au point une solution innovante : les compteurs intelligents ou communicants. Ces compteurs programmables vont bien au-delà de la simple mesure de la consommation d'énergie. Ils permettent d'envoyer et de recevoir des données précieuses, offrant aux clients un aperçu détaillé de leur consommation en termes d'énergie et de coûts. [1]

Historiquement, les compteurs électriques ont connu une évolution remarquable. Des premiers modèles mécaniques aux compteurs électroniques plus sophistiqués, la technologie n'a cessé de progresser. Les compteurs intelligents représentent une étape majeure dans cette évolution, intégrant des capacités de communication avancées qui les connectent au réseau électrique moderne.

Parmi les technologies employées dans les compteurs intelligents, le CPL (Courants Porteurs en Ligne) joue un rôle clé. Cette technologie permet de transmettre des données sur les lignes électriques existantes, éliminant le besoin d'une infrastructure de communication supplémentaire coûteuse. [2]

L'objectif de ce projet est de démontrer l'efficacité et le potentiel du CPL pour la transmission de données sur le réseau électrique existant. En intégrant des composants clés tels que des outils de modulation et des filtres sophistiqués, le projet permet la création de systèmes CPL fiables, sécurisés et performants, ouvrant la voie à une multitude d'applications dans les domaines de la gestion de l'énergie, et de la domotique.

La suite du présent mémoire traite les trois principaux chapitres dont les contenus sont les suivants :

Le premier chapitre constitue un état de l'art sur le parcours de l'énergie électrique, depuis sa production jusqu'à sa consommation par les utilisateurs finaux. Une définition de l'énergie électrique

sera donnée en premier lieu, suivie d'une présentation des différentes méthodes de production, ainsi que des moyens de transport et de distribution. Ensuite les diverses méthodes de calcul de l'énergie consommée seront abordées. Enfin, nous exposerons les différents types de compteurs électriques ainsi que leur fonctionnement, en soulignant les avantages et les inconvénients de chacun.

Dans le second chapitre, nous aborderons la transmission en utilisant la technologie CPL (Courants Porteurs en Ligne). Nous commencerons par un bref historique de la transmission CPL. Cette technologie repose sur l'ajout d'un signal haute fréquence au signal électrique traditionnel. Grâce à des techniques de fusion analogique et numérique, le système peut s'adapter à différents types de données et à diverses exigences d'application.

Ensuite, nous exposerons les différentes techniques de modulation. La modulation orthogonale multiporteuse (OFDM) offre une efficacité spectrale élevée et une résistance au bruit et aux interférences. Enfin, nous examinerons les différentes normes relatives aux technologies CPL.

Le dernier chapitre sera consacré à la description de toutes les étapes nécessaires à la simulation de notre projet.

Enfin, nous terminerons par une conclusion générale et nous évoquerons les perspectives relatives à ce modeste travail.

Chapitre 1

Comptage De L'énergie Électrique Basse Tension

1.1 Introduction

Le comptage de l'énergie électrique basse tension désigne le processus de mesure et de surveillance de la consommation d'électricité dans les installations domestiques, commerciales et industrielles qui utilisent des tensions inférieures à 1000 volts.

Ces compteurs enregistrent de manière précise la quantité d'électricité consommée sur une période donnée, fournissant ainsi aux utilisateurs des informations essentielles sur leur utilisation énergétique.

En permettant aux individus et aux entreprises de comprendre et de contrôler leur consommation électrique, le comptage basse tension favorise une utilisation plus efficace de l'énergie et contribue à la gestion globale des réseaux électriques. [3]

1.2 L'énergie Électrique

L'énergie électrique est définie comme la capacité de réaliser un travail en utilisant des charges électriques en mouvement. Cette énergie peut être convertie en différentes formes telles que la lumière, la chaleur, le son, ou l'énergie mécanique. Elle s'exprime en joules ou en kilowattheure (kWh) [4].

1.2.1 Production d'énergie électrique

La production d'électricité est un secteur industriel essentiel qui approvisionne en énergie électrique les fournisseurs d'électricité, qui la livrent ensuite aux consommateurs via les réseaux de transport et de distribution.

Cette production se fait principalement dans des centrales électriques qui transforment des énergies primaires telles que le charbon, le gaz naturel, le pétrole, la biomasse, l'énergie nucléaire, l'énergie géothermique, l'énergie hydroélectrique, l'énergie éolienne et l'énergie solaire. la figure 1.1 montre le Réseaux électrique

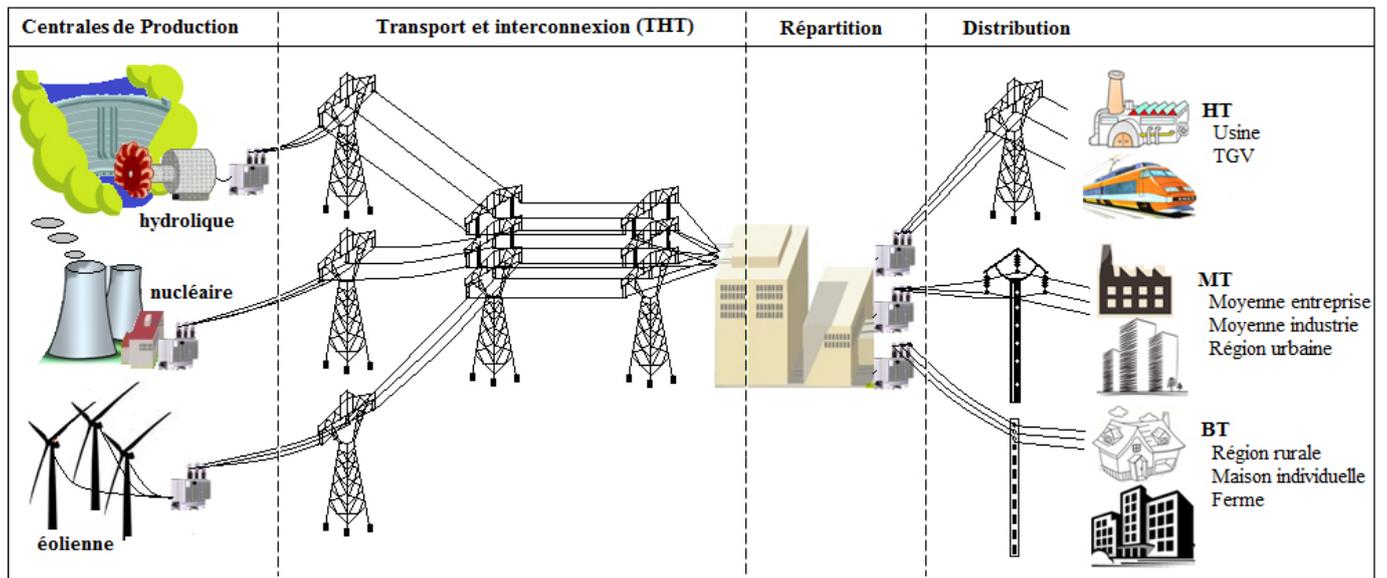


Figure 1.1: Réseaux électrique

1.2.2 Transport d'énergie électrique

Une fois produite, l'électricité doit être transportée sur de longues distances depuis les centrales électriques vers les zones de consommation. Cela est réalisé par le biais de réseaux de transmission, qui utilisent des lignes à haute tension pour minimiser les pertes d'énergie sur de longues distances. [5]

Les lignes de transmission transportent l'électricité à très haute tension (HV, très haute tension) et haute tension (HT), généralement supérieure à 100 000 volts. Ces lignes peuvent être aériennes ou souterraines, en fonction des exigences géographiques et des préférences locales.

1.2.3 Réseaux de distribution électrique

Une fois l'électricité arrivée dans une zone de consommation, elle est distribuée aux utilisateurs finaux par le biais de réseaux de distribution. Ces réseaux utilisent des lignes à moyenne et basse tension pour acheminer l'électricité vers les ménages, les entreprises, les institutions et les industries. [3]

Les tensions utilisées dans les réseaux de distribution sont généralement inférieures à 100 000 volts, avec des niveaux typiques de tension variant de 1 000 volts (basse tension) à 50 000 volts (moyenne tension). Les transformateurs de distribution sont utilisés pour abaisser la tension à un niveau sûr avant que l'électricité n'atteigne les consommateurs.

1.3 Mesure des puissances électriques

Il existe trois puissances différentes, à savoir la puissance apparente, active et réactive, que nous examinerons en détail un peu plus tard. Elles sont toutes interdépendantes selon le triangle des puissances.

1.3.1 La puissance apparente

La puissance apparente est la somme trigonométrique de la puissance active et de la puissance réactive. Elle est mesurée en kVA (kilovoltampères) et correspond à la puissance totale fournie par le réseau électrique [6].

Cette valeur est souvent celle souscrite dans un contrat d'électricité. Elle se calcule comme suit :

$$S = U * I \quad (1.1)$$

- S = Puissance apparente (VA)
- U = Tension (V)
- I = Intensité (A)

La puissance apparente est l'hypoténuse du triangle des puissances. Par conséquent, en utilisant le théorème de Pythagore, on peut la calculer à partir des valeurs de la puissance active et de la puissance réactive.

$$S = \sqrt{(P^2 + Q^2)} \quad (1.2)$$

- S = Puissance apparente (VA) (Volt-Ampère)
- P = Puissance active (W)
- Q = Puissance réactive (VAR)

1.3.2 La puissance active

La puissance active est la puissance réellement utilisée ou dissipée sous forme de chaleur dans un circuit. Elle est le produit de la tension, du courant et du $\cos \varphi$. Elle est exprimée en watts (W). Dans un circuit purement résistif, composé uniquement d'une charge résistive (comme un circuit alimentant un fer à repasser), le $\cos \varphi$ est égal à un. La puissance active est également appelée puissance moyenne ou puissance réelle. [6]. Sa formule de base est :

$$P = U.I.\cos\varphi \quad (1.3)$$

Où :

- P = puissance électrique (watts)
- V = tension (volts)
- I = courant (ampères)
- φ = angle de déphasage entre V et I

1.3.3 La puissance réactive

La puissance réactive est la partie de la puissance électrique qui oscille entre le générateur et la charge sans être convertie en travail utile. Elle est associée aux composants inductifs et capacitifs du circuit, tels que les bobines et les condensateurs, et ne contribue pas directement à l'énergie utile. Appelée également puissance imaginaire [6], la puissance réactive est exprimée en volt-ampères réactifs (VAR).

Elle est calculée comme le produit de la tension, du courant et du sinus de l'angle de déphasage ($\sin \varphi$) entre eux. La formule est la suivante :

$$Q = U.I.\sin\varphi \quad (1.4)$$

- Q = Puissance réactive (VAR) (Volt-Ampère Réactif)
- U = Tension (V)
- I = Intensité (A)
- φ = déphasage (°)

1.4 Compteurs électriques

Le compteur électrique est un appareil électrotechnique qui permet de mesurer la consommation électrique d'une installation en kWh, que ce soit au sein d'une habitation ou dans des lieux d'activités professionnelles ou industrielles.

Cet appareil s'intègre dans un circuit électrique, et permet aux fournisseurs d'électricité de comptabiliser l'énergie consommée par un client et de facturer ce dernier en conséquence. [7]

1.4.1 Compteur électromécanique

Les compteurs électromécaniques(fig1.2) sont les compteurs les plus anciens et les plus traditionnels installés grâce à sa grande qualité est sa robustesse et sa simplicité d'utilisation.

Il s'agit de la première génération des compteurs installés et ils utilisent un dispositif mécanique de comptage pour afficher un seul indice de consommation qui est l'énergie. Ce compteur est généralement situé dans le logement lorsqu'il s'agit d'un logement individuel. [8]

Dans le cas d'un immeuble comportant plusieurs logements, il est situé à l'extérieur, souvent dans un compartiment ou local technique qui lui est réservé. [9]

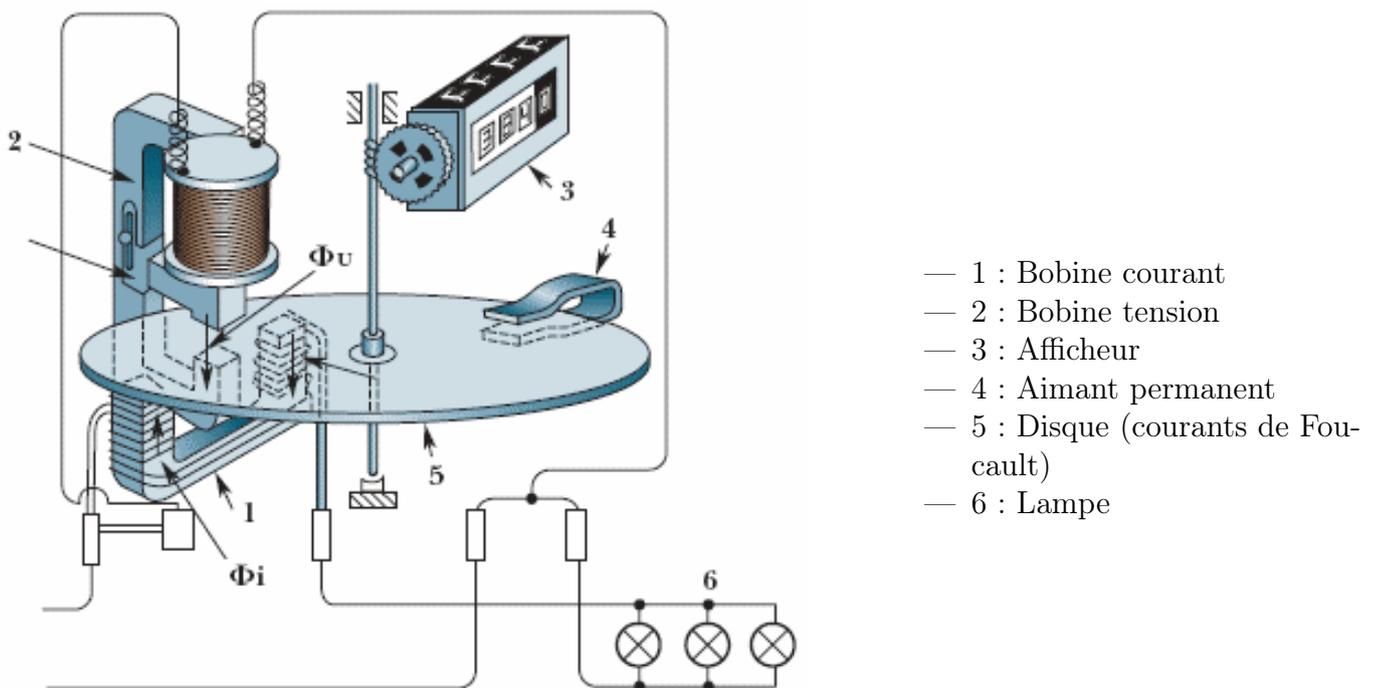


Figure 1.2: Compteur électromécanique

1.4.1.1 Fonctionnement

Son fonctionnement repose sur des principes mécaniques simples et éprouvés, offrant une fiabilité et une robustesse considérables.

Bobines et Disques :

- **Bobines de courant** : Installées en série avec la charge, elles produisent un champ magnétique proportionnel au courant consommé.
- **Bobines de tension** : Installées en parallèle avec la charge, elles produisent un champ magnétique proportionnel à la tension appliquée.
- **Disque d'aluminium** : Situé entre les deux bobines, il est soumis à l'action combinée des champs magnétiques des bobines de courant et de tension. Ces champs créent des forces qui font tourner le disque.
- **Rotation du Disque** : La vitesse de rotation du disque est proportionnelle à la puissance active consommée par la charge.

La rotation du disque entraîne un compteur mécanique qui enregistre la quantité totale

1.4.1.2 Caractéristiques

- **Robustesse** : Les compteurs électromécaniques sont très robustes et peuvent fonctionner pendant de nombreuses années avec peu d'entretien.
- **Précision** :
Moins précis que les compteurs électroniques modernes, ils peuvent être sujets à des erreurs de mesure en raison de l'usure mécanique et des variations environnementales.
- **Visibilité** :
Le compteur mécanique permet une lecture directe de la consommation via des chiffres affichés sur des rouleaux.
- **Absence de fonctionnalités avancées** :
Contrairement aux compteurs intelligents, les compteurs électromécaniques ne fournissent pas de fonctionnalités telles que la télérelève, la surveillance en temps réel ou l'analyse détaillée de la consommation d'énergie consommée en kilowattheures (kWh).

1.4.1.3 Avantages et Inconvénients

1. Avantages :

- Fiabilité sur le long terme
- Facilité d'utilisation et de lecture
- Peu coûteux à l'achat et à l'installation

2. Inconvénients :

- Manque de précision comparé aux compteurs électroniques
- Pas de fonctionnalités avancées (pas de connectivité, de télérelève, etc.)

— Usure mécanique au fil du temps

1.4.2 Compteur électronique

C'est un compteur d'énergie électrique numérique qui fonctionne avec un système de comptage électronique, il s'agit de la deuxième génération des compteurs installés (après le compteur électromécanique), sur lequel on peut lire les informations qui sont affichées sur un dispositif d'affichage à cristaux liquides (LCD).

Ce type de compteur est plus sensible aux surintensités et surtensions, et tout particulièrement à la foudre et pour mesurer les fortes intensités. [9]

1.4.3 Principe de fonctionnement de compteur électronique

Un compteur électronique est conçu pour mesurer et enregistrer la consommation d'énergie électrique avec une grande précision (fig1.3).

Il utilise des technologies électroniques pour convertir les signaux électriques en données numériques, qui sont ensuite traitées pour fournir des informations détaillées sur la consommation d'énergie.(fig1.3). [9]

1.4.3.1 Mesure des Signaux Électriques

Le compteur électronique est équipé de capteurs de courant (typiquement des transformateurs de courant) et de tension (diviseurs de tension). Ces capteurs mesurent les valeurs instantanées du courant et de la tension dans le circuit électrique.

1.4.3.2 Conversion Analogique-Numérique

Les signaux analogiques de courant et de tension mesurés par les capteurs sont envoyés à un convertisseur analogique-numérique. Ce composant convertit les signaux analogiques continus en données numériques discrètes que le microcontrôleur peut traiter.

1.4.3.3 Traitement des Données

Le cœur du compteur électronique est un microcontrôleur, qui reçoit les données numériques du CAN. Le microcontrôleur utilise ces données pour calculer la puissance consommée en temps réel. Les calculs incluent :

- **Puissance Active** : Produit de la tension, du courant et du facteur de puissance.
- **Puissance Réactive** : Composante de la puissance qui oscille entre le générateur et la charge.
- **Puissance Apparente** : Somme vectorielle de la puissance active et réactive.

1.4.3.4 Stockage des Données

Les données de consommation d'énergie sont enregistrées dans la mémoire interne du compteur. Cela permet de conserver un historique des consommations pour des périodes définies (journalières, hebdomadaires, mensuelles).

1.4.3.5 Affichage et Communication

- **Affichage numérique** :

Un écran numérique affiche la consommation d'énergie en kilowattheures (kWh) et peut également afficher d'autres informations telles que la puissance instantanée, la tension et le courant.

- **Modules de communication** :

Certains compteurs électroniques sont équipés de modules de communication (GSM, Wi-Fi, Zigbee) pour permettre la télérelève, c'est-à-dire la transmission des données de consommation à distance.

1.4.3.6 Alimentation

Le compteur est alimenté par le réseau électrique qu'il mesure. Certains compteurs peuvent aussi disposer de batteries de secours pour maintenir le fonctionnement de certaines fonctionnalités en cas de coupure de courant.

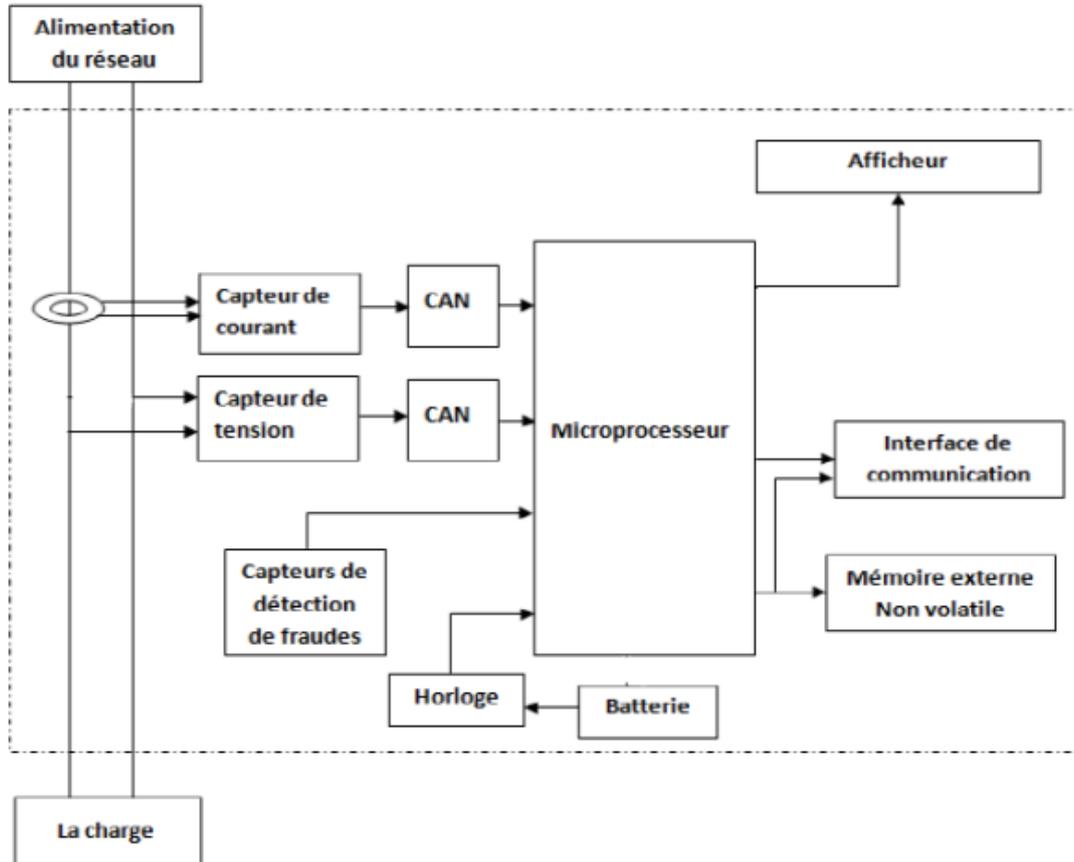


Figure 1.3: Principe de fonctionnement de compteur électronique [10]

Le compteur est caractérisé par un voyant lumineux sur la façade du compteur indique qu'il fonctionne bien. Ce voyant clignote plus ou moins vite selon la quantité d'électricité consommée.

1.4.3.7 Caractéristiques

— **Précision :**

Les compteurs électroniques offrent une précision de mesure supérieure par rapport aux compteurs électromécaniques.

— **Fonctionnalités avancées :**

Incluent la télérelève, la surveillance en temps réel, l'analyse détaillée de la consommation, et la gestion de la demande.

— **Évolutivité :**

Ils peuvent être mis à jour avec de nouvelles fonctionnalités via des mises à jour logicielles.

— **Compatibilité :**

Souvent compatibles avec les systèmes de gestion de l'énergie et les réseaux intelligents (smart grids).

1.4.3.8 Avantages

— **Précision :**

Offrent une mesure plus précise et fiable par rapport aux compteurs électromécaniques.

— **Fonctionnalités avancées :**

Peuvent inclure des fonctionnalités supplémentaires telles que la communication à distance, permettant une relève automatique des données par le fournisseur d'électricité.

— **Détection de fraudes :**

Aident à identifier et à prévenir les fraudes grâce à des algorithmes de surveillance avancés.

— **Gestion de la consommation :**

Permettent aux consommateurs de surveiller leur consommation d'énergie en temps réel et d'adopter des comportements d'économie d'énergie.

1.4.3.9 Types

Il existe deux types de compteurs électroniques .

— **Compteurs intelligents :**

Connectés à un réseau de communication, permettant une interaction bidirectionnelle entre le compteur et le fournisseur d'électricité. Ils peuvent transmettre des données en temps réel et recevoir des mises à jour ou des commandes à distance. [11]

— **Compteurs numériques simples :**

Mesurent et affichent uniquement la consommation d'énergie sans fonctionnalités de communication avancées.

1.4.3.10 Applications

— **Résidentiel :**

Utilisés dans les foyers pour mesurer la consommation d'électricité domestique.

— **Commercial et industriel :**

Installés dans les entreprises et les installations industrielles pour gérer et facturer la consommation d'énergie de manière précise.

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons discuté de l'énergie électrique et des différentes étapes qu'elle traverse avant d'être consommée par l'utilisateur final.

Nous avons également présenté des aperçus sur la manière de calculer l'énergie consommée ainsi que sur certains types de compteurs électriques et leur fonctionnement.

En conclusion, il ressort que le compteur d'énergie électrique est un élément distinct et indispensable dans les réseaux et installations électriques.

Chapitre 2

Communication par courant porteur en ligne

2.1 Introduction

Les Courants Porteurs en Ligne (CPL) représentent une technologie de communication qui utilise les lignes électriques existantes pour transmettre des données.

Cette technologie permet de faire transiter des informations numériques sans nécessiter l'installation de nouveaux câbles, rendant ainsi les CPL une solution pratique et économique pour diverses applications [12].

Ce chapitre présente l'historique et les principes des Courants Porteurs en Ligne (CPL), une technologie permettant la transmission de données via les lignes électriques existantes, et aborde les défis tels que les interférences électromagnétiques et les normes de compatibilité.

2.2 Historique

L'idée de transmettre des données via les lignes électriques remonte au XIXe siècle, mais ce n'est qu'à partir des années 1950 que des systèmes de communication basés sur les CPL ont été développés et installés sur les réseaux électriques haute et basse tension.

Au fil des décennies, les systèmes industriels comme PULSADIS ont émergé, utilisant des techniques de modulation telles que l'ASK (Amplitude Shift Keying) et la FSK (Frequency Shift Keying) pour améliorer la communication [13].

Les normes établies par l'IEEE et d'autres organismes, telles que G3 PLC, ont été cruciales pour définir les protocoles de communication et les caractéristiques physiques des réseaux CPL, assurant ainsi la compatibilité et l'interopérabilité des équipements.

Aujourd'hui, les CPL jouent un rôle essentiel dans la surveillance et le contrôle en temps réel des réseaux électriques, facilitant la création de réseaux intelligents et la communication bidirectionnelle entre les centres de contrôle et les équipements [14].

En plus de ces applications industrielles, la technologie CPL permet également l'intégration rapide de services supplémentaires comme le téléphone et l'Internet, offrant une solution flexible et économique pour répondre aux besoins de connectivité dans les réseaux électriques basse tension.

Toutefois, la technologie CPL doit faire face à des défis tels que les interférences électromagnétiques et la coexistence avec d'autres systèmes de communication.

2.3 Canal d'énergie et de communication

Tout média (fil, câble, liaison hertzienne, etc.) qui permet de transmettre des informations entre deux équipements est appelé canal de transmission.

En général, il assure la communication entre l'émetteur et le récepteur, facilitant ainsi le transfert de l'information. Dans les systèmes CPL (Courants Porteurs en Ligne), le réseau électrique est utilisé comme canal de transmission.

Le transfert sur un réseau électrique entre deux points d'accès correspond à la diminution et au déphasage que le signal CPL subit pendant sa propagation à travers le réseau avant d'arriver au récepteur.

Cette fonction est influencée par la configuration du réseau, le type de câble électrique utilisé et les charges connectées aux prises électriques.

2.4 Les câbles électriques

Le support de communication utilisé dans les technologies CPL est le câble électrique, qui n'est initialement pas conçu pour transporter des données.

Ses caractéristiques physiques sont avant tout adaptées au transport du signal 220 V/50 Hz.

Un câble électrique est le composant électrotechnique servant au transport de l'électricité, afin de transmettre de l'énergie ou de l'information.

Il est constitué d'un matériau conducteur, monobrin ou multibrin, souvent entouré d'une enveloppe isolante (plastique, Téflon, etc.).

L'intérieur du fil électrique est appelé « âme » du fil. Selon sa taille, il peut être employé pour transmettre des signaux électriques ou de l'énergie électrique.

Les matériaux utilisés présentent des caractéristiques intéressantes en ce qui concerne la résistance électrique, le poids, la tenue mécanique et le coût [15] .

2.4.1 Paramètres essentiels d'une ligne de transmission(câble électrique)

Un câble électrique présente une impédance complexe Z , qui représente les composantes résistives, inductives et capacitatives des éléments du réseau électrique.

L'impédance Z d'un circuit électrique est composée d'une partie résistive R , d'une partie inductive L et d'une partie capacitive C , qui le caractérisent complètement du point de vue électrique. Elle

s'exprime par cette expression mathématique :

$$Z = R + j2\pi fL - \frac{j}{2\pi fC} \quad (2.1)$$

Ces caractéristiques influent sur le comportement global du réseau électrique en fonction des niveaux de courant circulant dans ce réseau.

Elles se traduisent par une modélisation particulière de la couche physique, afin d'obtenir la meilleure qualité possible du canal de transmission.

Ces paramètres, conjointement avec le courant de charge et le facteur de puissance, déterminent les performances électriques de la ligne.

La performance à long terme comprend le calcul de la tension de fin, du courant de fin, du facteur de puissance de fin, des pertes de puissance dans la ligne, de l'efficacité de la transmission, ainsi que la régulation et les limites de débit de puissance pendant l'état d'équilibre et l'état transitoire [16] .

2.4.2 Les paramètres primaires

Les éléments R, C, L sont appelés paramètres primaires de la ligne. Ils s'expriment par unité de longueur.

Ces éléments sont déterminés par les caractéristiques intrinsèques du câble et dépendent du matériel et de la géométrie. fig 2.1 [17] permet de décrire le circuit schématique de la ligne électrique :

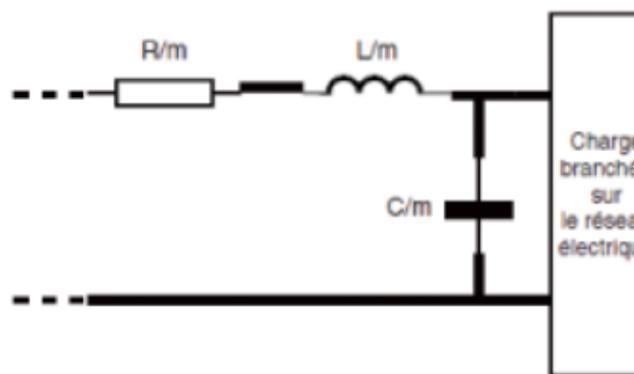


Figure 2.1: Circuit schématique de la ligne électrique [17]

- La résistance linéaire (R) des fils conducteurs du côté de la ligne de transmission est exprimée en (Ω).
- L'inductance linéique des deux conducteurs de la ligne. Elle s'exprime en H/m.

- La conductance transversale linéique due aux pertes diélectriques. Elle s'exprime en S/m. [12]

2.4.3 Bruits et perturbations électromagnétiques

Les câbles électriques, bien qu'essentiels pour le transport de l'énergie, sont également sujets à divers bruits et perturbations électromagnétiques (EMI) qui peuvent affecter la qualité des signaux transmis.

Ces interférences peuvent provenir de sources internes ou externes au système de câblage et peuvent avoir des impacts significatifs sur la performance des communications par courant porteur en ligne (CPL) [18].

2.4.3.1 Sources de bruit et perturbations

1. Interférences internes :

- **Commutations électriques** : Les commutations de charges inductives, comme les moteurs et les transformateurs, génèrent des transitoires de tension qui introduisent des bruits dans le réseau électrique.
- **Équipements électroniques** : Les appareils électroniques, tels que les ordinateurs et les alimentations à découpage, émettent des fréquences qui peuvent interférer avec les signaux CPL.

2. Interférences externes :

- **Rayonnements électromagnétiques** : Les sources de rayonnements électromagnétiques externes, comme les antennes de télécommunication et les émetteurs radio, peuvent induire des courants parasites dans les câbles électriques.
- **Coupures et perturbations de ligne** : Les événements tels que les coupures de courant ou les perturbations dues aux travaux sur les lignes électriques peuvent introduire des bruits significatifs.

3. Impacts sur le réseau CPL : Les bruits et perturbations électromagnétiques peuvent altérer la qualité des signaux CPL de plusieurs manières :

- **Dégradation du signal** : Les bruits superposés aux signaux CPL réduisent la clarté du signal reçu, entraînant des erreurs de transmission.
- **Atténuation du signal** : Les interférences peuvent causer une perte d'énergie dans le signal, diminuant sa portée effective.
- **Augmentation des erreurs de transmission** : Les interférences augmentent la proba-

bilité d'erreurs dans la transmission des données, nécessitant des mécanismes de correction d'erreurs plus robustes.

4. **Mesures de mitigation** : la gestion efficace des bruits et perturbations électromagnétiques dans les câbles électriques est essentielle pour assurer la fiabilité et la performance des systèmes CPL. En appliquant des mesures de mitigation appropriées, il est possible de réduire l'impact des interférences et d'optimiser la qualité de transmission des données. Pour minimiser les effets des bruits et des perturbations électromagnétiques, plusieurs stratégies peuvent être mises en œuvre :

- **Filtrage** : Utiliser des filtres passe-bas, passe-haut ou passe-bande pour éliminer les fréquences indésirables et réduire le bruit dans les signaux CPL.
- **Blindage** : Installer des câbles blindés pour réduire la susceptibilité aux interférences électromagnétiques.
- **Disposition des câbles** : Éloigner les câbles des sources de bruit potentiel et organiser le câblage pour minimiser les boucles de masse et les interférences.
- **Technologies de modulation avancées** : Utiliser des techniques de modulation comme OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) pour améliorer la robustesse contre les interférences. la gestion efficace des bruits et perturbations électromagnétiques dans les câbles électriques est essentielle pour assurer la fiabilité et la performance des systèmes CPL. En appliquant des mesures de mitigation appropriées, il est possible de réduire l'impact des interférences et d'optimiser la qualité de transmission des données.

2.4.4 Atténuation

L'atténuation désigne la réduction de la puissance d'un signal lorsqu'il se propage à travers un médium, tel qu'un câble électrique.

En d'autres termes, c'est la perte d'énergie subie par le signal au fur et à mesure qu'il se déplace de l'émetteur au récepteur.

L'atténuation est un facteur crucial à prendre en compte dans la transmission des données, car elle influence la qualité et la portée des signaux [18].

2.4.4.1 Causes de l'atténuation

- **Résistance des conducteurs** : Les câbles électriques ont une résistance intrinsèque qui provoque une perte d'énergie sous forme de chaleur.

Plus le câble est long, plus la résistance totale augmente, entraînant une plus grande atténuation du signal.

- **Effet de peau** À des fréquences élevées, les courants électriques tendent à se concentrer près de la surface des conducteurs, augmentant ainsi la résistance effective et, par conséquent, l'atténuation.
- **Impedance mismatch** Les discontinuités dans l'impédance du câble, dues à des connexions ou des jonctions incorrectes, peuvent causer des réflexions et des pertes supplémentaires.
- **Capacitance et inductance** Les caractéristiques capacitatives et inductives des câbles électriques influent également sur l'atténuation, surtout à des fréquences plus élevées.
- **Interférences et bruit** Les bruits électromagnétiques et les interférences peuvent ajouter des composantes indésirables au signal, augmentant l'atténuation perçue.

2.4.4.2 Mesure de l'atténuation

L'atténuation est effectivement mesurée en décibels (dB), une unité logarithmique utilisée pour quantifier la perte de puissance. La formule pour calculer l'atténuation en décibels est la suivante :

$$\text{Atténuation (dB)} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{entrée}}}{P_{\text{sortie}}} \right) \quad (2.2)$$

où :

- $P_{\text{entrée}}$ est la puissance du signal à l'entrée du câble .
- P_{sortie} est la puissance du signal à la sortie.

2.4.4.3 Conséquences de l'atténuation

- **Diminution de la portée** Une atténuation élevée réduit la distance sur laquelle le signal peut être transmis sans nécessiter de répéteurs ou d'amplificateurs.
- **Qualité du signal** L'atténuation peut dégrader la qualité du signal, entraînant des erreurs de transmission et la nécessité de techniques de correction d'erreurs plus sophistiquées.
- **Besoins en amplification** Pour compenser l'atténuation, des amplificateurs peuvent être nécessaires, ce qui augmente la complexité et le coût du système.

2.5 Courants Porteur en Ligne (CPL)

Le Courant Porteur en Ligne ou (CPL), est une technologie qui utilise les réseaux électriques existants d'un bâtiment pour transporter les données sans câblage spécifique supplémentaire. Comme le montre la fig 2.2 :

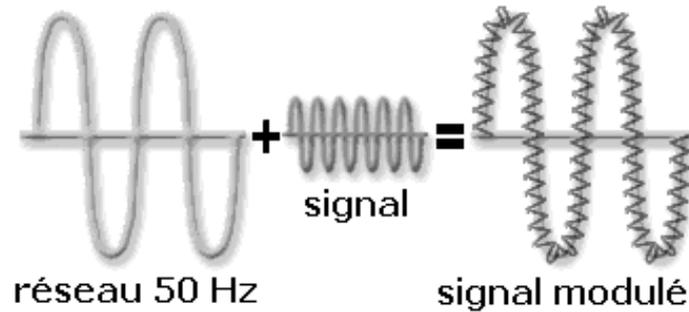


Figure 2.2: Courants Porteurs en Ligne (CPL)

Le principe des CPL (Courants Porteurs en Ligne) consiste à superposer au signal électrique de 50 Hz un autre signal à plus haute fréquence (bande de 1,6 à 30 MHz) et de faible énergie (environ 2 volts).

Ce deuxième signal se propage sur l'installation électrique et peut être reçu et décodé à distance.

En séparant de cette manière les signaux basse fréquence et les ondes de haute fréquence sur lesquelles transitent les données numériques, on ne nuit en aucun cas aux équipements électriques installés sur le réseau [19].

De cette façon, lorsqu'un signal CPL est envoyé sur le réseau électrique, n'importe quel récepteur CPL pourra le recevoir s'il se trouve sur le même réseau électrique.

Un coupleur intégré en entrée des récepteurs CPL élimine les composantes basses fréquences avant le traitement du signal. Cette technologie est également connue sous d'autres appellations, telles que :

- CPL (Courants Porteurs en Ligne)
- PLC (Power Line Communications)
- PLT (Power Line Telecommunications)
- PPC (Power Plus Communications)
- BPL (Broadband over Power Line)

2.6 Méthodes Couplage des données CPL

Toute installation de réseau CPL doit être soignée au niveau de l'injection du signal CPL sur le réseau électrique.

Il existe deux méthodes de couplage : le couplage capacitif, en parallèle sur le réseau électrique, ou le couplage inductif via un tore de ferrite.

Pour les installations en intérieur (indoor), le couplage capacitif est réalisé par défaut lorsqu'on branche l'équipement CPL sur la prise électrique.

Le problème ne se pose donc que pour les installations en extérieur (outdoor). Les réseaux triphasés doivent permettre de transmettre la même qualité de signal sur toutes les phases.

Un bon couplage minimise les effets de rayonnement et optimise la qualité du signal sur le réseau, et sur toutes les phases si l'on est en triphasé.

2.6.1 Couplage capacitif

Le couplage capacitif est le plus utilisé pour le CPL indoor, étant intégré de manière native dans les adaptateurs pour des réseaux monophasés.

Lorsqu'on couple le signal CPL au réseau via une prise électrique, on utilise le couplage capacitif : l'équipement est branché en parallèle sur le départ.

Le couplage capacitif peut également se faire au niveau du tableau électrique pour un réseau triphasé, mais cette opération doit être réalisée par un électricien [20].

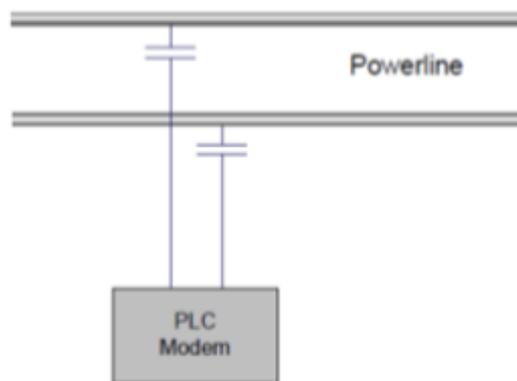


Figure 2.3: Couplage capacitif

2.6.2 couplage inductif

l'équipement est raccordé sur une phase (ou plusieurs) au réseau par le biais d'une bobine (tore de ferrite).

Le signal se propage sur les autres phases et sur le réseau par effet magnétique.

Ce type de couplage est utilisé quand on injecte sur un réseau triphasé, afin d'avoir la même qualité de signal sur les trois phases.

Les couplages inductifs sont réalisés avec des coupleurs de marque Eichhoff : ils consistent en un gros tore en deux parties que l'on referme avec du gaffer pour assurer une efficacité maximum du couplage [21] .

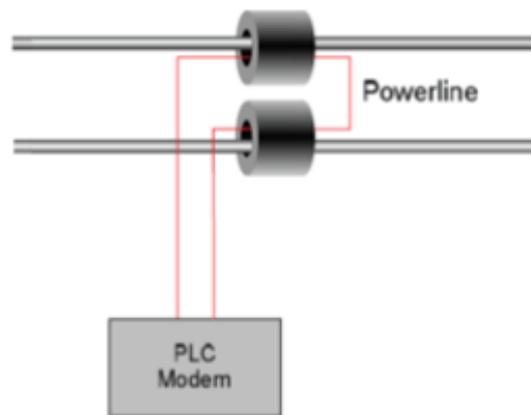


Figure 2.4: Couplage inductif

2.6.3 Modulations

La modulation du signal électrique CPL (Courants Porteur en Ligne) est une technique essentielle qui permet de superposer un signal de données haute fréquence sur le signal électrique de 50 Hz utilisé dans les réseaux électriques.

2.6.3.1 Modulation de Fréquence

Le signal de données est modulé à une fréquence plus élevée (bande de 1,6 à 30 MHz) que le signal électrique standard de 50 Hz.

Cette modulation haute fréquence permet de transmettre des données sans interférer avec le fonctionnement normal des appareils électriques.

2.6.3.2 Techniques de Modulation

- **ASK (Amplitude Shift Keying)** Cette technique modifie l'amplitude du signal pour représenter les données. C'est simple mais sensible aux interférences.
- **FSK (Frequency Shift Keying)** Utilise deux fréquences distinctes pour représenter les bits 0 et 1. Cette méthode est plus robuste que l'ASK.
- **PSK (Phase Shift Keying)** Modifie la phase du signal pour coder les données. C'est plus complexe mais offre une meilleure performance en termes de résistance aux interférences.
- **OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)** Utilise plusieurs sous-porteuses orthogonales pour transmettre des données simultanément, augmentant ainsi le débit et la robustesse contre les interférences.

2.6.3.3 Injection du Signal Modulé

Le signal modulé est injecté dans le réseau électrique via des coupleurs capacitifs ou inductifs, assurant une transmission efficace sur les lignes électriques.

2.6.3.4 Séparation des Signaux

Les récepteurs CPL disposent de filtres pour séparer les signaux de haute fréquence (données) des signaux de basse fréquence (électriques). Ces filtres éliminent les composantes basse fréquence avant de traiter le signal de données

2.6.3.5 Traitement et Décodage

Une fois reçu, le signal de données est démodulé pour récupérer les informations originales. Le démodulateur inverse le processus de modulation, extrayant ainsi les données numériques.

Le signal change de fréquence en fonction de la séquence de bits à transmettre.

2.6.3.6 Avantages de la Modulation CPL

- **Utilisation de l'infrastructure existante :** Aucun besoin de nouveaux câbles, ce qui réduit les coûts d'installation.

- **Flexibilité** : Peut être utilisé pour diverses applications comme la domotique, la gestion de l'énergie, et la transmission de données internet.
- **Compatibilité** : Les équipements CPL peuvent être ajoutés à tout moment, augmentant la modularité du réseau.

2.6.3.7 Défis et Considérations

- **Interférences Électromagnétiques** : Les signaux CPL peuvent subir des interférences provenant d'autres appareils électriques.
- **Atténuation du Signal** : La qualité du signal peut se dégrader sur de longues distances ou à travers plusieurs phases d'un réseau triphasé.
- **Sécurité** : Nécessite des mesures de sécurité pour protéger les données transmises sur le réseau électrique.

La modulation du signal électrique CPL est donc une technologie clé pour les communications sur les réseaux électriques, permettant des transmissions de données efficaces et flexibles sans nécessiter de nouvelles infrastructures.

2.6.4 Modulation analogiques

Les modulations analogiques (fig 2.5) modifient les paramètres d'une onde porteuse (amplitude, fréquence ou phase) de façon proportionnelle au signal analogique à transmettre [19].

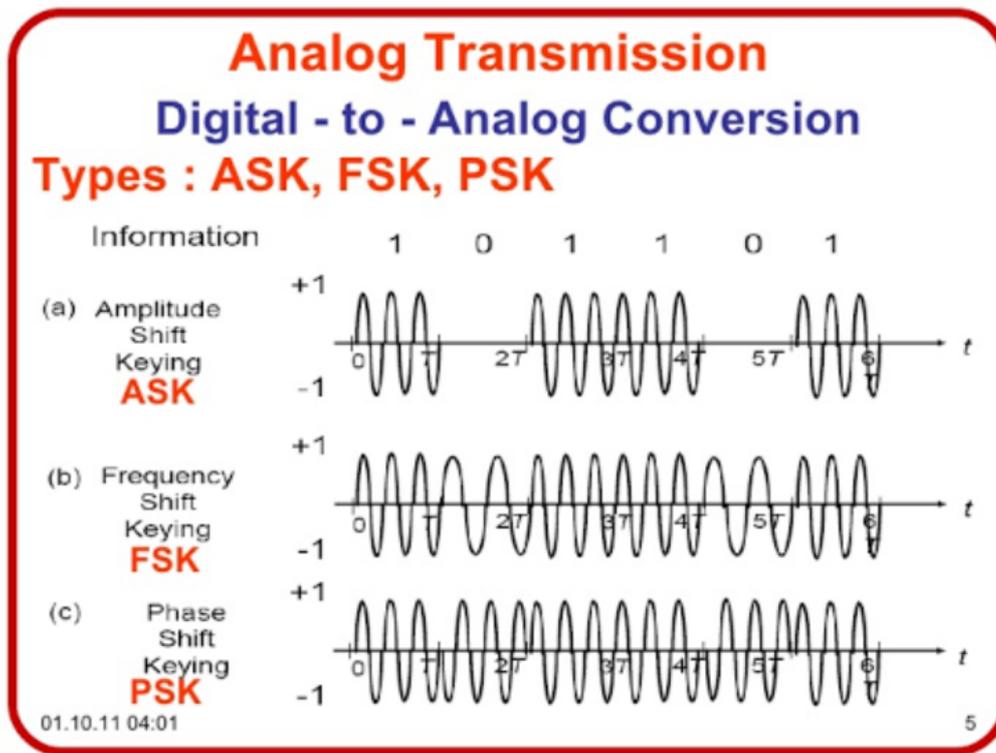


Figure 2.5: Modulation analogiques

Exemples :

- **Modulation d'amplitude (AM)** : l'amplitude de la porteuse est modulée par le signal
- **Modulation de fréquence (FM)** : la fréquence de la porteuse est modulée par le signal
- **Modulation de phase (PM)** : la phase de la porteuse est modulée par le signal

2.6.5 Modulations numériques

Les modulations numériques transmettent des signaux binaires (0 et 1) en modifiant les paramètres de la porteuse [?] :

- **Modulation d'amplitude à déplacement (ASK)** : présence/absence de porteuse représente 1/0
- **Modulation de fréquence à déplacement (FSK)** : fréquences différentes représentent 1/0
- **Modulation de phase à 4 états (QPSK)** : 4 états de phase représentent 00, 01, 11, 10
- **Modulation d'amplitude en quadrature (QAM)** : combinaison d'ASK sur les composantes en phase et en quadrature

2.6.6 Modulation OFDM

La technique de modulation la plus couramment utilisée pour les systèmes CPL est l'OFDM, adoptée par les constructeurs pour les applications en intérieur en raison de son efficacité spectrale et de sa résistance aux perturbations [3].

L'OFDM est une modulation multiporteuse qui envoie simultanément l'information sur N sous-porteuses, suivie d'une transformée de Fourier.

Cette approche permet de récupérer l'information même dans des environnements perturbés, car le signal peut passer d'une porteuse à une autre en cas d'obstacle [5].

L'orthogonalité des sous-porteuses assure une occupation optimale de la bande allouée [22].

la figure 2.6 représente la modulation OFDM

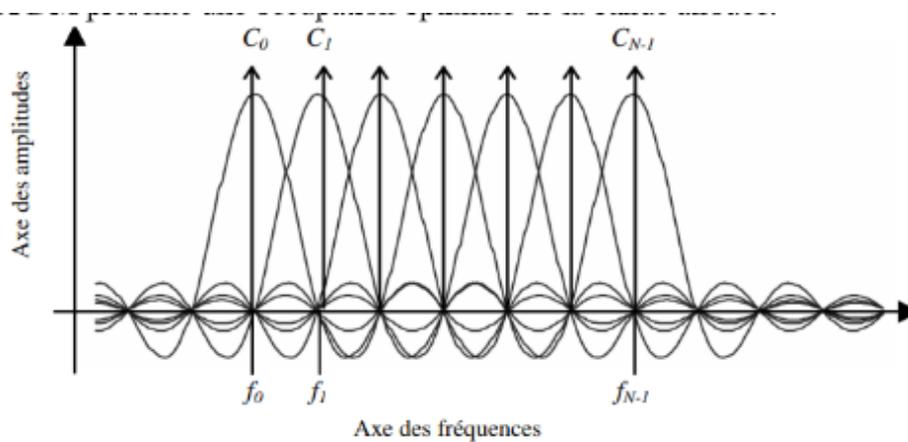


Figure 2.6: Modulation OFDM

2.7 Standardisation de courant porteur

Initialement, nous citons les deux normes internationales qui régissent les communications CPL telles que IEEE1901 et l'international Télécommunication Union Télécommunication Standardisation Sector (ITU-T) G.hn . D'une part, les produits prêts à être commercialisés selon l'IEEE 1901 ont été certifiés soit par HomePlug Powerline Alliance , aux États-Unis et en Europe, soit par l'alliance HD-PLC , principalement au Japon.

D'autre part, les produits prêts à l'emploi conformes à IUIT-T G.hn ont été certifiés par l'alliance HomeGrid Forum . Les produits de la famille HomePlug sont les plus déployés sur le marché.

la fig2.7, représente l'évolution des générations CPL en fonction du temps :

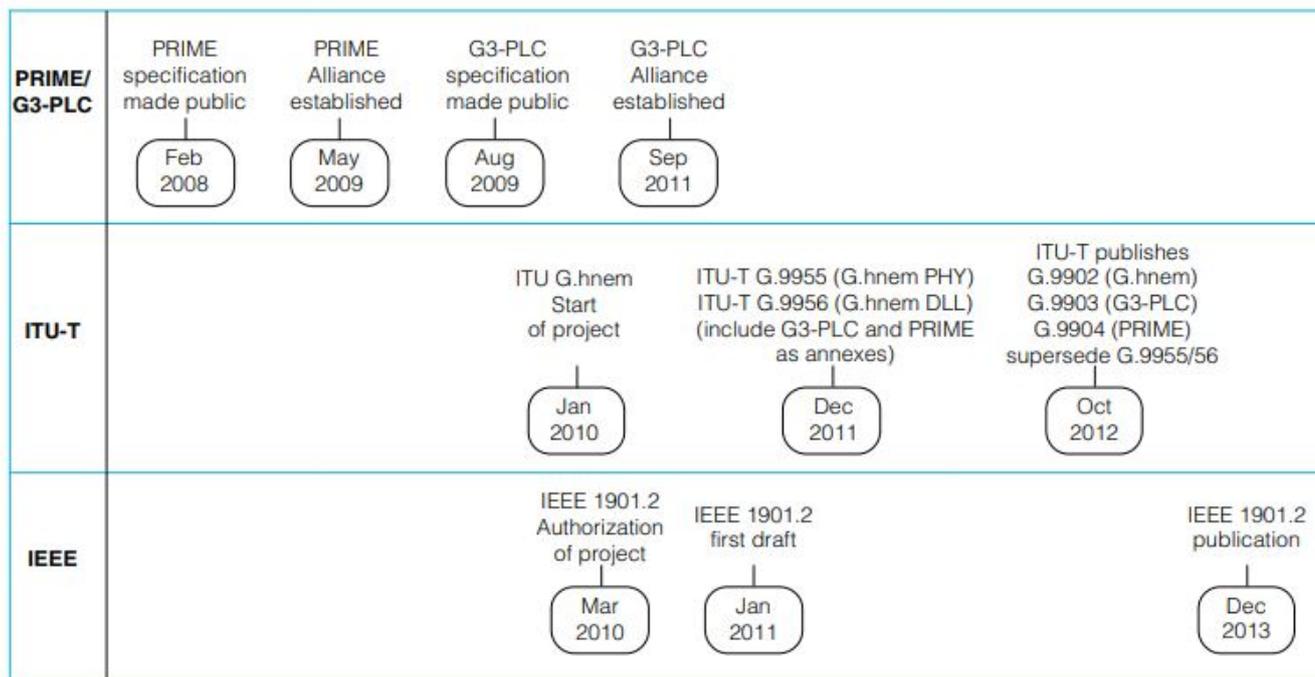


Figure 2.7: Évolution des générations CPL

2.7.1 La Norme IEEE1901 Standard

Le groupe de travail IEEE P1901 a été formé en 2005 dans le but d'unifier les technologies des lignes électriques en vue de développer une norme pour les dispositifs de communication à haut débit (100 Mb/s) utilisant des fréquences inférieures à 100 MHz, destinée aux applications HN et d'accès.

Une version de référence de la norme a été soumise au vote de confirmation en décembre 2008, définissant trois technologies PLC : un PHY/MAC basé sur FFT-OFDM, un PHY/MAC basé sur Wavelet-OFDM et un PHY/MAC compatible G.9960.

Selon la portée de l'IEEE 1901, la norme sera utilisable par toutes les classes de dispositifs PLC, y compris ceux utilisés pour les services à large bande du premier ou du dernier mille (1500 mètres des sites), ainsi que les appareils utilisés à l'intérieur des bâtiments pour les réseaux locaux (LAN) et autres applications de distribution de données (100 mètres entre les appareils).

La spécification PHY FFT-OFDM 1901 facilite la rétrocompatibilité avec les dispositifs basés sur la spécification HomePlug AV. De même, la spécification PHY Wavelet-OFDM 1901 facilite la rétrocompatibilité avec les appareils basés sur la spécification industrielle de l'alliance HD-PLC. [23]

2.7.2 La Norme HomePlug Standard

Le protocole de transmission de Home Plug est de type CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) similaire au 802.11, auquel ont été ajoutées des classes de priorités et le contrôle de la latence. Les bandes de fréquences utilisées vont de 4,3 MHz à 20,9 MHz pour un taux de transfert de 14 Mbits/s théoriques, dont environ 6 Mbits/s utiles.

la fig 2.8 represent la norme HomePlug STANDARD

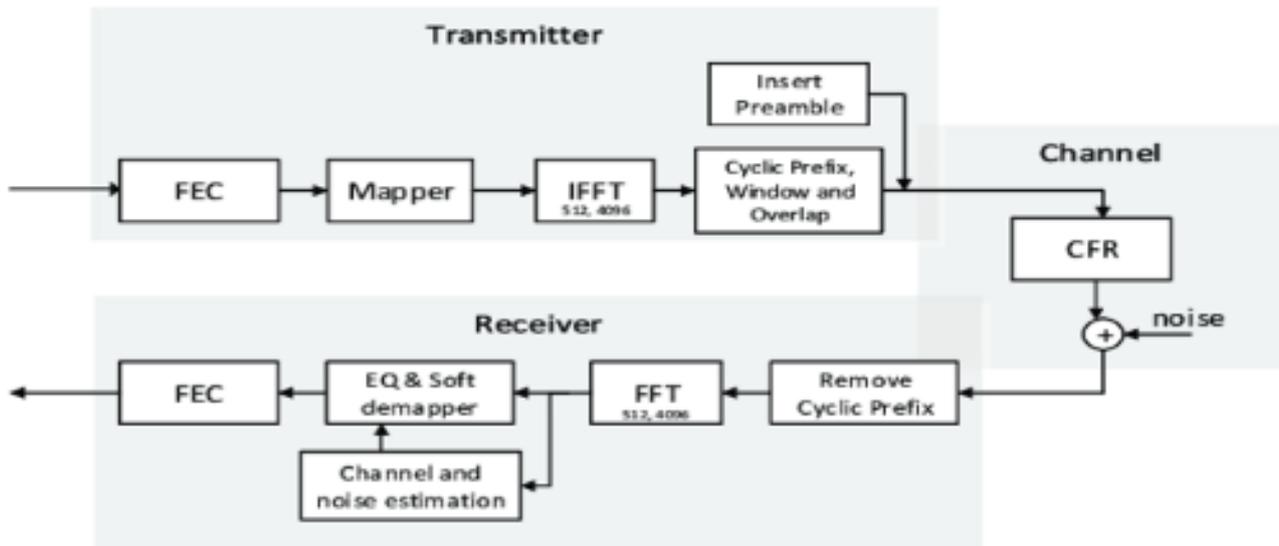


Figure 2.8: La Norme HomePlug Standard

Plus la distance est importante entre émetteur et récepteur, moins le signal est bon. Ainsi, la distance de communication maximale est estimée à environ 200 mètres, mais cest là encore une donnée théorique.

En effet, la distance de communication et le taux de transfert sont proportionnels au rapport signal/bruit (SNR) et tributaires de la qualité des connexions sur le réseau. Donc, tout ce qui affecte le rapport signal/bruit (alimentations à découpages, lampes halogènes...) ou modifie limpédance du réseau (rallonges, multiprises. ..) est susceptible d'affecter les distances de communication et le taux de transfert.

Ces caractéristiques du réseau électrique incitent à la prudence, et il vaut mieux évaluer la qualité du réseau avant toute décision, pour vérifier si le débit obtenu est exploitable ou non.

Cela permet de vérifier si l'investissement est à la hauteur du service promis. Dans les pires conditions, le risque est de plafonner à un débit de l'Ordre du mégabit par seconde. Inexploitable, même pour un petit réseau. [14]

2.7.3 La Norme G3 PLC

L'alliance G3-PLC est une association à but non lucratif créée en 2011 pour standardiser et promouvoir la technologie G3-PLC pour les compteurs intelligents, les réseaux intelligents, les appareils intelligents et les applications industrielles à l'échelle mondiale.

Les industriels membres de l'alliance G3-PLC (utilities, équipementiers, fabricants de puces, maisons de tests) s'engagent sur sa charte consistant principalement dans la maintenance des Spécifications G3-PLC et leur soutien dans les organismes de normalisation internationalement reconnus, pour faciliter l'interopérabilité entre les adoptants du G3-PLC et pour promouvoir la technologie G3-PLC. Concrètement, l'alliance G3-PLC est organisée en quatre ateliers sous la supervision du Directeur Stratégique.

Comité directeur (SSC) :

- **WS1** :Maintenance des spécifications
- **WS2** :Marketing et promotion
- **WS3** : Interopérabilité
- **CPEC** : Maintien du Programme de Certification

2.8 Conclusion

La technologie de CPL est une solution efficace et rentable pour transmettre des données à l'aide de l'infrastructure électrique existante sans avoir besoin de déployer de nouveaux câbles.

Cette technologie repose sur l'ajout d'un signal haute fréquence au signal électrique traditionnel.

Grâce à des techniques de fusion analogique et numérique, le système peut s'adapter à différents types de données et à diverses exigences d'application.

La modulation orthogonale multiporteuse (OFDM) offre une efficacité spectrale élevée et une résistance au bruit et aux interférences.

En examinant les différentes normes relatives aux technologies CPL, il est clair que des efforts sont déployés pour améliorer les performances de cette technologie et garantir sa compatibilité avec les systèmes électriques et les normes mondiales, ce qui améliore les possibilités d'utilisation dans de nombreuses communications.

Chapitre 3

Conception et simulation de système de communication CPL

3.1 Introduction

En réponse au développement rapide des technologies de communication et des réseaux, notre projet vise à concevoir un système permettant d'envoyer et de recevoir des données du compteur électrique à distance, ainsi que de le contrôler, en utilisant la technologie de communication par courant porteur en ligne (CPL).

Cette méthode s'avère particulièrement efficace car elle utilise le réseau électrique existant pour transférer les données, sans nécessiter de nouveaux câbles.

Ce chapitre présente en détail la solution que nous avons développée pour ce projet.

Le système proposé, utilisant la technologie CPL pour la collecte et la transmission des données, constitue une solution robuste et efficace pour la surveillance et la gestion des données de consommation d'énergie.

La capacité du système à automatiser la collecte des données, à fournir une surveillance en temps réel et à faciliter l'analyse des données en fait un outil précieux pour optimiser la consommation d'énergie et réduire les coûts.

3.2 Description du système

Les compteurs numériques, également connus sous le nom de compteurs électroniques, sont des dispositifs avancés de mesure de l'énergie électrique qui remplacent progressivement les compteurs électromécaniques traditionnels.

Ils se distinguent par leur capacité à fournir des mesures précises, des données détaillées et des fonctionnalités de communication avancées.

De plus en plus des compteurs électriques sont équipés de modules de communication qui permettent de transmettre automatiquement les données à distance. Cela peut se faire via des technologies filaires comme le CPL (Courant Porteur en Ligne) ou sans fil comme les réseaux cellulaires ou les réseaux IoT (Internet des Objets).

Le concept principal du processus de communication est simplement décrit dans le diagramme suivant (voir Fig3.1).

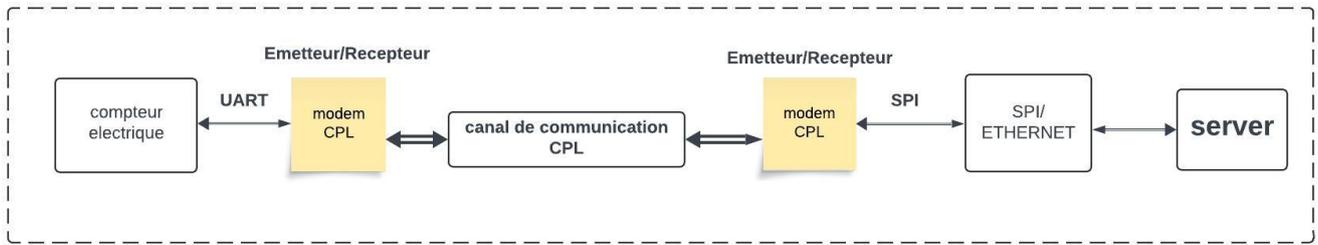


Figure 3.1: Système de communication par CPL

- **Outil de modulation** : Ce composant joue un rôle crucial dans la conversion des données numériques en signaux CPL compatibles avec le réseau électrique. Il garantit que les données sont transmises sous une forme appropriée pour la transmission sur les lignes électriques.
- **Filtres** : Le système intègre une série de filtres pour optimiser la qualité du signal CPL
- **Filtre passe-bas passif** : Ce filtre atténue les hautes fréquences indésirables qui peuvent perturber la transmission du signal CPL.
- **Filtre passe-bas actif** : Offrant une atténuation plus sophistiquée des hautes fréquences, ce filtre améliore encore la qualité du signal CPL.
- **Filtre passe-bande** : Ce filtre joue un rôle essentiel en sélectionnant la bande de fréquence spécifique requise pour la transmission des données CPL. Cette sélection garantit que les données sont transmises dans la bande de fréquence appropriée pour une communication efficace

Comme mentionné précédemment, l'objectif de ce projet est de concevoir un système permettant l'envoi d'informations et la réception d'instructions entre le compteur électrique et le serveur en utilisant la technologie de communication par lignes électriques (CPL). Nous avons utilisé la puce ST7540 pour réaliser la communication.

Le circuit comprend les composants suivants : un filtre passe-bas actif, un filtre passe-bande, un Filtre isolateur, la puce ST7540, ainsi qu'une unité d'alimentations électrique.

3.2.1 Principe de fonctionnement du systeme

Le CPL fonctionne en modulant un signal de données sur une fréquence porteuse haute fréquence et en l'injectant dans le réseau électrique.

Ce signal de données voyage ensuite le long des câbles électriques du compteur électrique, atteignant les systèmes centralisés.

- Le système repose sur un compteur électrique relié à un serveur via une série de protocoles de

communication et de composants matériels. La transmission et la réception des données se fait en utilisant la technologie CPL

- En premier lieu , le compteur électrique mesure la consommation énergétique.
- Ensuite, ces données sont transmises via les lignes électriques en utilisant la technologie CPL. Le compteur électrique transmet les données via une interface UART à un modem CPL, qui les modifie pour les transmettre sur les lignes électriques.
- Les données sont ensuite reçues par un deuxième modem CPL, converties en signaux SPI, puis transmises à une interface SPI/Ethernet.
- Enfin, ces données sont traitées et transférées vers un serveur central où elles peuvent être stockées, analysées et utilisées pour diverses applications telles que la surveillance de la consommation d'énergie, la facturation, ou d'autres services liés à la gestion de l'électricité

3.3 Architecture du systèmes

L'architecture du système de transmission des données de consommation d'énergie vers un serveur central est conçue pour être efficace et fiable facilitant ainsi la gestion et la surveillance à distance des consommations d'électricité.

Elle utilise la technologie CPL pour tirer parti des infrastructures existantes, réduisant ainsi les coûts de déploiement et améliorant l'efficacité opérationnelle.

La précision et l'intelligence intégrées dans les compteurs et modems assurent une collecte de données précise et fiable, essentielle pour une gestion énergétique efficace et équitable.

Le système se compose de deux unités principales qui fonctionnent ensemble de manière intégrée, comme illustré sur la Fig 3.2 afin d'assurer une collecte, une transmission, un traitement et un stockage optimisés des données.

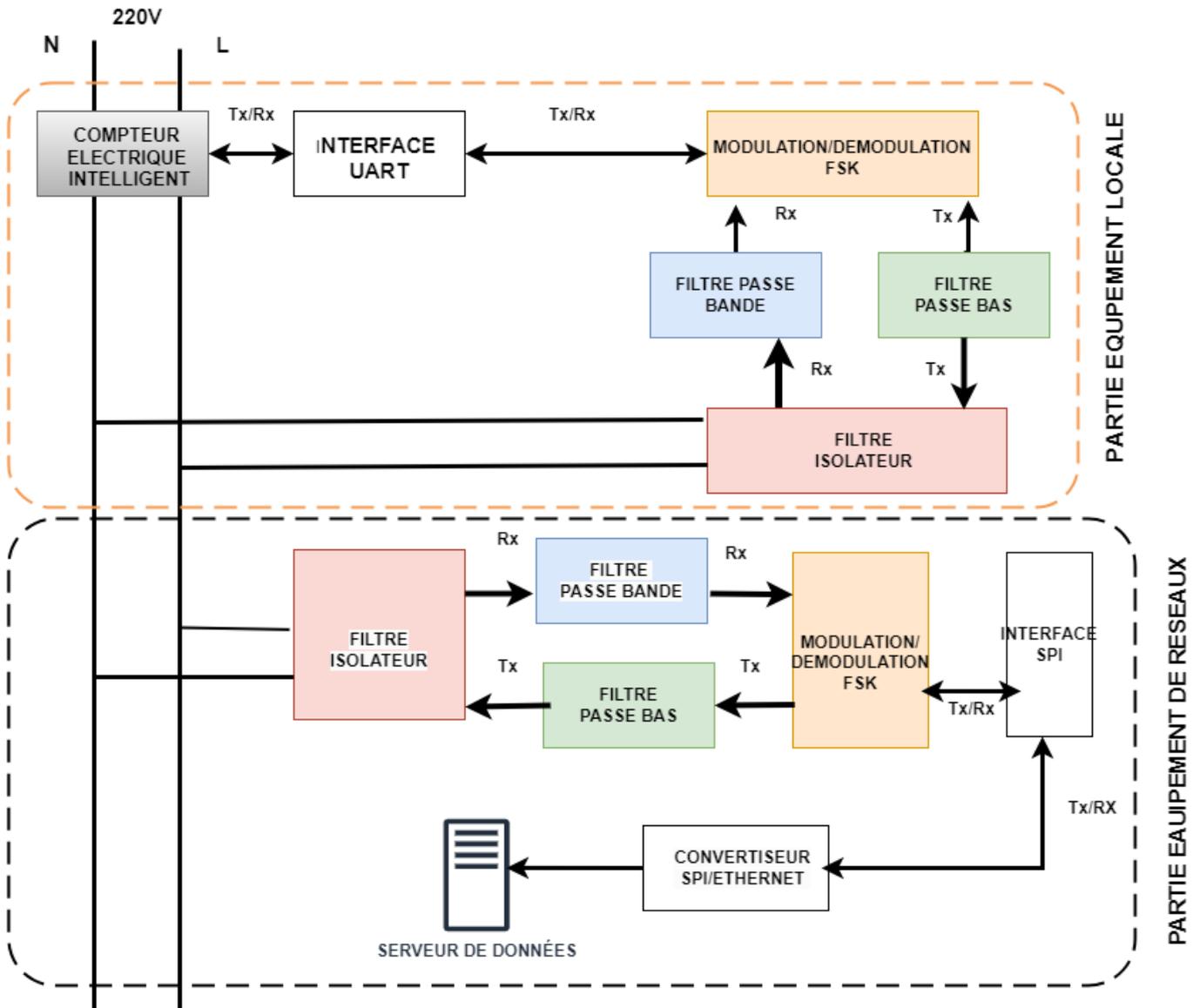


Figure 3.2: Architecture du système CPL

3.3.1 Partie équipement locale

L'équipement local du système de transmission des données des compteurs d'électricité comprend plusieurs composants essentiels qui assurent la collecte et la transmission des données de consommation d'énergie.

Il se compose des éléments suivants ; comme indiqué sur la Fig3.3 :

1. Compteur électrique intelligent

- Mesurer la consommation d'énergie électrique.
- Connecté au réseau électrique via des fils (L et N).
- Communique via l'interface UART (Tx/Rx) pour transmettre et recevoir des données.

2. Interface UART

- Responsable de la conversion des signaux entre le compteur électrique intelligent et le module FSK.

3. Modulation démodulation FSK

- Il convertit les données numériques en signaux FSK pour la transmission sur lignes électriques, et vice versa.
- Connecté à des filtres pour filtrer les fréquences.

4. Modem CPL (Courant Porteur en Ligne) :

- Fonction : Convertir les données du compteur en signaux pouvant être transmis sur les lignes électriques existantes.
- Utilise des protocoles comme FSK (Frequency Shift Keying), BPSK (Binary Phase Shift Keying), et ASK (Amplitude Shift Keying) pour la modulation des données.

5. Filtre passe bande

- Il laisse passer les fréquences requises et bloque les fréquences indésirables.

6. Filtre passe bas

- Il laisse passer les basses fréquences et bloque les hautes fréquences.

7. Filtre isolateur

- Il isole les signaux pour éviter les interférences entre les appareils et garantir la qualité du signal.

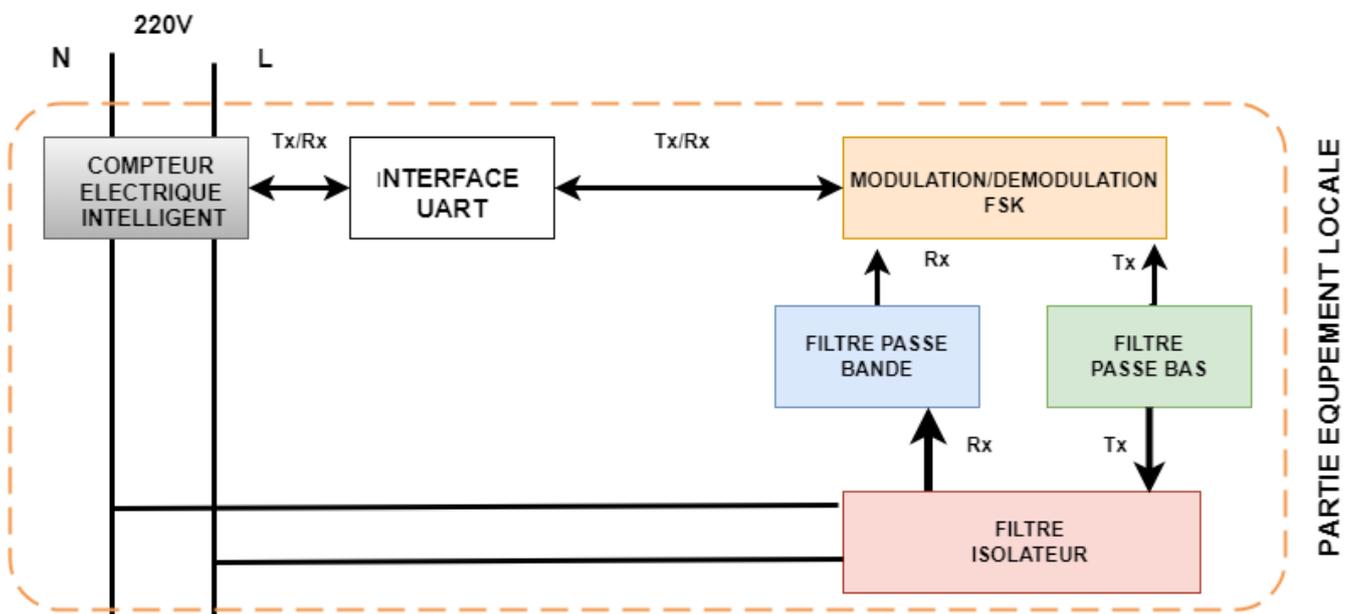


Figure 3.3: Partie équipement locale

3.3.2 Partie équipement réseaux

La partie équipement réseaux du système de transmission des données des compteurs d'électricité vers un serveur central utilisant la technologie CPL (Courant Porteur en Ligne) comprend les dispositifs nécessaires pour assurer la communication entre les modems CPL, les routeurs, les passerelles, et le serveur central.

Elle se compose de plusieurs éléments comme indiqué sur la Fig 3.4

1. Filtres Passe-Bas

- Les filtres passe-bas sont utilisés pour filtrer les signaux afin de réduire les interférences et d'assurer une transmission claire des données.
- Ils permettent la sélection des fréquences spécifiques utilisées pour la transmission CPL.
- Ils Doivent aussi isoler efficacement les signaux des bruits indésirables et maintenir l'intégrité du signal sans pertes significatives.

2. Filtres Passe-Bande

- Les filtres passent-bande permettent de sélectionner les fréquences spécifiques utilisées pour la transmission CPL, éliminant ainsi les interférences provenant d'autres fréquences.
- Les filtres passe-bas suppriment les bruits haute fréquence, assurant une réception claire du signal.
- Ces filtres doivent être optimisés pour la gamme de fréquences utilisée par le système CPL et doivent offrir une isolation suffisante pour minimiser les interférences.

3. Filtre isolateur

- Ce bloc isole le signal du réseau électrique pour empêcher les courants vagabonds de pénétrer dans le système.

4. Module de modulation/démodulation FSK

- Ce bloc module le signal de l'émetteur sur une fréquence porteuse en utilisant la modulation FSK (modulation par déplacement de fréquence) pour envoyer des données et le démodule lors de la réception

5. Interface SPI

- Ce bloc permet la communication avec le module de modulation/démodulation FSK en utilisant le protocole SPI.

6. Convertisseur SPI/Ethernet

- Ce bloc convertit le signal SPI en signal Ethernet pour permettre la connexion à un réseau Ethernet

7. Serveur de données

— Ce bloc reçoit et stocke les données transmises via le réseau Ethernet.

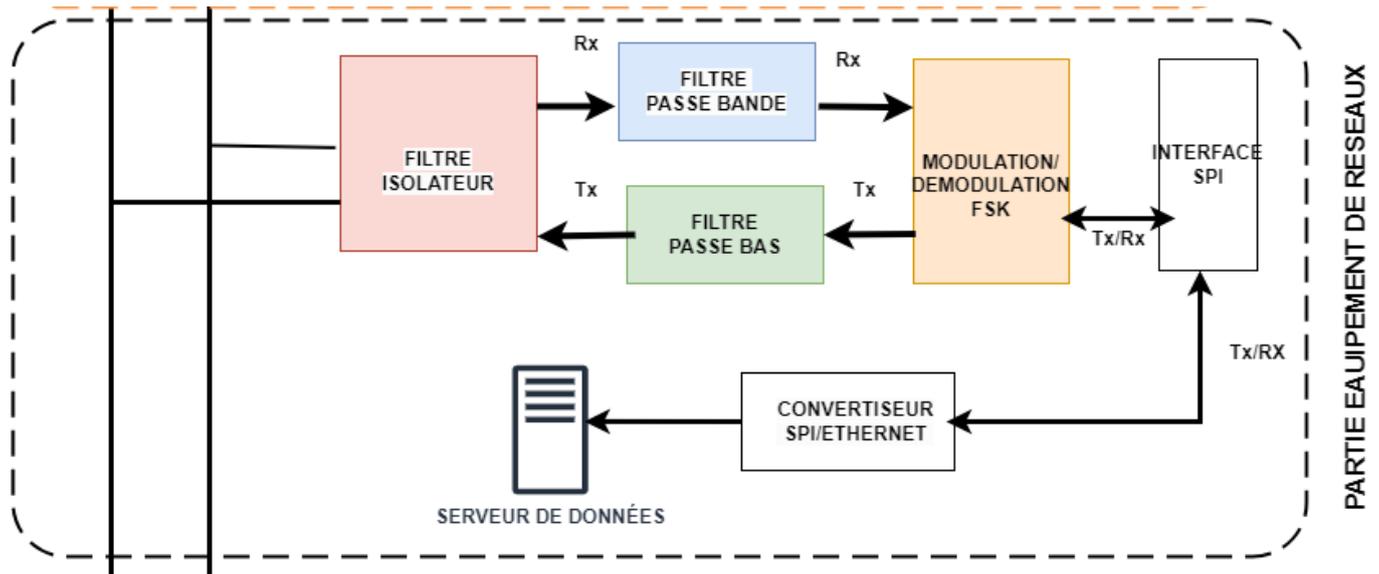


Figure 3.4: Partie équipement réseaux

3.4 Fonctionnement de système

3.4.1 Fonctionnement de la partie Équipement Locale

Dans l'équipement local, le compteur électrique intelligent mesure en permanence la consommation d'énergie électrique.

- Les données mesurées incluent la puissance consommée, la tension, le courant et d'autres paramètres pertinents.
- Les données de consommation collectées par le compteur sont transférées à l'interface UART via Tx/Rx .

L'interface UART assure la transmission série des données, en gérant la synchronisation et la correction des erreurs.

- Cette interface transmet ensuite les données au modulateur FSK, où elles sont modifiées et converties en signaux FSK.
- Ces signaux passent à travers des filtres passe-bande : Dans le contexte de la transmission des données des compteurs d'électricité via CPL (Courant Porteur en Ligne), un filtre passe-bande est utilisé pour s'assurer que le signal de données modulé reste dans la plage de fréquences spécifiée, minimisant ainsi les interférences et assurant une transmission fiable et précise des données vers le serveur central.

- Dans le contexte de la transmission des données des compteurs d'électricité via CPL (Courant Porteur en Ligne), un filtre passe-bas est utilisé pour supprimer les fréquences parasites hautes et assurer que seul le signal de données pertinent, généralement de plus basse fréquence, passe à travers le système.
- Cela contribue à maintenir une communication claire et fiable entre le compteur et le serveur central.
- Le signal modulé traverse ensuite un filtre isolant. Le filtre isolant joue un rôle crucial dans le système en empêchant les interférences avec d'autres signaux et en assurant une isolation efficace du signal modulé du reste du système.
Cela permet de maintenir la qualité et l'intégrité du signal transmis, en évitant les perturbations qui pourraient affecter les données transmises via la technologie CPL (Courant Porteur en Ligne).

3.4.2 Fonctionnement de partie Équipement réseaux

- Le signal est isolé par un filtre diélectrique pour protéger le système des interférences électriques.
- Ensuite, il est modulé et filtré par un filtre passe-bande afin d'éliminer les fréquences indésirables.
- Une fois cette étape terminée, le signal est transmis au module FSK. La communication avec ce module est assurée par l'interface SPI, où un convertisseur SPI/Ethernet se charge de convertir le signal de SPI en Ethernet pour permettre sa transmission sur le réseau Ethernet.
- Les données ainsi transmises sont envoyées à un serveur de données pour stockage et analyse.
- Du côté du récepteur du système de supervision, le signal est d'abord reçu puis démodulé à l'aide de la technologie de démodulation FSK.
- Enfin, le signal démodulé est filtré par un filtre passe-bas afin d'éliminer les hautes fréquences indésirables.

3.5 Description des différents modules

Divers modules sont utilisés pour la transmission et la réception des données.

Les modules CPL sont essentiels pour la mise en œuvre de réseaux de communication sur les lignes électriques.

Chaque type de module joue un rôle spécifique dans le processus de transmission, réception, couplage, filtrage et contrôle des signaux CPL.

Leur utilisation combinée permet de créer des systèmes de communication robustes et fiables, adaptés à diverses applications industrielles et domestiques.

3.5.1 Modules Transmetteurs/ Récepteurs

Ces modules sont responsables de la conversion des données numériques en signaux modulés qui peuvent être transmis ou émis sur les lignes électriques.

3.5.1.1 Module ST7540

- Le ST7540 est un composant clé pour les systèmes de transmission de données par courant porteur en ligne ,développé par STMicroelectronics.
- Il est particulièrement adapté aux applications de comptage électrique intelligent.
- Il convertit les données numériques en signaux CPL (Courant Porteur en Ligne) et vice versa. Ces signaux sont envoyés aux compteurs électriques et au serveur pour transmettre les données via les lignes électriques.
- Ce module se distingue par sa capacité à envoyer et recevoir des données de manière efficace et fiable sur les lignes électriques existantes, sans nécessiter de nouveaux câbles, ce qui le rend idéal pour les réseaux de distribution d'électricité modernes.

Notre choix s'est porté sur ce composant pour ces caractéristiques suivantes :

— **Haute efficacité de transmission des données**

- Le ST7540 prend en charge différents protocoles tels que FSK, BPSK et ASK, ce qui le rend flexible et adaptable aux exigences du système.
- Il supporte la communication bidirectionnelle en modes full duplex et half duplex, ce qui permet une transmission simultanée ou alternée des données.
- De plus, il offre des taux de transmission de données élevés allant jusqu'à 2400 bits par seconde, garantissant un transfert efficace des données. Nous n'avons pas accordé une grande importance à la vitesse de transmission, car une diminution de la vitesse permet d'augmenter la portée de transmission des données

— **Fiabilité de la connexion**

- Le ST7540 est conçu pour améliorer la résistance au bruit et aux interférences, assurant ainsi la stabilité et la qualité du signal dans des environnements électriques complexes.
- De plus, le module prend en charge des techniques avancées de correction d'erreurs, renforçant la fiabilité des données transmises et réduisant la perte d'informations et les

interférences.

— **Intégration facile avec les systèmes existants**

Le ST7540 est conforme aux normes internationales de communication par lignes électriques, facilitant son intégration dans les systèmes existants sans nécessiter de modifications majeures. Son design simple permet également une intégration aisée avec les compteurs électriques et les serveurs existants.

— **Coût abordable**

Comparée à d'autres technologies de communication, l'utilisation de la technologie CPL avec le ST7540 est une solution économique, la rendant adaptée aux grands projets nécessitant un déploiement étendu.

— **Prise en charge de plusieurs interfaces**

Le ST7540 offre plusieurs interfaces de communication telles que l'UART, facilitant la connexion avec une variété d'appareils et de microcontrôleurs.

— **Facilité de programmation et de configuration**

Le ST7540 est fourni avec un ensemble d'outils logiciels qui simplifient la configuration et la programmation du module selon les besoins spécifiques du système

3.5.2 Modules Transcepteurs

Ces modules combinent les fonctions de transmission et de réception, permettant la communication bidirectionnelle sur les lignes électriques.

3.5.2.1 L'interface UART

Universal Asynchronous Receiver-Transmitter est un protocole de communication série utilisé pour transférer des données entre les appareils de manière asynchrone. Les données sont transférées via seulement deux lignes : la ligne de transmission (TX) et la ligne de réception (RX). Nous avons choisi L'interface UART pour plusieurs raisons, notamment :

Simplicité de connexion : Ne nécessite que deux lignes pour la communication, ce qui rend simple et efficace.

Half-duplex : communication bidirectionnelle où les appareils prennent des tours

Full-duplex : communication bidirectionnelle où les appareils peuvent envoyer et recevoir en même

temps.

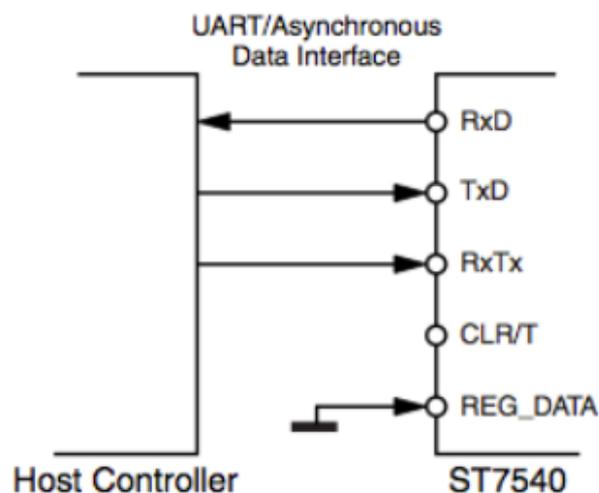


Figure 3.5: Connection de UART

3.5.2.2 L'interface SPI

Serial Peripheral Interface est un protocole de communication série utilisé pour transférer des données entre des appareils électroniques à des vitesses élevées. Elle est caractérisée par son mode de fonctionnement synchrone, ce qui signifie que les données sont transférées avec un signal d'horloge partagé entre les appareils. Les raisons du choix de cette interface sont les suivantes :

Haute vitesse : Offre des taux de transfert de données élevés, ce qui la rend idéale pour les applications nécessitant des vitesses de transmission rapides.

Connexion multi-appareils : Peut être utilisée pour connecter un appareil maître (Master) à plusieurs appareils esclaves (Slaves) en utilisant des lignes de contrôle distinctes.

Cette interface est nécessaire pour établir une connexion entre le module ST7540 et Internet, comme illustré dans la fig 3.6.

3.5.3 Modules de couplage

Ces modules permettent de coupler le signal CPL au réseau électrique. Ils assurent que le signal peut être injecté et récupéré efficacement sur les lignes électriques.

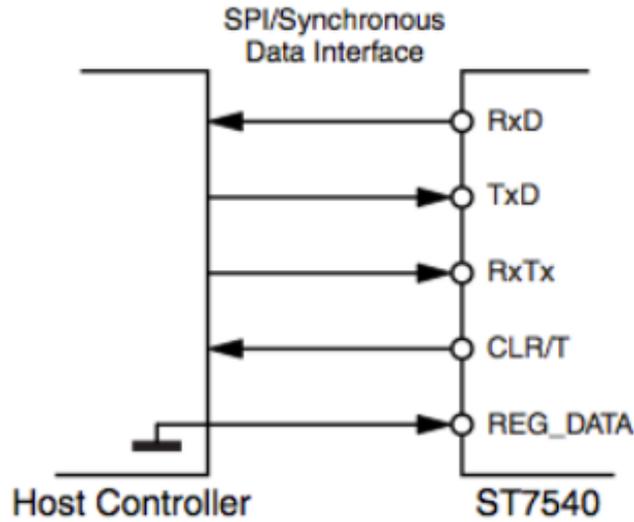


Figure 3.6: Connection de SPI

3.5.4 Modules filtrage

Ces modules sont utilisés pour éliminer les interférences et améliorer la qualité du signal CPL en filtrant les fréquences indésirables.

3.5.4.1 Filtre passe-bas actif

Le filtre passe-bas actif est constitué d'un ensemble de résistances et de condensateurs (R2, R3, R4, R5, R6, R7, C4, C5, U1e) ainsi que d'un amplificateur . Il élimine les hautes fréquences indésirables du signal reçu, permettant ainsi uniquement aux basses fréquences de passer.

De plus, il améliore la qualité du signal en réduisant le bruit des hautes fréquences. La Fig 3.19 représente le filtre passe-bas

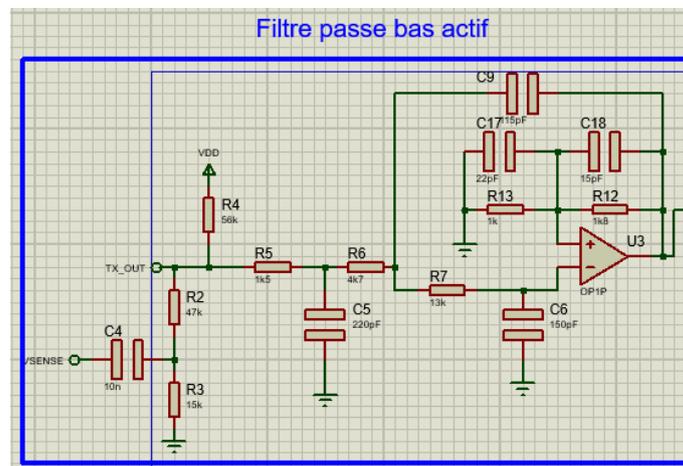


Figure 3.7: Schéma de filtre passe bas

3.5.4.2 Filtre passe-bande passif

Le filtre passe-bande passif se compose des condensateurs C1, C2, C3 et de la résistance R1. Ce filtre permet de laisser passer certaines fréquences dans une certaine plage et de supprimer les autres fréquences en dehors de cette plage.

Il aide à isoler les fréquences des signaux nécessaires afin d'éviter les interférences provenant d'autres fréquences indésirables. Les valeurs des condensateurs et des résistances sont choisies de manière à obtenir une plage de bande égale à 132,5 kHz.

La Fig 3.8 représente le filtre passe-bande passif utilisé dans la partie émission du système

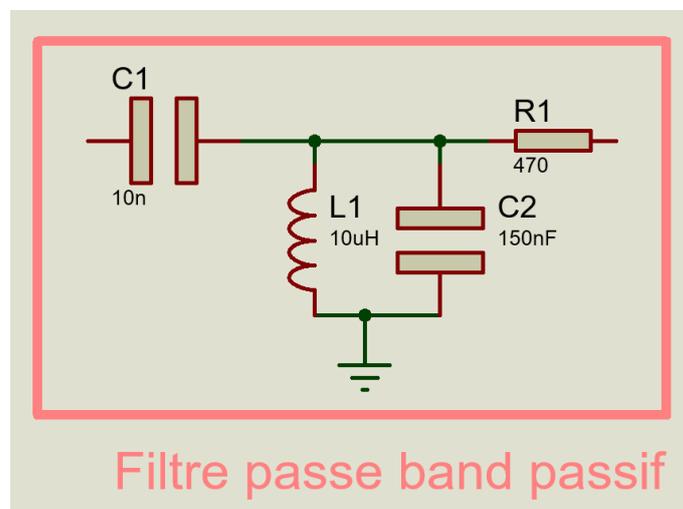


Figure 3.8: Schéma de filtre passe bande

3.5.4.3 Filtre isolateur

Filtre Isolateur se compose du transformateur TR1, du condensateur C10 et de l'inductance L3. Il isole le signal pour garantir qu'il ne se mélange pas avec d'autres signaux.

Il protège les parties sensibles du système des interférences électriques et assure la stabilité et la qualité du signal.

La fig 3.9 représente la simulation de Filtre Isolateur

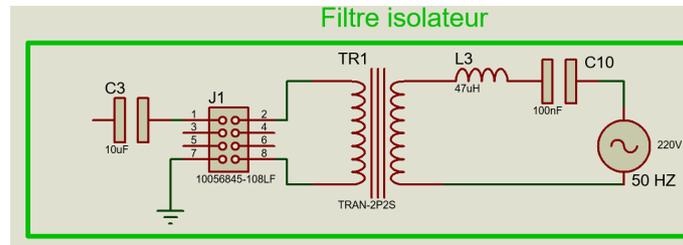


Figure 3.9: Schéma de filtre isolateur

3.5.5 Modules de contrôle et surveillance

Ces modules surveillent et contrôlent le fonctionnement des systèmes CPL, assurant une performance optimale et une gestion efficace des données.

3.5.6 Unité d'alimentation électrique

Le régulateur de tension U2, de type 7805, et les condensateurs C15 et C16, fournissent une tension stable et constante pour alimenter tous les composants électroniques du circuit.

Ils garantissent que tous les composants fonctionnent efficacement et avec des performances élevées, sans interruption ni interférence.

3.6 Exigences matérielles

Pour la mise en place d'un système de transmission des données des compteurs d'électricité vers un serveur central utilisant la technologie CPL (Courant Porteur en Ligne), plusieurs composants matériels sont nécessaires.

3.6.1 ENC28J60 ethernet board

3.6.1.1 Description

Module pour connecter des micro-contrôleurs (y compris Arduino) avec un réseau Ethernet. L'interface de communication est un bus numérique SPI.

La carte dispose d'un emplacement Ethernet RJ-45 pour le câble réseau et de fils dorés pour la

connexion à la carte de base. La tension d'alimentation du circuit est de 3,3 V ou 5 V (fig3.10).

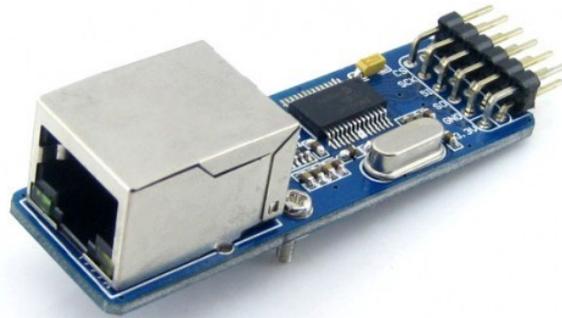


Figure 3.10: ENC28J60

3.6.1.2 Spécification

- Taux de transfert maximal : 25 MHz
- Interface de communication : SPI
- L'adresse MAC doit être définie dans le programme
- Type de module : 10Base-T
- Température de fonctionnement : -40 C à 85 C
- Dimensions : 50 x 32 x 16 mm

3.6.1.3 Bloc Diagram

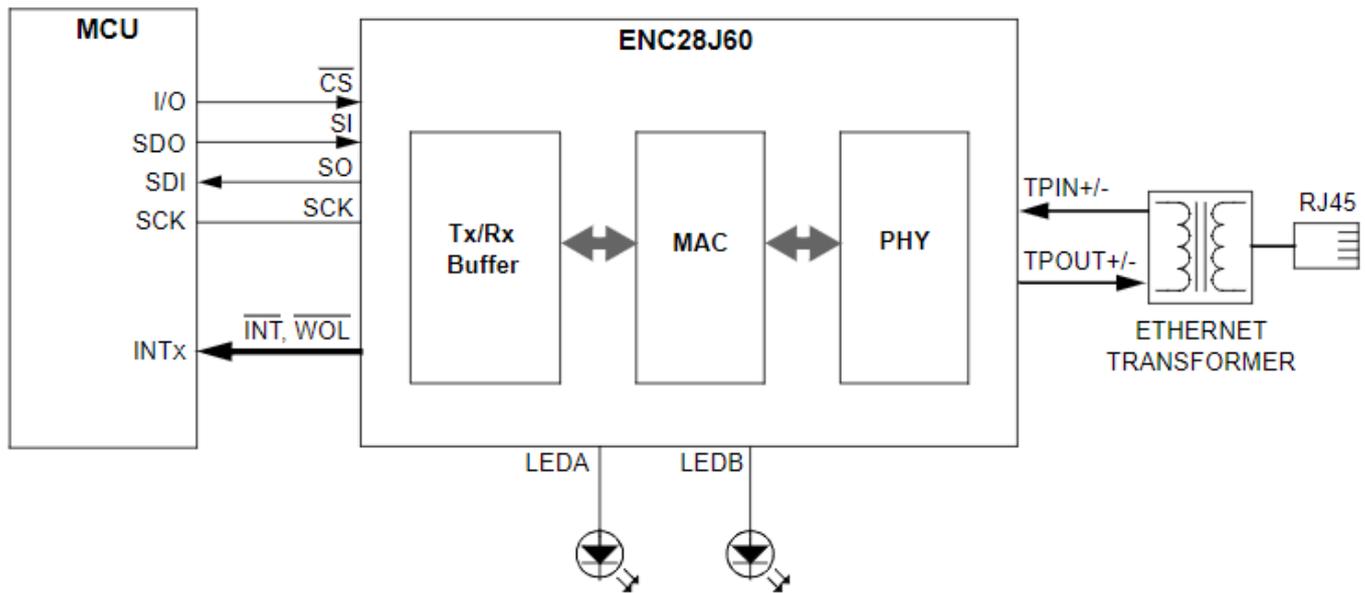


Figure 3.11: Bloc diagram ENC28J60

3.6.1.4 Principe de fonctionnement du module ethernet ENC28J60

- Le module ENC28J60 utilise un contrôleur Ethernet intégré pour permettre aux systèmes embarqués de se connecter à Internet.
- Le contrôleur Ethernet utilise une interface SPI pour communiquer avec le système embarqué. Le système embarqué peut envoyer et recevoir des données à travers le module ENC28J60, ce qui permet une communication réseau fiable et rapide.
- Le module ENC28J60 peut être utilisé pour la communication de différents types de protocoles de réseau, tels que TCP, UDP et ICMP. Cela permet aux systèmes embarqués de communiquer avec d'autres dispositifs réseau tels que des ordinateurs, des serveurs et des périphériques IoT.
- Lorsqu'un système embarqué envoie une requête à travers le module ENC28J60, le contrôleur Ethernet intégré formate la requête selon le protocole de réseau choisi et l'envoie à travers le réseau.
- Lorsqu'une réponse est reçue, le contrôleur Ethernet déformante les données reçues et les transmet au système embarqué.

3.6.2 LM7805

3.6.2.1 Description

Un régulateur de tension (fig3.12) qui produit +5 volts. Comme la plupart des autres régulateurs sur le marché, il s'agit d'un circuit intégré (IC) à trois broches :

- une broche d'entrée pour accepter la tension continue (DC) entrante,
- une broche de masse pour établir la référence de terre pour le régulateur,
- et une broche de sortie qui fournit les 5 volts positifs.

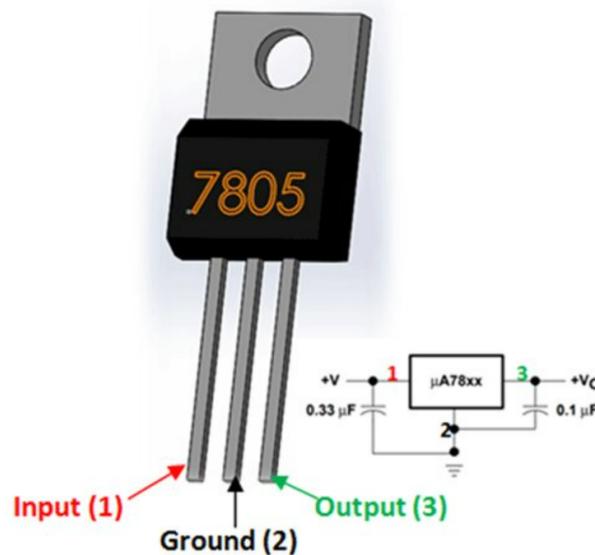


Figure 3.12: LM7805

3.6.2.2 Spécification

- Régulateurs à 3 bornes.
- Courant de sortie jusqu'à 1,5A.
- Protection interne contre les surcharges thermiques.
- Capacité de dissipation de puissance élevée.
- Limitation interne du courant de court-circuit.
- Compensation de la zone de sécurité du transistor de sortie.

3.6.2.3 Bloc Diagram

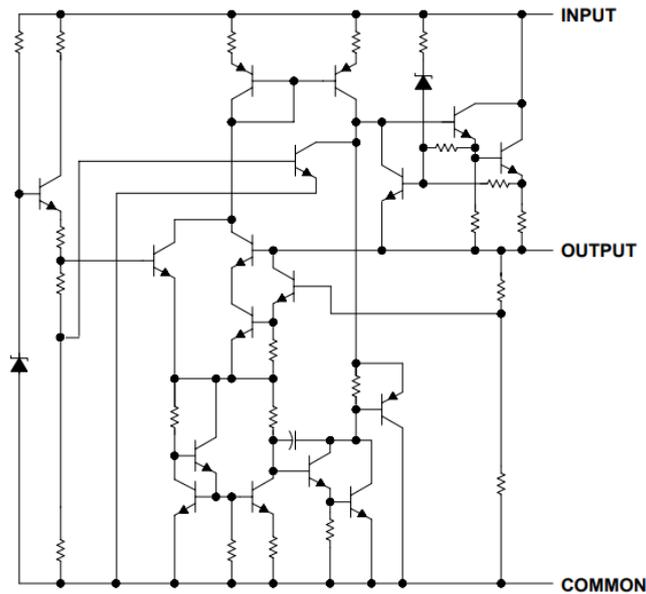


Figure 3.13: Bloc diagram LM28J60

3.6.3 Module ST7540

3.6.3.1 Description

- Le ST7540 (fig3.14) est un modem FSK synchrone/asynchrone semi-duplex conçu pour les applications de réseau de communication par lignes électriques.
- Il fonctionne à partir d'une seule tension d'alimentation et intègre un pilote de ligne et deux linéaires régulateurs pour 5V et 3,3V.
- Le fonctionnement de l'appareil est contrôlé au moyen d'un registre interne, programmable via l'interface série synchrone. Fonctions supplémentaires comme chien de garde, horloge Sortie, contrôle de la tension et du courant de sortie, détection du préambule, délai d'attente et le bracelet utilisé est inclus.
- Réalisé en technologie Multi power BCD5 qui permet d'intégrer des structures DMOS, Bipolaires et CMOS dans la même puce .



Figure 3.14: ST7540

3.6.3.2 Bloc Diagram

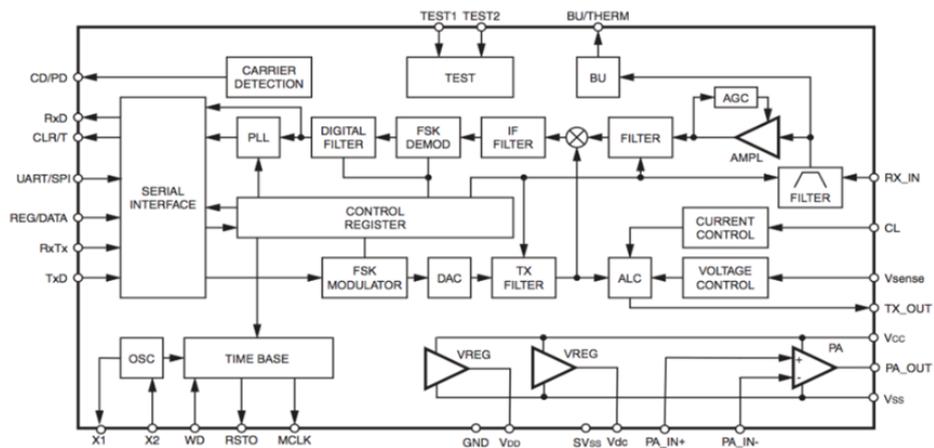


Figure 3.15: Bloc diagram ST7540

Le ST7540 est un appareil multifréquence : huit fréquences porteuses programmables sont disponibles (60, 66, 72, 76, 82,05, 86, 110, 132,5 kHz) et quatre débits en bauds (600, 1200, 2400, 4800).

- Une seule porteuse peut être utilisée un temps. Le canal de communication peut varier pendant le mode de fonctionnement normal pour réaliser une communication multifréquence.
- En sélectionnant la fréquence souhaitée dans le registre de contrôle, les filtres de transmission et de réception sont réglés en conséquence.

Dans notre conception, nous avons utilisé la fréquence porteuse et le taux de bourgeons par défaut :

- Fréquence porteuse = 132,5 KHz.
- Débit en bauds = 2400 bps.

3.6.3.3 Accès Principal ST7540

Le ST7540 peut accéder au secteur de deux manières différentes :

- Accès synchrone.
- Accès asynchrone.

Dans notre conception, nous avons configuré le vaisseau pour qu'il accède au principal de manière asynchrone.

3.6.3.4 En Mode Transmission De Données

La valeur de la ligne de transmission de données (ligne TxD) entre directement dans le modulateur FSK.

3.6.3.5 En mode réception de données

La valeur sur le démodulateur FSK est envoyée directement à la ligne de réception de données (RxD doubler).

3.6.3.6 Interface du processeur hôte

ST7540 échange des données via une interface série. le transfert de données est géré par REG DATA et RxTx Lines, tandis que les données sont échangés via les lignes RxD, TxD et CLR/T. Le ST7540 fonctionne selon quatre modes comme suit :

- Réception de données.
- Transmission de données .
- Lecture du registre de contrôle.
- Écriture du registre de contrôle.

Les lignes REG DATA et RxTx sont des entrées sensibles au niveau. Dans notre conception, nous n'avons pas utilisé le mode de transfert REG DATA car nous étions travailler sur les valeurs et les modes par défaut afin que nous n'en ayons pas du tout besoin .

Le ST7540 propose deux types d'interfaces de communication hôte :

- Interface UART .

— Interface SPI.

3.7 Simulation du systèmes

Pour illustrer et tester les concepts de la PLC, la simulation est une étape cruciale. La simulation d'un système de communication PLC permet de tester et d'optimiser la conception avant de passer à la fabrication.

Plusieurs logiciels de simulation de circuits électroniques, offrent une plateforme puissante pour concevoir, simuler et analyser les systèmes de communication PLC.

En suivant les étapes, nous pouvons créer un modèle fonctionnel de notre système de communication PLC, identifier et résoudre les problèmes potentiels, et nous assurer que le système fonctionne comme prévu.

Ce qui suit décrit les étapes nécessaires pour créer une simulation de communication PLC, en utilisant des composants tels que le module ST7540, et divers filtres.

Cette simulation permet de valider la conception avant la mise en œuvre réelle, assurant ainsi une solution fiable et efficace pour la transmission de données à distance via les lignes électriques.

en raison de la complexité du système , nous avons décidé de simuler chaque partie séparément

3.7.1 Simulation du filtre isolateur

Le filtre isolateur a pour objectif d'atténuer les signaux de fréquences indésirables tout en laissant passer les signaux de fréquences désirables. Dans un premier temps, nous avons conçu le filtre isolateur en définissant ses caractéristiques. Dans notre cas, le filtre a été conçu pour atténuer les signaux de fréquence inférieure à 10 kHz et supérieure à 1 MHz. Par la suite, le fonctionnement de ce filtre a été simulé à l'aide du logiciel LetSpace, comme illustré sur (fig3.16). Les résultats obtenus sont présentés à la fig (3.17).

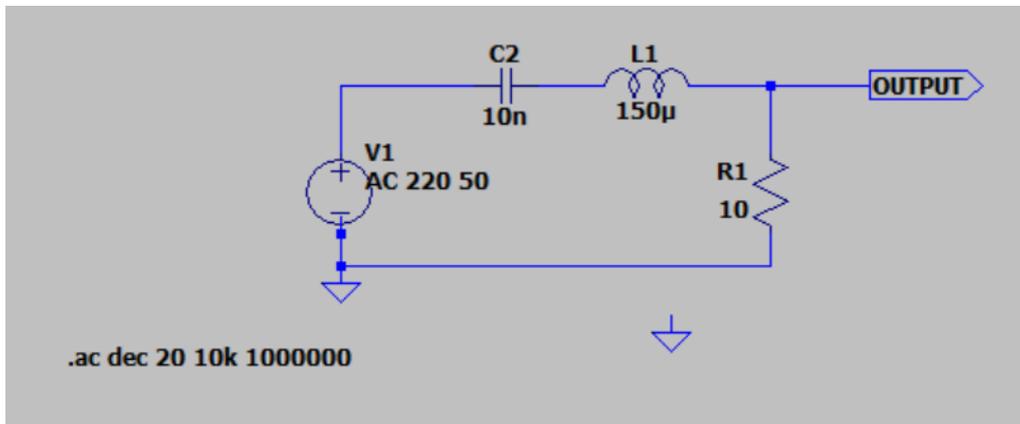


Figure 3.16: Simulation du filtre isolateur

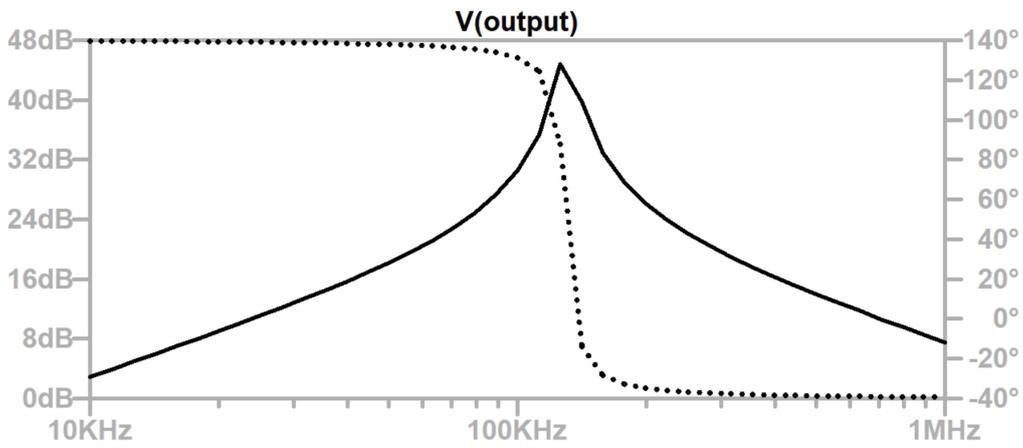


Figure 3.17: Résultat de simulation du filtre isolateur

La figure(3.17)montre la réponse en fréquence du filtre isolateur.

Cette reponse montre le gain et la phase du signal de sortie de ce filtre e en fonction de la fréquence du signal d'entrée.

Le filtre isolateur est conçu pour atténuer les signaux de fréquences indésirables tout en laissant passer les signaux de fréquences désirables.

Le filtre laisse passer les signaux de fréquence comprise entre 10 kHz et 1 MHz avec un gain maximum de 48 dB.

3.7.2 Simulation du filtre passe-bas actif

La figure (3.18) montre la simulation du filtre passe-bas actif à l'aide du logiciel LtSpice .

Les valeurs des résistances et des condensateurs ont été ajustées afin d'atteindre les résultats

escomptés, tout en tenant compte des valeurs désirées et des valeurs disponibles.

Les résultats obtenus sont conformes à nos attentes, comme illustré sur la figure 3.19.

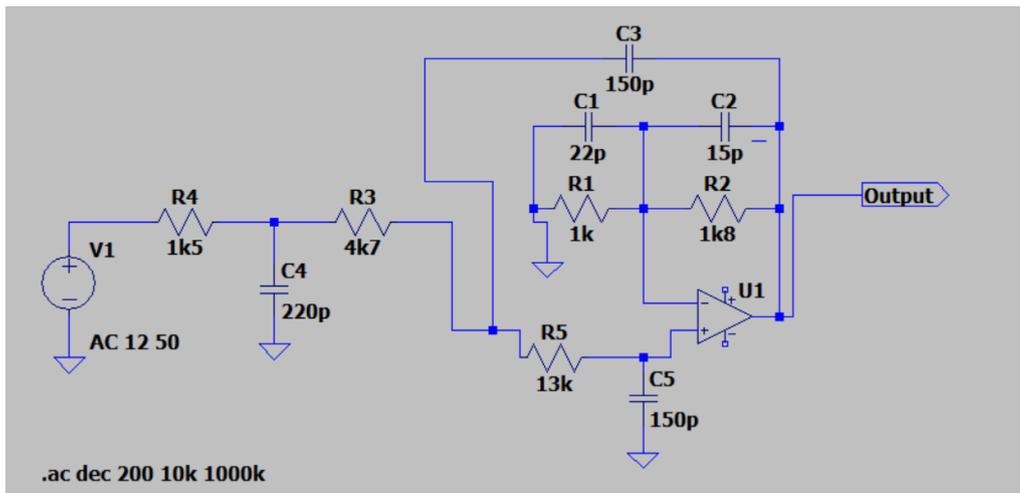


Figure 3.18: Simulation du filtre passe bas

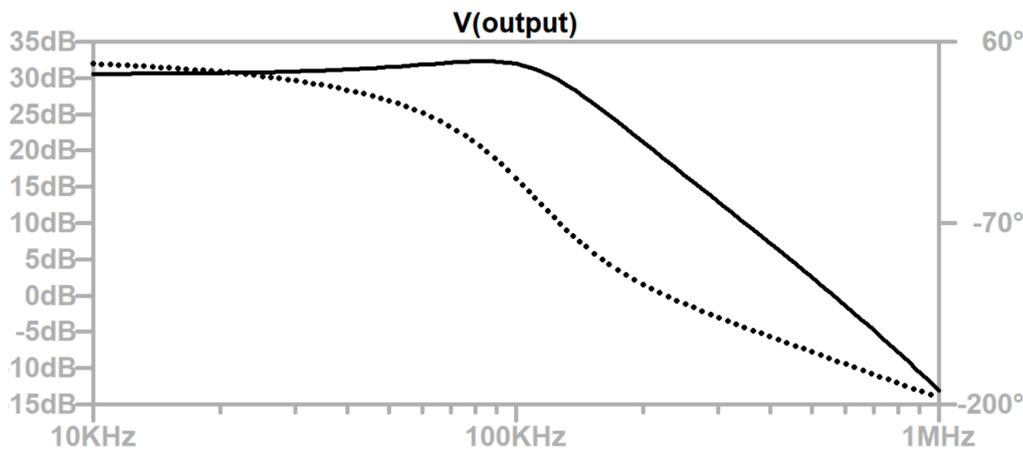


Figure 3.19: Resultat de simulation du filtre pass bas

Analyse de la réponse en amplitude

Bande passante :

- Dans la plage de fréquences allant de 10 kHz à environ 132.5 kHz, le filtre présente une atténuation minimale, maintenant un gain proche de 30 dB.
- Cela indique que les signaux dans cette plage de fréquences passent presque sans atténuation, ce qui correspond à la bande passante du filtre.

Fréquence de coupure :

- Aux environs de 132.5 kHz, on observe le début de la diminution du gain. C'est la fréquence de coupure approximative du filtre, où le gain commence à décroître rapidement.

- À la fréquence de coupure, le gain chute à environ 3 dB en dessous du gain maximal (30 dB), ce qui serait autour de 27 dB.

Atténuation :

- Au-delà de 132.5 kHz, le gain diminue de manière plus marquée. À 1 MHz, le gain est descendu à environ -10 dB, indiquant une atténuation significative des fréquences au-delà de la bande passante.

Les résultats montrent que le filtre passe-bas est efficace pour laisser passer les fréquences inférieures à environ 132.5 kHz avec un gain stable, tout en atténuant les fréquences au-delà de cette plage.

Le comportement global du filtre est conforme aux attentes théoriques pour un filtre passe-bas, avec une transition claire à la fréquence de coupure et une atténuation progressive des fréquences plus élevées.

3.7.3 Simulation du filtre passe-bande passif

Nous avons également simulé le filtre passe-bande passif sur le programme LtSpace (fig3.20) et ajusté les valeurs des résistances et des condensateurs, en tenant compte des résultats que nous souhaitions obtenir ainsi que des valeurs existantes, comme nous l’avons fait avec le filtre passe-bas actif.

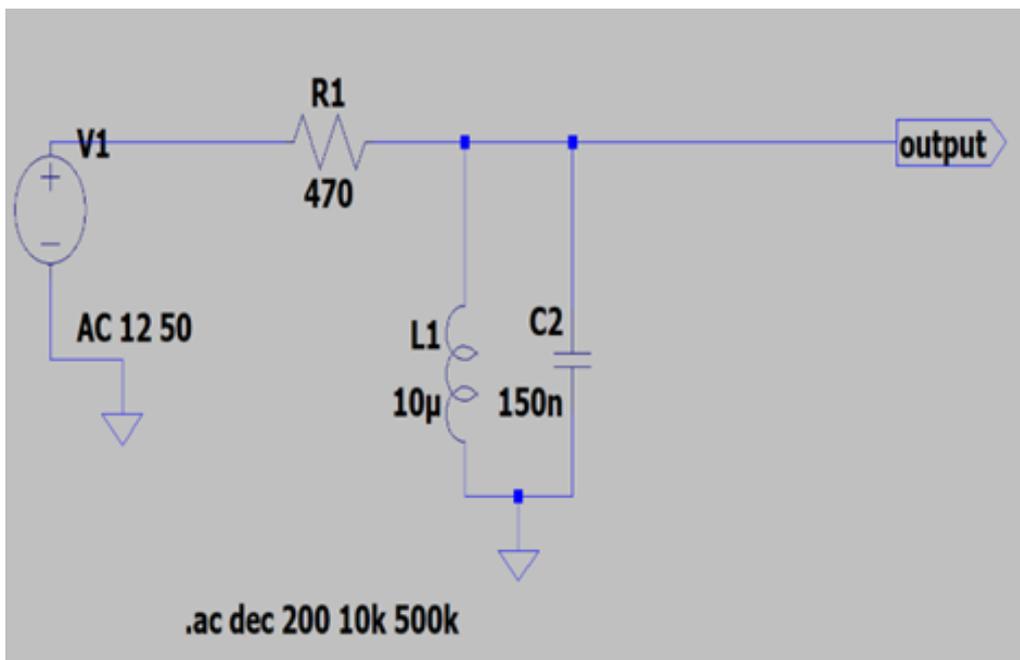


Figure 3.20: Simulation du filtre passe bande

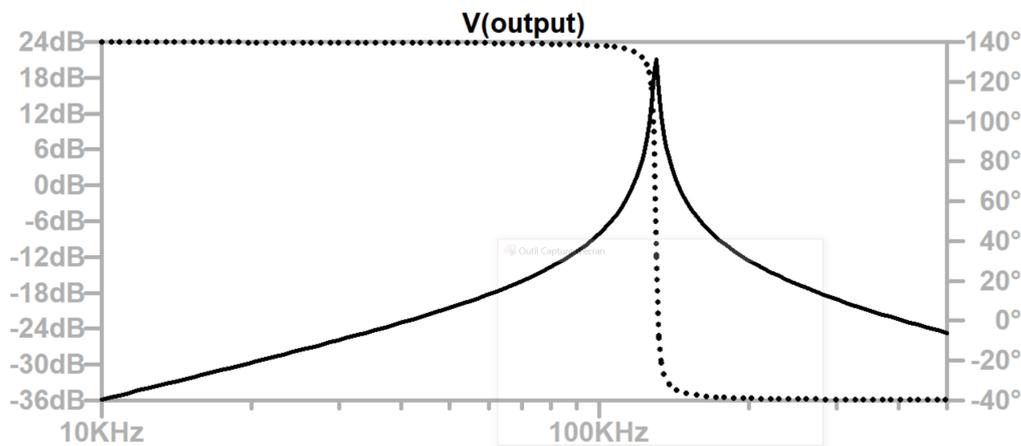


Figure 3.21: Résultat de simulation du filtre pass bande

la figure (3.20) représente la réponse en fréquence du filtre passe-bande.

- Le pic à environ 132.5 kHz indique la fréquence centrale du filtre passe-bande, où le gain est maximal.
- À cette fréquence, le filtre amplifie fortement le signal d'entrée.
- En dehors de cette plage de fréquences, le gain diminue rapidement, ce qui signifie que les fréquences plus basses et plus hautes que la plage centrale sont atténuées.
- La phase montre le décalage de phase du signal en fonction de la fréquence.
- Le changement abrupt de phase à la fréquence centrale indique une transition de phase rapide, ce qui est typique pour les filtres passe-bande.
- La phase reste relativement stable en dehors de la plage de résonance, ce qui est une caractéristique courante des filtres passe-bande.

3.8 Parties Commun Émission/ Réception

Les schémas de simulation (fig 3.27) et (fig 3.29) présentent un circuit émetteur et un circuit de réception, chacun étant divisé en plusieurs sections fonctionnelles distinctes, jouant un rôle précis dans le traitement, l'émission et la réception des signaux.

1. **Régulateur de tension** : utilise le régulateur 7805 (U2), accompagné des condensateurs C15 et C16, pour abaisser et stabiliser la tension d'entrée, fournissant ainsi une alimentation constante de 5V (VCC) aux autres parties du circuit.

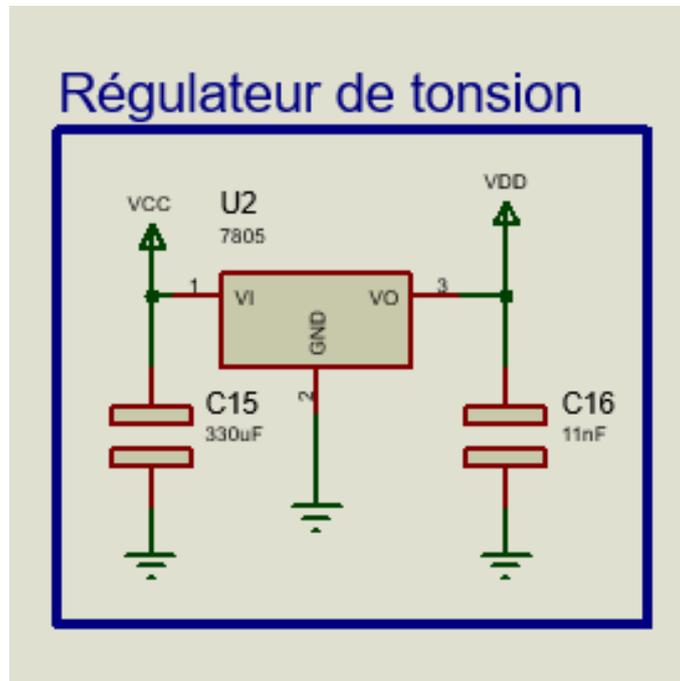


Figure 3.22: Régulateur de tension

2. **Filtre passe-bas actif** : composé de composants tels que C9, R8, R9, R4, R6, R5, R7, C7, C8, et C5 , élimine les fréquences indésirables au-dessus d'un certain seuil, nettoyant ainsi le signal avant sa transmission.

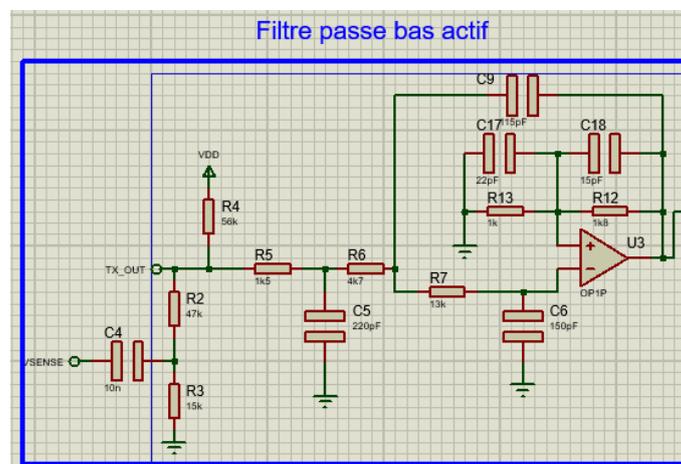


Figure 3.23: Filtre passe-bas actif

3. **Filtre isolateur** : inclut C3, TR1 (transformateur), J1, L3 et C10, et a pour rôle d'isoler électriquement le circuit de l'alimentation réseau (220V, 50Hz), prévenant les interférences et protégeant contre les surtensions.

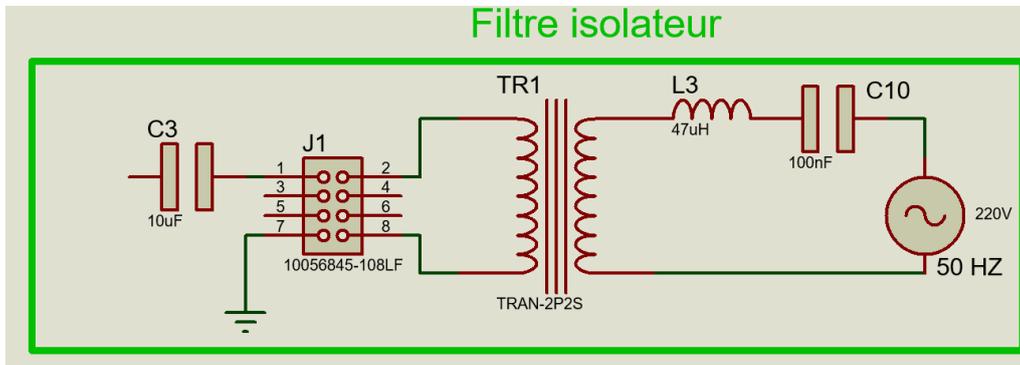


Figure 3.24: Filtre isolateur

4. **Filtre passe-bande passif** : constitué de C1, L1, D1, D2, R1 et C2 , laisse passer une bande de fréquences spécifique tout en rejetant les autres, ciblant ainsi les fréquences d'intérêt et réduisant le bruit hors bande.

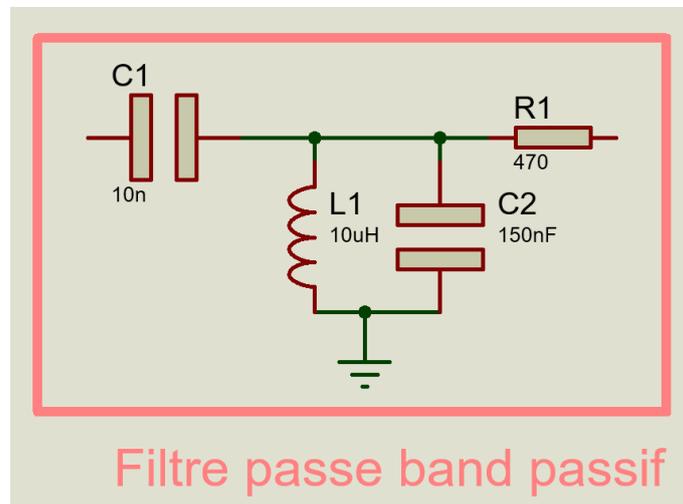


Figure 3.25: Filtre passe-bande passif

3.9 Partie emission

Modulation/Démodulation : centrée autour du module U1 et du cristal X1, ainsi que divers résistances et condensateurs (R10, C12, C11, C13, C14, etc.). Cette section module le signal d'entrée pour préparer l'émission des données via l'interface UART. Les commutateurs DIP (DIPSW1) permettent de configurer le fonctionnement du circuit, comme sélectionner des fréquences ou des modes de modulation spécifiques (fig3.26).

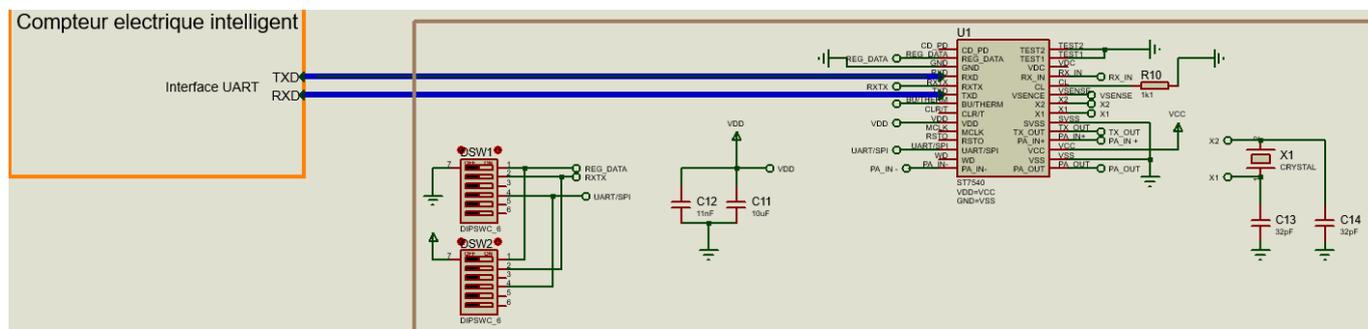


Figure 3.26: Modulation/Démodulation

L'interface avec le compteur électrique intelligent : est essentielle pour assurer la communication bidirectionnelle entre le compteur et le circuit de modulation/démodulation. Les lignes TXD et RXD de l'interface UART transmettent et reçoivent les données respectivement, permettant une interaction efficace avec le compteur.

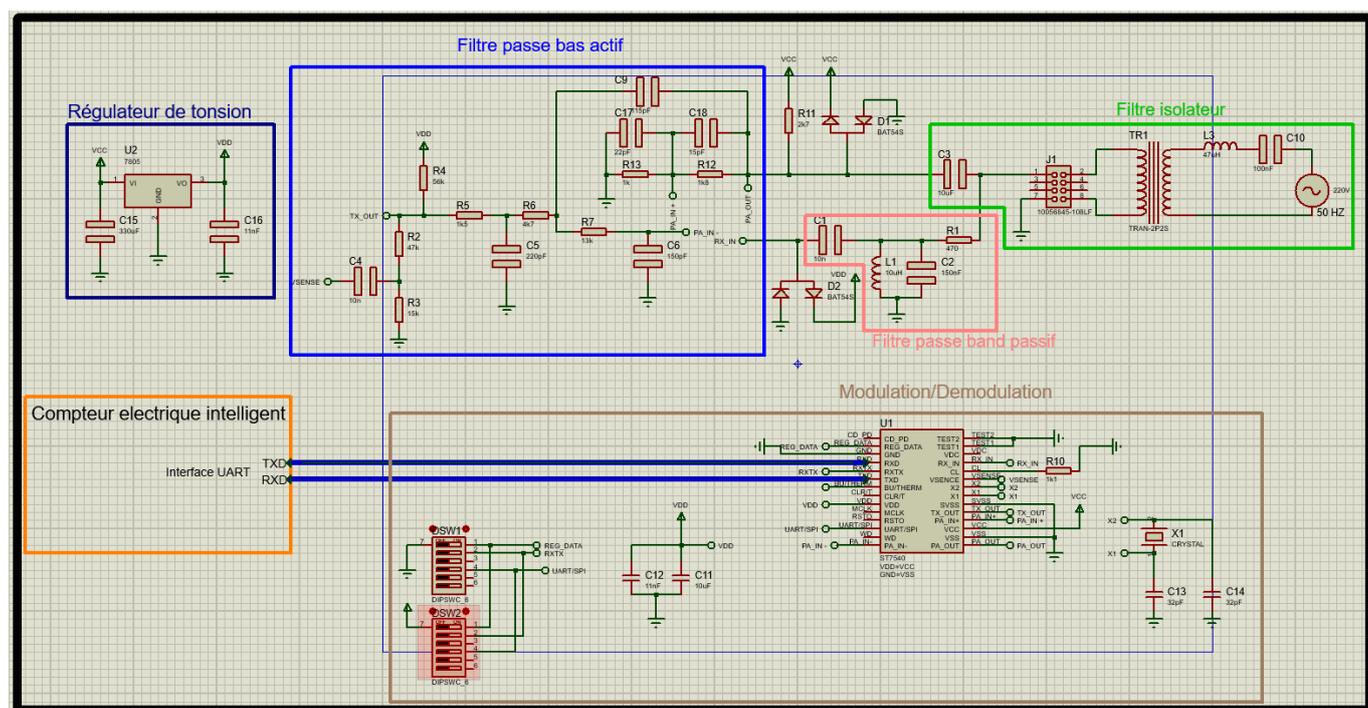


Figure 3.27: Circuit de la partie émettrice

Dans le tableau (tab.1)ci-dessous, regroupe tous les composants électroniques utilisés dans la conception de la partie emettrice

3.10 Partie réception

Modulation/Démodulation : intègre des composants clés comme U1, U3, X1 (cristal), et divers résistances et condensateurs (R10, R22, C12, C13, C14, C20, etc.). Elle reçoit le signal filtré, effectue la démodulation pour extraire les données utiles et les traite pour une utilisation ultérieure. Les commutateurs DIP (DIPSW1, DIPSW2) permettent de configurer le circuit pour différentes fréquences ou modes de modulation.

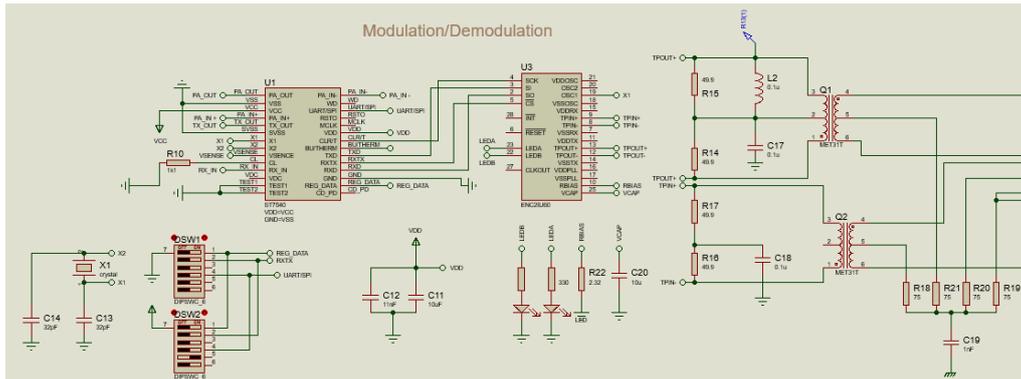


Figure 3.28: Modulation/Démodulation

Sortie vers le serveur : avec RJ1 et plusieurs résistances (R18, R19, R20, R21) et un condensateur (C19), constitue l'interface de sortie du circuit. C'est là que les données démodulées et traitées sont envoyées vers un serveur ou un autre dispositif de traitement des données. La simulation de ce circuit de réception implique de configurer les sources d'alimentation, d'appliquer un signal d'entrée, d'effectuer des analyses temporelles et fréquentielles, et de valider les configurations pour s'assurer du bon fonctionnement du circuit.

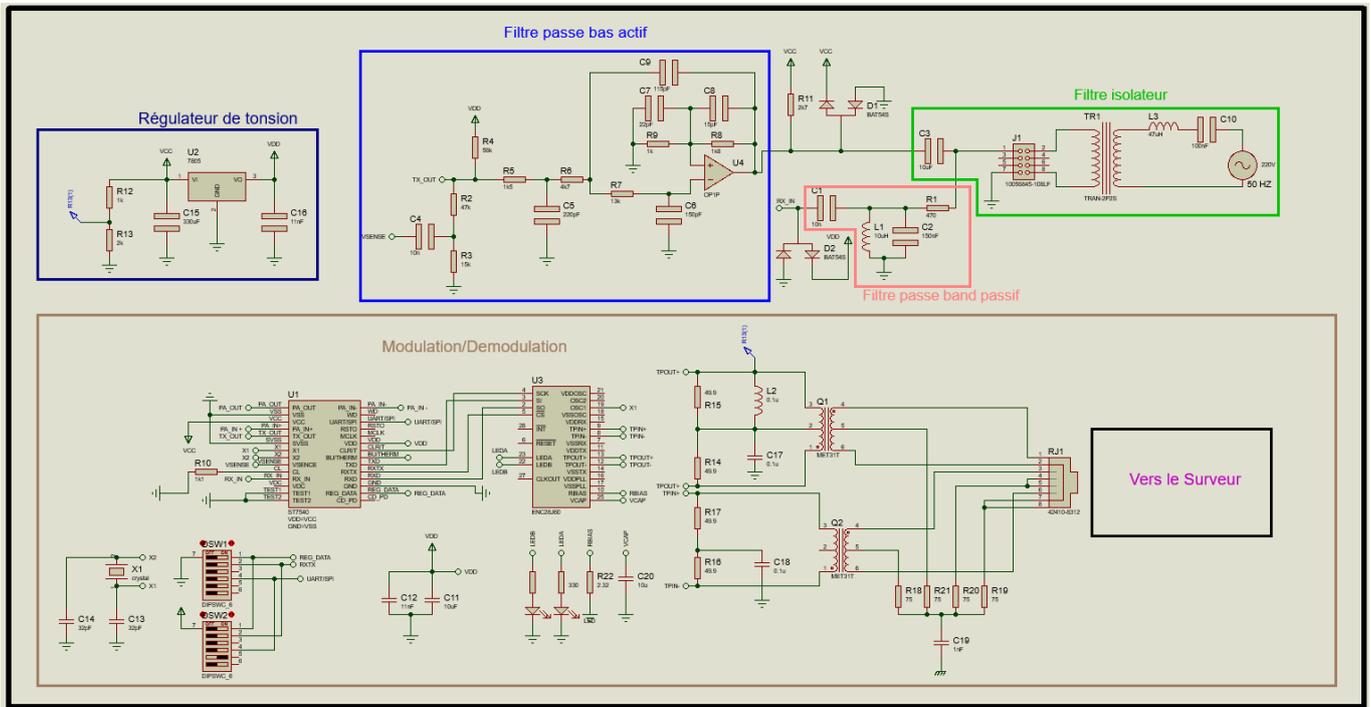


Figure 3.29: Circuit de la partie réceptrice

3.11 Problèmes et Défis

Au cours du développement de notre projet, nous avons rencontré plusieurs défis qui nous ont empêchés de pouvoir simuler de manière complète et précise le circuit complet du système.

La complexité du circuit est l'une des principales raisons pour lesquelles il a été difficile de le simuler avec précision à l'aide des outils et logiciels dont nous disposons.

La nature complexe et en plusieurs parties du projet exigeait un niveau élevé de détail et de précision dans la simulation, qui n'était pas entièrement disponible en raison des limites des outils utilisés.

De plus, l'indisponibilité de la bibliothèque de composants ST7540 dans le logiciel de simulation utilisé constituait un obstacle majeur à la réalisation d'une simulation précise et complète du système.

Le ST7540 est un élément vital et essentiel de notre circuit, jouant un rôle majeur dans la fonctionnalité et les performances du système. L'absence de cet élément dans les bibliothèques logicielles empêchait la possibilité de modéliser avec précision tous les aspects du système, ce qui affectait notre capacité à analyser les performances et à garantir la solidité de la conception avant de passer à la mise en œuvre pratique.

D'un autre côté, l'impact de l'absence du composant ST7540 ne s'est pas seulement limité à la phase de simulation, mais s'est également étendu jusqu'à nous empêcher de construire le système dans la réalité. Le manque de disponibilité du composant sur le marché nous a empêché de pouvoir assembler physiquement le circuit et le tester en conditions réelles.

Cette limitation pratique limite notre capacité à évaluer les performances réelles du système et à vérifier qu'il atteint ses objectifs prévus.

Malgré ces défis, nous avons concentré nos efforts sur le développement et l'amélioration d'autres parties du projet qui étaient à notre disposition.

Nous avons optimisé nos conceptions, veillé à ce qu'elles répondent aux normes requises et les avons préparées pour les tests dès que le ST7540 était disponible.

Nous avons également préparé des plans détaillés pour mettre en œuvre et tester le système une fois ces obstacles surmontés, garantissant ainsi notre préparation à mener à bien le projet et à atteindre ses objectifs lorsque les conditions appropriées seront en place.

À l'avenir, nous travaillerons à la conception du système et à son développement ultérieur. Nous avons une vision claire de nos prochaines étapes lorsque le ST7540 sera disponible. Nous continuerons à améliorer les conceptions existantes et à effectuer les tests nécessaires pour garantir que le système fonctionne efficacement dans la pratique.

3.12 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exploré diverses méthodes et outils de simulation pour optimiser les composants du système, tels que les filtres isolateurs, les filtres passe-bas actifs et les filtres passe-bande passifs.

Chaque simulation a été réalisée en tenant compte des valeurs souhaitées et disponibles pour les composants, et les résultats obtenus ont été conformes à nos attentes.

En particulier, la simulation du filtre passe-bas actif a montré que nous pouvions ajuster les résistances et les condensateurs pour atteindre les valeurs souhaitées, et celle du filtre passe-bande passif a permis de confirmer les fréquences de coupure et les amplitudes nécessaires.

Les résultats de ces simulations sont essentiels pour assurer la performance et la fiabilité du système

de communication CPL.

Conclusion Générale

En résumé, ce manuscrit a exploré le développement des compteurs électriques, en mettant particulièrement en lumière l'émergence des compteurs intelligents et leur impact sur la gestion de l'énergie.

À travers une analyse approfondie de la technologie CPL (Communication par Courants Porteurs en Ligne) et de l'implémentation du ST7540, cette étude a démontré comment les innovations technologiques peuvent transformer les infrastructures existantes pour une gestion de l'énergie plus efficace et transparente.

Les principaux résultats de ce projet incluent la simulation d'un système de communication utilisant la technologie CPL.

Ce système repose sur l'utilisation de compteurs électriques intelligents connectés à un serveur central via divers protocoles et composants matériels, facilitant ainsi une transmission efficace des données énergétiques. Les données sont envoyées du compteur à un modem CPL, puis transmises via les lignes électriques, reçues par un autre modem, et converties en signaux SPI pour être transférées au serveur central sous forme de paquets de données Ethernet.

Le processus de simulation et d'évaluation des composants du système s'est conclu avec succès. Les simulations des filtres d'isolement ainsi que des filtres passe-bas actifs et passifs ont confirmé leur efficacité attendue, démontrant la capacité à ajuster les résistances et condensateurs pour garantir des performances optimales et une fiabilité accrue.

L'importance de ce travail réside dans sa contribution significative à l'amélioration des systèmes de communication par lignes électriques, offrant une base solide pour l'application de technologies CPL avancées et fiables. En réussissant à simuler un système de communication sur des lignes électriques qui atteint ses objectifs prévus, ce projet garantit l'efficacité et la fiabilité du système conçu.

Pour l'avenir, il est recommandé de poursuivre les recherches afin d'améliorer les technologies CPL et de développer des solutions plus avancées et sécurisées pour les communications de données

électriques. Une intégration accrue avec d'autres technologies de gestion de l'énergie pourrait également ouvrir de nouvelles perspectives pour l'amélioration continue du réseau électrique.

En conclusion, ce projet montre que les compteurs intelligents avec la technologie CPL représentent une avancée majeure vers une gestion énergétique plus intelligente et durable, ouvrant la voie à de futures innovations dans le domaine de l'énergie.

Bibliographie

- [1] A.L.Collard, P.Garin, and M. Montginoul, "Un compteur intelligent pour mesurer les usages de l'eau : l'entrée en scène d'une nouvelle connaissance", Développement durable et territoires, Vol. 10(No 3) , December 2019.
- [2] J. G.Ramos, and al , " Upgrading the power grid functionalities with broadband power line communications : Basis, applications, current trends and challenges", Sensors, Vol . 22(No12) , pp 43-48 ,June 2022.
- [3] W. Akmouche, "Etude et caractérisation des modulations multiporteuses OFDM", thèse de Doctorat, Université de Bretagne Occidentale, , October 2000.
- [4] B. Multon, L'énergie électrique : analyse des ressources et de la production, Journées électrotechniques du club EEA, paris,pp.1-8 , 28-29 janvier 1999
- [5] M. Crussière , " Etude et optimisation de communications à Haut débit sur lignes d'énergie : Exploitation de la combinaison OFDM/CDMA ",Thèse de doctorat , Institut national des sciences appliquées de Rennes, Novembre 2005.
- [6] F.TOLEDO,"Guide international du comptage intelligent", Technique et documentation Lavoisier, Paris,263 p,Mai 2012.
- [7] A.S. Morris," Measurement and instrumentation principles", Butterworth-Heinemann Ltd ,India, 512p,3rd Edition - March 9, 2001.
DOI : <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-5081-6.X5000-0>
- [8] C. Gosset, "Présentation et essai d'un compteur à résistivité pour poissons",Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture, No 303,pp.141–151, August 1986.
DOI : <https://doi.org/10.1051/kmae :1986003>
- [9] A. Djebiri and H. Bakhaled, "Étude et réalisation d'un compteur d'énergie intelligent",Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla, Faculté des Sciences Appliquées, Département de Génie Electrique, Juin 2020.
- [10] M. Zellagui," Comptage et compteurs électrique", Formation : PINC-SDE Promotion 2,2018.
- [11] C. Clastres,"Les réseaux intelligents : régulation, investissement et gestion de la demande électrique", Cahier de recherche LEPII n 39, 28 p,novembre 2010.
- [12] M.A. Mannah," Électronique. Génie électrique", Thèse de doctorat, École doctorale sciences et technologies de l'information et des matériaux (Nantes), 2010.

- [13] H. Yan, " Collaboration des équipements du réseau domestique pour une meilleure efficacité énergétique globale", Thèse de doctorat, Université de Rennes, Decembre 2014.
- [14] L. T. Berger, A. Schwager, and J. E. Garzás, "Power line communications for smart grid applications", *Journal of Electrical and Computer Engineering*, Vol .2013(No1), March 2013. DOI : 10.1155/2013/712376
- [15] K. Boulbazine, L. Mebarki, " Phénomènes indésirables des cables électriques", Mémoire de master, Université 8Mai 1945 -Guelma, Juin 2012.
- [16] D. Y. Guang, "Modélisation et Contrôle Opérationnel Avancés de Procédé de Traitement des Eaux Usées : Applications des Réseaux Neuronaux Artificiels", These de doctorat, Institut National de la Recherche Scientifique (Quebec), Avril 1999.
- [17] M. Boughezala, " Etude et simulation d'un coupleur de signaux HF pour réseaux d'énergie électrique. Application : sélectivité logique des protections", These de magister, Université Mohamed Khider Biskra, 2013.
- [18] M. Zimmerman and K. Dostert, " A multi-path model for the power line channel", *IEEE Transaction on Communications*, Vol .50(No 4), pp.553-559, April 2002.
- [19] W. El Sayed, and al, " Deterministic vs. random modulated interference on g3 power line communication", *Energies*, No 14(11), June 2021. DOI : <https://doi.org/10.3390/en14113257>
- [20] O. Bilal, E. Liu, Y. Gao, and T. O. Korhonen, "Design of broadband coupling circuits for powerline communication", *7th International Symposium on Power Line Communications (ISPLC) Proceedings*, April 2004.
- [21] E. Duris, " Nouvelles technologies réseaux : Les courants porteurs en ligne", Cours pour la filière Informatique Réseaux à l'Ecole Supérieure d'ingénieurs Paris-Est Marne-la-Vallée, Février 2005.
- [22] Y. H. Ma, P. L. So, and E. Gunawan, "Performance analysis of ofdm systems for broadband power line communications under impulsive noise and multipath effects", *IEEE Transactions on Power Delivery*, No 20(Vol .2), pp.674-682, April 2005.
- [23] L. Lutz and L. T. Berger. " Power line communications", In *Academic Press Library in Mobile and Wireless Communications*, Chapter 16, pp. 621-659. August 2016. DOI : 10.1016/B978-0-12-398281-0.00016-8

Annexe A

.1 Tableau des composants électroniques de la partie émettrice

Catégorie	Composant	Valeur
Résistances	R1	470 ω
	R2	47k ω
	R3	15k ω
	R4	47k ω
	R5	1.5k ω
	R6	47 ω
	R7	1.5k ω
	R8	1.8k ω
	R9	1k ω
	R10	1.1k ω
	R11	2.7k ω
Condensateurs	C1	10nF
	C2	150pF
	C3	10 uF
	C4	10nF
	C5	220pF
	C6	150pF
	C7	22pF
	C8	15pF
	C9	119pF
	C10	100nF
	C11	10uF
	C12	11nF
	C13	32pF
	C14	32pF
	C15	330uF
Inductances	L1	50uH
	L3	47uH

Tableau .1: Tableau des composants électroniques de la partie émettrice

.2 Tableau des composants électroniques de la partie réception :

Catégorie	Composant	Valeur
Résistances	R1	47 Ω
	R2	47k Ω
	R3	1k Ω
	R4	1k Ω
	R5	15k Ω
	R6	1k Ω
	R7	1k Ω
	R8	1k Ω
	R9	1k Ω
	R10	1k Ω
	R11	2.7k Ω
	R12	1k Ω
	R13	2k Ω
	R14	49.9 Ω
	R15	49.9 Ω
	R16	49.9 Ω
	R17	49.9 Ω
	R18	75 Ω
	R19	75 Ω
	R20	75 Ω
	R21	75 Ω
	R22	2.32 Ω
Condensateurs	C1	1uF
	C2	150pF
	C3	10uF
	C4	10nF
	C5	27pF
	C6	10pF
	C7	22pF
	C8	22pF
	C9	115pF
	C10	10nF
	C11	10uF
	C12	11uF
	C13	32pF
	C14	32pF
	C15	330uF
	C16	11uF
	C17	1uF
	C18	1uF
	C19	1nF
	C20	10uF
Inductances	L1	1mH
	L2	1uH
	L3	470uH

Tableau .2: Tableau des composants électroniques de la partie réception