

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



# Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

M<sup>lle</sup> HAFSAOUI Ghania

&

M<sup>lle</sup> SERIR Akila

Pour l'obtention du diplôme de Master en Électronique  
spécialité Réseaux et télécommunications

---

Thème

---

## Etude bibliographique de modélisation de la technologie Courant Porteur en Ligne (CPL)

---

Proposé par : Mme. AMIROUCHE Nesrine

Année universitaire 2012-2013



## Remerciements

---

- ✚ *Avant tout nous tenons à remercier le bon Dieu qui nous a incité à acquérir le savoir.*
- ✚ *A travers ce modeste travail, nous tenons à remercier vivement notre promotrice Mme Amirouche Nesrine pour l'intéressante documentation qu'il a mise à notre disposition, pour ses conseils précieux et pour toutes les commodités et aisances qu'il nous apportées durant notre étude et réalisation de ce projet.*
- ✚ *Nous exprimons également notre gratitude à tous les professeurs et enseignants qui ont collaboré à notre formation depuis notre premier cycle d'étude jusqu'à la fin de notre cycle universitaire.*
- ✚ *Sans omettre bien sur de remercier profondément tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à réalisation du présent travail.*

✚ *Au terme de ce travail, nous voudrions adresser nos vifs remerciements à nos chers parents pour leurs sacrifices, aides, soutiens et encouragements durant notre cursus d'étude.*

✚ *Nous dédions ce modeste travail :*

✚ *A nos frères et nos sœurs ainsi que tous les membres des familles*

*HAFSAOUI et SERIR,*

✚ *KASSOUS et KHODJA*

✚ *A tous nos amis de la promo.*

---

## ملخص:

مع تطورات واسعة من تقنيات DSL والألياف البصرية، مشغلي الاتصالات قادرين على تقديم الخدمات والتطبيقات في الوقت الحقيقي مثل الإنترنت عالي السرعة، والتلفزيون الرقمي عالي الوضوح، الفيديو عند الطلب أو الاتصال عبر بروتوكول الإنترنت. في الشبكة المنزلية، تكنولوجيا PLC (باورلاين) لنقل البيانات عالية السرعة على الشبكة من المستخدم السكنية أو الصناعية دون تعديل التثبيت الموجود. مع تزايد المعدلات التي توفرها تكنولوجيا النفاذ، فقد أصبح من الضروري زيادة قدرة وصلات CPL. وقد أظهرت الدراسات أنه من أجل تحقيق هذا الهدف، كان من الضروري زيادة في تردد CPL. ومع ذلك، فإن الكابلات ليست مناسبة لنقل الإشارات عالية التردد ويمكن أن تشع. هذا الإشعاع يمكن أن يسبب التداخل الكهرومغناطيسي مع أنظمة الاتصالات الأخرى الموجودة في المنطقة المجاورة. هذه الرسالة هي الموجهة أساساً إلى استعراض أدبيات تكنولوجيا النمذجة باورلاين الاتصالات (PLC).

## كلمات المفاتيح:

CPL, PLC.

---

## Résumé :

Avec le développement considérable des technologies d'accès DSL et fibre optique, les opérateurs de télécommunications sont capables de proposer des services et applications temps réel tels que : l'Internet haut débit, la télévision numérique haute définition, la vidéo à la demande ou la téléphonie sur IP. Dans le réseau domestique, la technologie CPL (courant porteur en ligne) permet de transférer des données haut débit sur le réseau électrique de l'utilisateur résidentiel ou industriel sans une modification de l'installation existante. Avec l'augmentation des débits offerts par les technologies d'accès, il est devenu nécessaire d'augmenter la capacité des liens CPL. Des études ont montré que pour remplir cet objectif, une augmentation de la bande de fréquence CPL était nécessaire. Cependant, les câbles électriques ne sont pas adaptés à la transmission de signaux hautes fréquences et peuvent rayonner. Ces rayonnements peuvent engendrer des perturbations électromagnétiques pour les autres systèmes de communication présents dans le voisinage.

Cette thèse est principalement orienté pour l'étude bibliographique de la modélisation de la technologie courant porteur en ligne(CPL).

**Mots clés :** CPL, PLC

---

## Abstract :

With the extensive development of DSL and fiber optic technologies, telecom operators are able to offer services and real-time applications such as high-speed Internet, high definition digital television, video on demand or IP telephony. In the home network, the PLC technology (powerline) to transfer high-speed data on the

---

---

grid of residential or industrial user without modifying the existing installation. With increasing rates offered by access technologies, it has become necessary to increase the capacity of links CPL. Studies have shown that to achieve this goal, an increase in the frequency band CPL was necessary. However, the cables are not suitable for the transmission of high frequency signals and can radiate. This radiation can cause electromagnetic interference with other communication systems present in the vicinity.

This thesis is mainly oriented to the literature review of modeling technology powerline communication (PLC).

**Keywords: CPL, PLC**

---



## Introduction général:

Les systèmes de transmission sur ligne d'énergie souffrent encore de limitations pour égaler en terme de performances les systèmes de communications sur supports dédiés (câble, fibre, radio). Ces limitations viennent du fait que le canal qui a été optimisé pour le transport du courant électrique à 50 Hz n'est pas adapté aux besoins de la transmission haut débit.

De même, les techniques de transmission utilisées pour la mise en œuvre des systèmes CPL ne tiennent pas compte de toutes les caractéristiques du canal.

L'idée de courant porteur en ligne paraît à première vue incroyable, car il s'agit tout simplement d'acheminer des données numériques via le réseau électrique. Chaque prise électrique dans un bâtiment devient alors un accès potentiel au réseau internet haut débit.

Le courant porteur en ligne (CPL) permet la transmission des données numériques et vocales, par les câbles électriques, et offre ainsi des services de bande large (sur une bande de fréquence de 1 à 30 Mhz), en utilisant les infrastructures existantes. Encore peu connue, cette technologie est pourtant utilisée depuis des dizaines d'années par EDF (Électricité de France) pour gérer le basculement des compteurs électriques des tarifs de jour vers les tarifs de nuit. Le fonctionnement des CPL est relativement simple et consiste à superposer au signal électrique classique, d'une fréquence de 50 Hz, un signal à haute fréquence (1-30 Mhz) contenant des informations numériques qui pourront ensuite être décodées à distance. Il fonctionne à trois niveaux : hautes, moyennes et basses tensions. Les hautes tensions concernent le transport. Les moyennes et basses tensions servent aux boucles locales et aux réseaux domestiques. Ainsi, le CPL concerne tout autant les services de transmission à distance que les réseaux internes aux habitats ou aux entreprises.

Après avoir raccordé un dispositif maître, sorte de point d'accès partagé, sur un transformateur à basse tension (150 à 250 utilisateurs), il suffit de brancher un modem spécifique sur n'importe quelle prise électrique pour pouvoir accéder au réseau haut débit. Les débits proposés sont performants, puisque des offres à 4, 5, 10 voir 45 Mbit/s sont déjà disponibles et les 100Mbit/s seront accessibles en Europe. [1]

Cette technologie utilise le réseau électrique (220 V (pour le BT)) pour transmettre des messages clés. Les signaux transmis par courant porteur sont superposés (ajoutés) au courant d'alimentation de secteur. Étant donné qu'il ne requiert pas l'installation d'un système de câblage de BUS spécifique pour permettre la communication entre les appareils, le système de communication par courant porteur en ligne offre une méthode pratique, simple et rapide pour créer des systèmes domotiques dans les habitations. [2]

Le premier avantage de cette technologie est de recourir à un réseau déployé sur tous les territoires et apte à atteindre tous les consommateurs où qu'ils soient, en utilisant des infrastructures déjà mises en place. [1]

## CHAPITRE 1 : HISTORIQUE

### 1.1 Introduction:

C'est une technologie qui existe depuis longtemps, mais qui n'est utilisée qu'à bas débit pour des applications permettant de piloter à distance des appareils électriques comme les éclairages publics par exemple. Une telle utilisation de CPL est fréquente dans les années 1950. On utilisait alors les fréquences 10 Hz avec une puissance de 10 KW.

### 1.2 Historique de la technologie CPL:

Au milieu des années 1980, des recherches ont été effectuées dans le but d'utiliser le réseau électrique comme un support pour transport de données. La bande de fréquence utilisée est alors élargie (5 à 500 KHz). Les transmissions sont faites de manière unidirectionnelle.

En 1997 les premiers tests de transmission de signaux de données sur réseau électrique en bidirectionnel sont effectués.

En Mars 2000, une alliance est passée entre une dizaine de grands groupes industriels notamment ceux représentant les producteurs d'électricité afin de mettre en place des dispositifs spécifiques pour le CPL. Parmi ces groupes industriels on retrouve EDF, France Télécom, Motorola, Sony,.... De cette alliance née une spécification le Home Plug 1.0 en juin 2001.

L'an 2000 voit aussi la création de l'association PLC (Power Line Carrier) Forum dont le but est de promouvoir le CPL en Europe. Une association similaire, PLCA (Power Line Communication Association), est créée en 2001 pour la promotion du CPL en Amérique du Nord.

De nombreux tests ont été effectués en grandeur nature à Fribourg (Suisse) en 2001 sous le contrôle de l'OFCOM (Office Fédéral de la Communication).

Un autre test de grande envergure est lancé à Saragosse (Espagne) en 2002 sur plus de 30 immeubles.

En France, EDF n'est pas autorisé à faire un travail de fournisseur réseau de manière directe. Il a donc créé une filiale Edev CPL en Mai 2003 pour exploiter cette technologie.

1<sup>er</sup> Janvier 2004, la commission Européenne lance le projet Opera (Open PLC European Research Alliance) sur 4 ans et un budget de 20 millions d'Euros (9M de la part de l'union européenne) dans le but de proposer une norme à la fin de l'année 2004 puis d'effectuer des tests.

2005 , arrivée sur le marché des produits à la norme Home plug 1.1 turbo 85 Mbits et encadrement législatif français et européen du CPL (ART) (Agence de régulation des télécommunications).

2007 , arrivée sur le marché des produits à la norme Home plug AV 200 Mbits. Ajout de nouvelles fonctionnalités QoS (Quality of service), VLAN (Vertical Local Area Network)...). L'IEEE (Institute of electrical and Electronics Engineers) prévoit la mise en œuvre d'une norme commune permettant l'interopérabilité des 3 grands systèmes CPL HPP (Harga Pembelian Pemerintah), UPA (Universal Power line Association), CEPCA (Consumers electronics power line communication alliance).

2010 , ratification de la norme IEEE Std (standard) 1901-2010 prévoyant l'utilisation d'adaptateurs CPL domestiques atteignant la vitesse théorique de 500 Mbits.

2012, une alliance G3-PLC fondée par un groupe d'acteurs industriels, parrainés par ERDF (Electricité Réseau Distribution France) promeut un large développement de la technologie G3-PLC notamment au service des Smarter Grids( réseau de distribution d'électricité intelligent )et en tant que technologie simple, peu coûteuse, permettant de fortement diminuer les coûts d'installation et de maintenance (pas de nouveau réseau à installer, c'est le réseau électrique qui prend une fonction supplémentaire).  
[3]

### **1.3 Conclusion:**

Nous avons présenté dans ce premier chapitre, l'historique de la technologie CPL en citant les différentes recherches effectuées ainsi que les créations des associations pour la promotion du CPL dans plusieurs pays. Le chapitre suivant va parler sur la technologie CPL et comment que ça fonctionne.

## Chapitre 2: La technologie courant Porteur en Ligne (CPL)

### 2.1 Introduction:

La technologie des courants porteurs en ligne (CPL, PLC) permet de transmettre des informations numériques sur le réseau électrique existant.

Avec le CPL, toute prise électrique devient une prise réseau potentielle !

### 2.2 C'est quoi le CPL ?

Ces dernières années ont vu la généralisation des accès à Internet à haut débit, notamment grâce à la commercialisation de nombreuses offres xDSL. Cependant le réseau haut débit semble réservé aux habitants de zones urbaines relativement peuplées, ainsi des zones d'activité économique importante ne peuvent accéder à cette technologie pourtant essentielle à leur développement. Dans de nombreuses parties du territoire, les opérateurs télécoms ont jugé non rentable l'installation de l'ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) parce que la mise en place de câblages représente un investissement trop lourd.

Une possibilité pour les collectivités locales et les entreprises concernées est d'utiliser la technologie Courant Porteur en Ligne (CPL) afin d'acheminer un flux haut débit depuis un point d'accès préexistant. La capillarité extrêmement fine du réseau électrique permet en effet d'atteindre virtuellement l'ensemble du territoire, et en particulier les zones rurales qui semblaient jusqu'à présent exclues de la révolution haut débit. Concrètement, les CPL sont complémentaires d'une technologie haut débit déjà installée et viennent remplacer la boucle locale (on appelle ainsi les liaisons terminales, les derniers kilomètres vers les abonnés d'un réseau de télécommunication) qui n'a pas été mise en place pour cause de non rentabilité économique. Par exemple, un opérateur télécoms décide d'installer un réseau haut débit dans une agglomération satisfaisant les critères de rentabilité, mais les communes avoisinantes ne seront pas connectées. Les collectivités locales concernées peuvent décider d'implanter un réseau haut débit utilisant les CPL pour acheminer le flux numérique depuis l'accès déjà existant.

En France, la distribution d'électricité est un service public qui relève des compétences des collectivités locales. Celles-ci sont propriétaires du réseau de distribution, mais elles en confient la gestion à ERDF (Electricité Réseau Distribution France), dans le cadre d'une délégation de service public [4]. Elles peuvent donc jouer un rôle important dans la promotion des nouvelles technologies de l'information, l'accès à Internet de tous les citoyens et entreprises et la mise en œuvre de services de proximités interactifs. Les CPL sont une plate-forme

particulièrement flexible, qui peut se déployer suivant les cibles visées, par grappes au niveau d'un transformateur, et en complément avec d'autres infrastructures.

La solution du CPL repose sur les réseaux câblés urbains ; s'il existe un réseau déjà déployé depuis de nombreuses années et qui est donc économiquement amorti, c'est bien celui de la distribution de l'électricité. D'où l'idée d'utiliser cette infrastructure pour réaliser à moindre coût un réseau de transmission de données à haut débit qui soit accessible par chaque foyer sans câblage additionnel. Les acronymes pour désigner cette technologie sont divers : PLC pour Power Line Communications, mais aussi PLT signifiant Power Line Télécommunications, BPL pour Broadband over Power Line ou bien CPL dans la littérature française pour Courant Porteur en Ligne.

De nombreuses applications sont ainsi possibles :

- Accès à Internet à haut débit,
- Téléphonie sur IP, télévision, vidéo, etc. ..., à l'image de ce qui est proposé par l'xDSL,
- Nouveaux services : télésurveillance, alarmes, etc.

Les applications de cette technologie ne se limitent pas à la boucle locale. Elle est également directement applicable pour les réseaux locaux, venant directement concurrencer (ou compléter) les offres classiques filaires (Ethernet) ou sans fil (Wifi). Transposée à l'intérieur d'un bâtiment, elle transforme le câblage électrique interne en un vaste réseau local (LAN - Local Area Network) où chacune des prises électriques devient un connecteur multiservices et multimédia relié au monde extérieur.

### **2.3 Principe de fonctionnement:**

Le CPL (Courant Porteur en Ligne) est une technologie qui utilise des réseaux publics de distribution des ligne d'électricité basse et moyennes tensions (220 volts ou 380 volts).

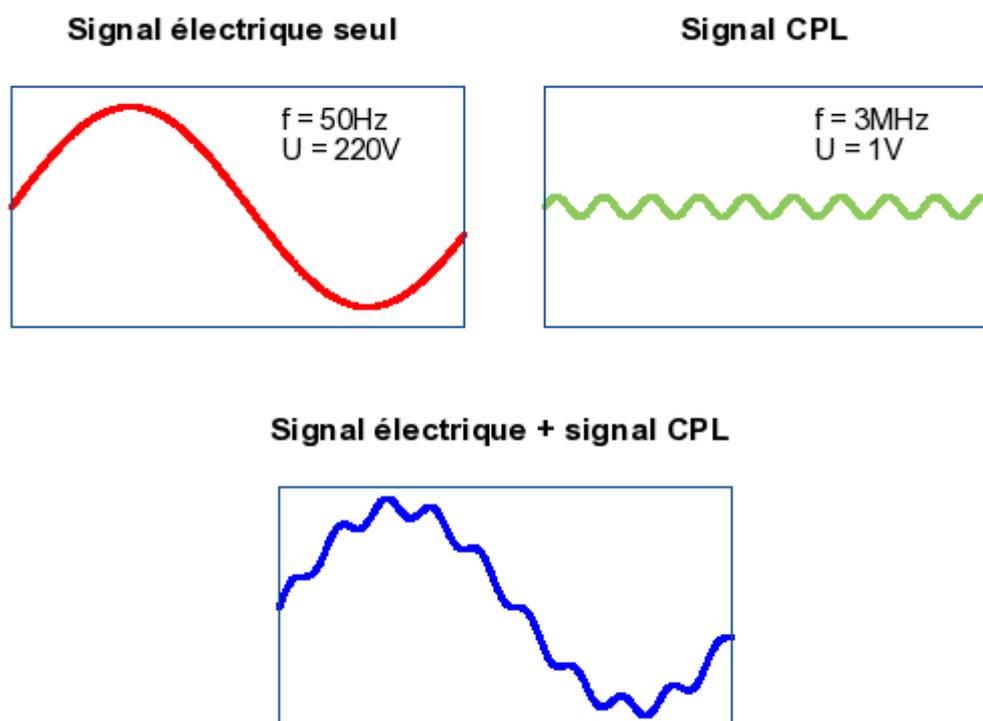
En utilisant les infrastructures existantes, la technologie CPL permet la transmission de données numériques par les câbles électriques et offre ainsi des services sur une bande de fréquence de 1 à 30MHz. Le fonctionnement des CPL est relativement simple et consiste à superposer au signal électrique de puissance basse fréquence (50 Hz), un signal de communication à haute fréquence (1-30 MHz) contenant des informations numériques qui pourront ensuite être décodées à distance (voir figure2. 1).

Les CPL utilisent deux bandes de fréquences, la bande 3-148 kHz pour les technologies á bas débit et la bande 1-30 MHz pour les technologies á haut débit.

Les bandes 3-148 kHz et 1-30 MHz sont dites sans licence, signifiant qu'il n'y a pas d'autorisation à demander ni d'abonnement à payer pour les utiliser. Ces bandes sont divisées en sous-bandes, sur lesquelles ont lieu les transmissions.

### Les CPL bas débit

Principalement utilisé dans la domotique et l'automatique (bus industriel des véhicules automobiles), les fréquences autorisées pour les CPL bas débit sont décrites par le Cenélec dans la norme EN-50065-1. Cette dernière définit les caractéristiques d'utilisation de toutes les bandes de fréquences comprises entre 3 et 148 kHz. La puissance d'émission du signal CPL est limitée par la tension maximale autorisée, qui est de 3,5 V pour ces bandes de fréquences [5].



**Figure 2.1:** Principe du courant porteur en ligne

### Les CPL haut débit

La bande de fréquences 1-30 MHz des CPL haut débit est utilisée dans différents cas, notamment pour les CPL intérieurs à usage domestique mais aussi pour les CPL extérieurs à usage public dans le réseau électrique à moyenne tension.

Cette bande est également utilisée par les radioamateurs et par la future radio ondes courtes numérique, dite DRM (Digital Radio Mondiale), qui permettra de diffuser des programmes radio en qualité numérique sur des liaisons très grande distance, mais également de réaliser des transferts de données à des débits de quelques dizaines de kilobits/s [5].

Les perturbations engendrées par les réseaux CPL sur les radioamateurs et la DRM ont fait l'objet de nombreuses discussions afin de rendre possible la cohabitation des différentes technologies. Ces discussions ont amené les développeurs de technologies CPL à inclure des techniques dites d'extinction des fréquences déjà occupées par d'autres technologies radio. Baptisées notching, ces techniques

consistent à écouter les canaux radio pour réajuster ou éteindre certaines fréquences. Des travaux de standardisation sont en cours pour permettre la coexistence des différents systèmes.

## **2.4 La transmission de l'information sur les lignes électriques:**

La technologie des CPL utilise les réseaux publics de distribution d'électricité pour véhiculer des signaux de communications électroniques à haute fréquence.

Le réseau électrique constituant un environnement électromagnétique très sévère, des techniques de traitement de signal sophistiquées sont nécessaires pour assurer un transport fiable des données. Après un engouement prématuré à la fin des années 90, il semble que cette technologie ait atteint aujourd'hui un degré de maturité tel que son utilisation dans le secteur des télécommunications puisse être sérieusement envisagée à une échelle industrielle.

Cette technologie a deux principales applications :

- des réseaux locaux privés ou « CPL indoor » où il s'agit de connecter des micro-ordinateurs localement en utilisant l'installation électrique d'une habitation privée ou d'une entreprise.
- des réseaux d'accès de communications électroniques (ou boucle locale) où le réseau électrique est utilisé pour relier l'infrastructure d'opérateurs de communications électroniques à leurs abonnés.

Les règles classiques de compatibilité électromagnétique qui s'appliquent aux « CPL indoor » sont peu contraignantes. Ces réseaux suscitent donc peu de problèmes de nature réglementaire, à l'exception de certains points liés à la normalisation.

Les réseaux publics de distribution d'électricité situés en aval du réseau de transport national (géré par RTE (Réseau de transport d'Electricité)) alimentent l'ensemble des abonnés en électricité et constituent, avec la paire téléphonique de France Telecom, la seule infrastructure filaire pénétrant dans la quasi-totalité des foyers et des entreprises.

Les réseaux publics de distribution et de transport d'électricité ont été conçus pour transporter un courant électrique de fréquence 50 Hz. Ces réseaux, constitués de câbles électriques conducteurs, peuvent également transporter des signaux de communications électroniques à des fréquences plus élevées (entre 1MHz et 30 MHz). Les réseaux publics de distribution et de transport d'électricité sont mal adaptés pour transporter cette gamme de fréquences, principalement pour les raisons suivantes :

- les transformateurs ont été conçus pour le courant 50 Hz et ne transmettent pas les fréquences élevées
- le bruit que génèrent les équipements électriques qui sont mis sous-tension ou hors tension provoquent des interférences sur les gammes de fréquences élevées

- le signal haut fréquence s'atténue au bout de quelques centaines de mètres.

C'est pour ces raisons que la conception d'une technologie robuste de transmission de données de télécommunications sur les lignes électriques a pris plusieurs années et a du avoir recours à des algorithmes de traitement de signal extrêmement sophistiqués.

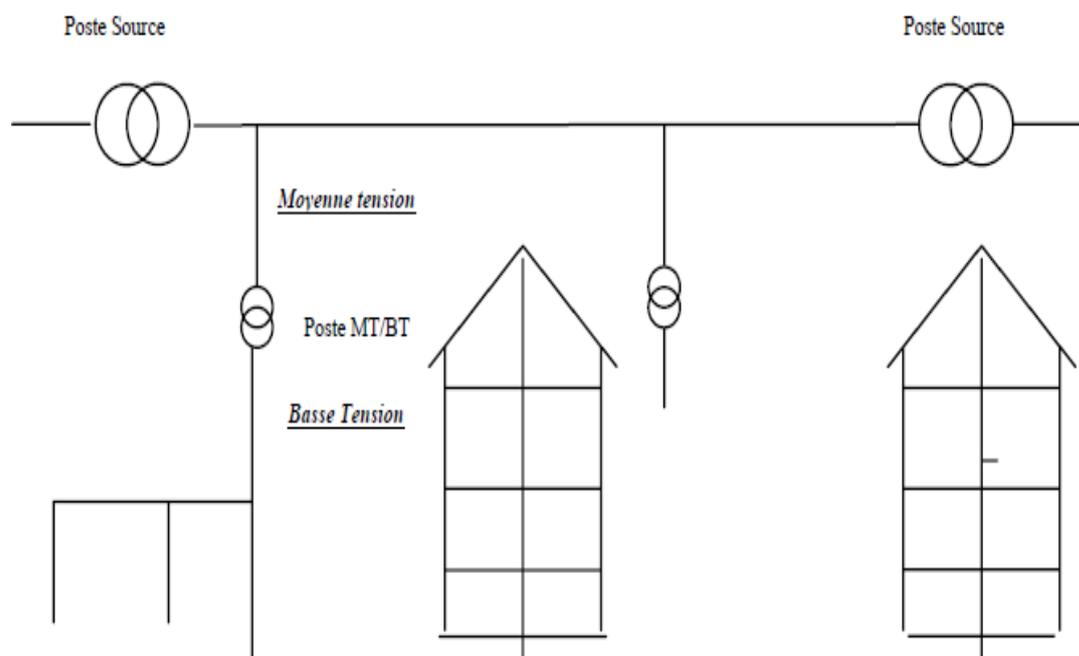
L'un des intérêts potentiels de la technologie des CPL est de contribuer à la réalisation d'une boucle locale de télécommunication qui pourrait s'intégrer aux réseaux des opérateurs alternatifs de communications électroniques.

Les réseaux de ces opérateurs relient le plus souvent des villes entre elles mais utilisent aujourd'hui l'infrastructure de France Télécom (la paire téléphonique) pour atteindre les clients. L'émergence d'un nouveau moyen d'accès aux abonnés constituerait pour ces opérateurs une opportunité pour concevoir de nouvelles offres, si les conditions économiques et opérationnelles de mise à disposition de cette ressource étaient adaptées à leurs besoins.

Dans les zones non desservies en ADSL, la technologie des CPL pourrait, en conjonction par exemple avec des liaisons par satellite, représenter une solution disponible pour fournir un accès haut débit à Internet.

### **CPL en zone dense:**

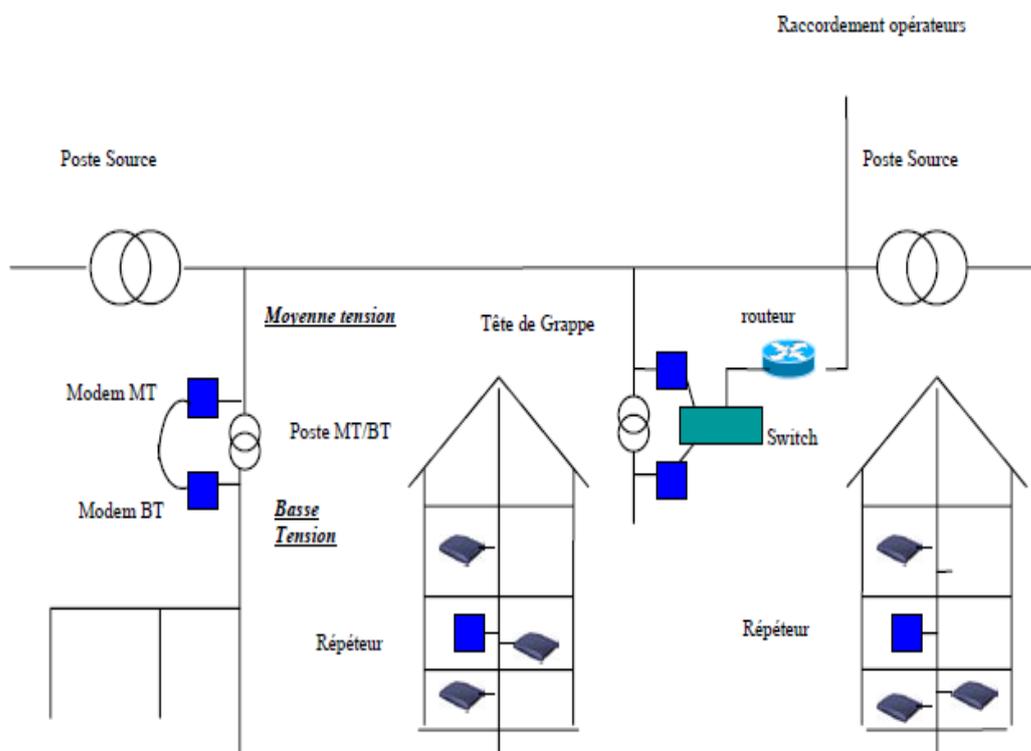
L'architecture du réseau de distribution électrique est comme se présente sur la figure 2.2:



**FIGURE 2.2:** L'architecture du réseau de distribution électrique

Les postes sources sont alimentés en haute tension (63 kV) par le réseau de transport électrique national. Les postes sources fournissent une tension de 20 kV au réseau Moyenne Tension qui alimente à son tour les postes MT/BT (Moyenne Tension/Basse Tension), lesquels alimentent les clients en tension 220 V. Un poste MT/BT alimente en moyenne 200 foyers dans les zones d'habitation dense.

Le réseau d'accès CPL peut être constitué en installant des équipements CPL dans les postes MT/BT et dans les colonnes montantes des immeubles, comme se présente sur la figure 2.3 :



**FIGURE 2. 3:** Le réseau d'accès CPL

On trouve dans chaque poste MT/BT:

- un modem BT qui diffuse le signal en aval vers les usagers.
- un modem MT, directement relié au modem BT, qui permet une connexion entre les différents postes grâce au réseau Moyenne Tension.
- un poste particulier, appelé « tête de grappe », qui assure la connexion d'un ensemble de postes, ou « grappe », à un réseau de communications électroniques de transport classique.

Chaque immeuble est quant à lui muni d'un répéteur, qui amplifie le signal avant de le livrer aux utilisateurs munis d'un modem terminal connecté au micro-ordinateur et/ou terminal téléphonique.

La boucle locale [6] CPL se comporte comme un réseau Ethernet vis-à-vis des réseaux de transport.

La capacité en débit du modem BT est partagée entre tous les utilisateurs munis d'un modem terminal alimenté par ce poste. Compte tenu des débits permis par la technologie et du nombre d'utilisateurs potentiels partageant ce débit, une offre intéressante d'accès haut débit à Internet et de téléphonie sur IP peut être envisagée.

### **CPL en milieu rural:**

En zone rurale, les configurations diffèrent souvent du schéma ci-dessus par plusieurs aspects :

- un mode d'habitat moins dense, donc moins de foyers couverts par une même infrastructure CPL.
- des distances plus longues des câbles du réseau électrique.
- un câblage parfois aérien, torsadé (pour minimiser les émissions parasites éventuelles) ou sans protection particulière (câbles en fil nu).

Cependant, en cœur de village, la configuration est souvent analogue à celle du schéma urbain. Les solutions techniques adoptées sont identiques pour des distances qui restent de l'ordre de quelques centaines de mètres entre le poste MT/BT et les abonnés. Pour des distances plus grandes, le nombre nécessaire de répéteurs peut dégrader les performances.

Les zones rurales se caractérisent également par une indisponibilité fréquente de point de dessertes en télécommunications. Dans ce cas, un accès par radio ou par satellite sont des moyens de recours. L'expérimentation conduite par le Conseil Général de la Manche à La Haye du Puits avec EDF et Eutelsat a permis de valider un tel schéma.

## **2.5 Le rayonnement des réseaux CPL:**

Les réseaux électriques s'étendent à l'extérieur et à l'intérieur des bâtiments. Ils utilisent comme support les lignes électriques qui ne sont pas originellement conçues pour des transmissions de données haut débit. Inévitablement, la transformation d'un réseau électrique en réseau CPL par ajout de quelques modems ou équipements transforme les lignes électriques, lorsqu'elles sont aériennes, en éléments de réseaux rayonnants (soit en très longues antennes rectilignes en extérieur, soit plutôt en boucles dans les immeubles). Ces antennes émettent alors selon des fréquences qui se situent dans la plage de 2 à 30 MHz pour les applications CPL actuellement envisagées, c'est à dire dans des fréquences utilisées par divers services de radiocommunications tels que la radiodiffusion en ondes courtes et

ondes moyennes, le service amateur, les communications aéronautiques en-route, les systèmes tactiques de la Défense ou les communications maritimes et correspondant dans certains cas à des services de détresse et de sécurité. Il faut donc garantir sur le plan électromagnétique une coexistence des systèmes CPL avec les systèmes radio utilisateurs de spectre à la fois en intérieur et en extérieur.

D'où la nécessité de développer des méthodes pour que les CPL émettent le moins souvent possible et avec une puissance limitée, ce qui peut se traduire physiquement par une limitation de leur capacité et économiquement par des coûts Supplémentaires. En effet, un système radio ne peut pas se protéger lorsqu'un rayonnement parasite est « calé » sur sa fréquence et tout brouillage correspond donc mécaniquement à une réduction de sa sensibilité.

Il importe de trouver un équilibre entre le perturbé potentiel et le perturbateur potentiel ce qui engendre forcément des coûts pour se protéger pour le premier et pour émettre dans des limites raisonnables pour le second.

Les aspects normalisation sont dans ce contexte déterminant. En effet, la normalisation est ici l'expression technique de la réglementation, ce sera elle qui fixera l'équilibre, le point d'arbitrage, entre le bon droit des CPL d'exister, et le bon droit des utilisateurs de fréquences d'exister aussi.

La directive CEM (Compatibilité Electromagnétique) [7] est une directive harmonisant la libre circulation de tous les produits électriques et électroniques. Elle limite les rayonnements électromagnétiques parasites et, comme tous réseaux de communications électroniques, les réseaux CPL doivent satisfaire aux exigences de cette directive.

## **2.6 Le standard Home Plug:**

Le Home Plug Power line Alliance a été créé en mars 2000 par 13 acteurs majeurs de l'industrie. Il regroupe notamment les entreprises françaises EDF et France Télécoms. Face à l'absence de standard pour les réseaux CPL de type indoor, ce consortium international a créé la norme Home Plug 1.01. Cette solution est une solution propriétaire ; il faut donc être membre de la Home Plug Power line Alliance pour avoir accès à l'ensemble des spécifications Home Plug 1.01 et fabriquer des produits compatibles. Le comité regroupe maintenant une cinquantaine d'entreprises qui doivent verser annuellement 15000 US\$ pour être membre. La norme Home Plug 1.01 intervient aux niveaux 1 et 2 du modèle OSI (Organisation Internationale Standardisation) (physical & data-Link), son objectif principal étant d'assurer la transmission de données sur un réseau utilisant les courants porteurs en ligne. Les spécifications Home Plug pour la couche physique (PHY) prennent en compte les données spéciales liées à la transmission sur courant porteurs. Au niveau de la couche liaison de données, les spécifications Home Plug correspondent à la sous couche MAC, elles doivent permettre le partage du medium entre plusieurs stations. [8]

## 2.7 Spectre des offres CPL:

Les systèmes commercialisés depuis le début de l'année 2000 répondent pour beaucoup aux spécifications proposées au sein du Consortium Home Plug Power line Alliance.

Aussi, les industriels Devolo, Netgear, Olitec, Philips ou encore Sagem commercialisent leurs modems indoor sous le label Home Plug.

Trois spécifications sont finalisées et précisent les couches physiques et de contrôle d'accès : le Home Plug 1.01, le Home Plug 1.1 et le Home Plug AV. Ces standards exploitent la bande [0 – 25 MHz] avec des niveaux d'émission de -50 dBm/Hz sur les fréquences autorisées et -80 dBm/Hz dans les bandes radioamateurs qui sont ainsi protégées par des "notches"(séparations).

L'OFDM est employée comme technique de transmission, la différence entre les standards tient au nombre de sous porteuses, aux ordres de modulation employés, aux débits.

- Home Plug 1.0.1 :

- débit théorique maximal : 14 Mb/s

- utilisation : partage de connexion Internet et de fichiers peu volumineux

- Home Plug 1.1 ou Turbo :

-débit théorique maximal : 85 Mb/s

- utilisation : partage d'accès Internet haut débit, transfert de fichiers

- Home Plug AV :

- débit théorique maximal : 200 Mb/s

- utilisation : streaming vidéo, vidéo à la demande, besoin de QoS

Les débits indiqués sont bruts. Notons que le débit réel maximal du Home Plug AV est de 80 MB/s. A titre indicatif, la Télévision Haute Définition (TVHD) requiert des débits de l'ordre de 15 Mb/s.

Parallèlement au développement des standards Home Plug, certains industriels expérimentent leur propre technologie. C'est ainsi que la société espagnole DS2 commercialise une puce à 200 Mb/s, permettant de transmettre la vidéo, les jeux en ligne, la TVHD.

Néanmoins, il n'y a pas d'interopérabilité entre ces divers systèmes non normalisés. Pour sa part, France Télécom vend des adaptateurs CPL Home Plug AV. [8]

## 2.8 Fréquences utilisées dans les systèmes CPL:

Chaque système à haut débit se caractérise par sa bande passante, les systèmes de transmission CPL utilisent des fréquences dans la bande de 1 MHz jusqu'à 30 MHz

et véhiculent le signal utile en mode différentiel. Il est nécessaire de mettre en place des règles d'utilisation de cette bande de fréquences qui est utilisée pour d'autres applications. On note que la symétrie du câble, liée à ses caractéristiques électriques convertit le signal de mode différentiel en un signal parasite de mode commun responsable de l'émission électromagnétique.

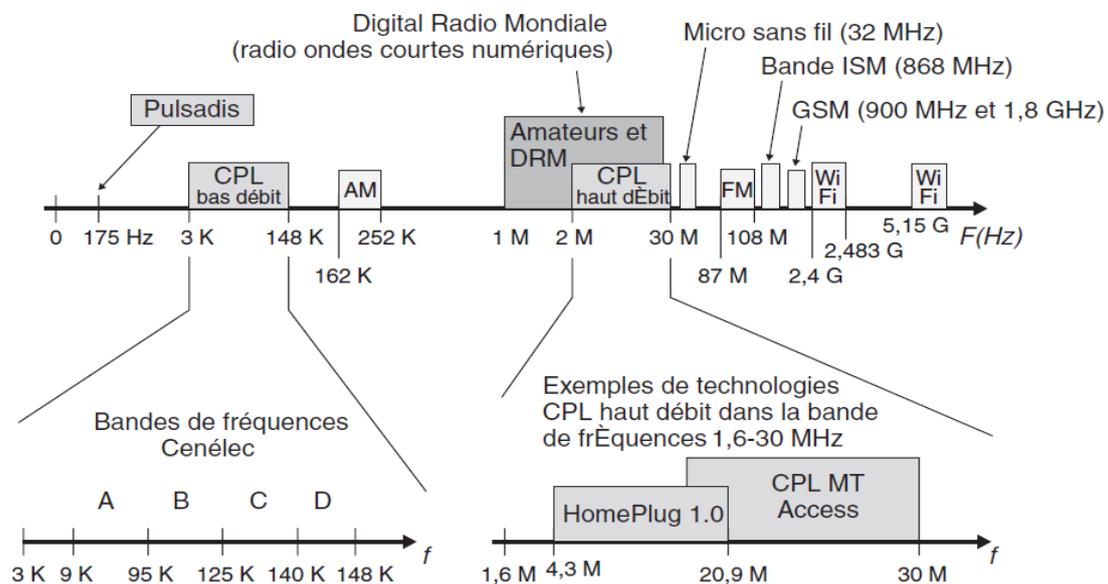
Le signal CPL étant un signal modulé en amplitude, fréquence ou phase autour d'une fréquence porteuse  $f$ . Deux bandes de fréquences sont allouées à cette technologie :

- 3 à 148kHz pour les CPL dits bas débit.
- 1 à 30MHz pour les CPL dits haut débit.

La figure 2. 4 illustre la place des fréquences CPL relativement à d'autres technologies réseau.

Aux basses fréquences (3 à 148 kHz), la longueur des câbles est faible devant la longueur d'onde, les temps de propagation d'une extrémité à l'autre des câbles sont négligeables, ce qui revient à admettre que la vitesse de propagation est infinie.

Cependant, à haute fréquence ( $f > 1\text{MHz}$ ), la longueur des câbles n'est plus petite devant longueur d'onde et il faut alors tenir compte des temps de propagation. Sur la ligne, l'énergie ne circule pas uniquement dans les fils, mais se propage également dans le milieu environnant sous forme de champs électromagnétiques susceptibles d'induire par exemple des courants perturbateurs sur les conducteurs voisins. En considérant cette hypothèse, nous déterminerons dans la suite de notre travail les champs électromagnétiques qu'elles génèrent.



**Figure 2. 4:** Bandes de fréquences utilisées par les réseaux CPL

## 2.9 Canal de transmission:

Le support du réseau électrique n'a pas été étudié pour transporter des signaux haute fréquence (HF). Il faut donc prendre en compte les contraintes de ce support pour assurer une bonne transmission de ces signaux HF sans pour autant perturber les appareils environnant, ni les fréquences de la bande 1-30 MHz par rayonnement,

certaines fréquences de cette bande étant réservées à l'armée ou bien aux radioamateurs.

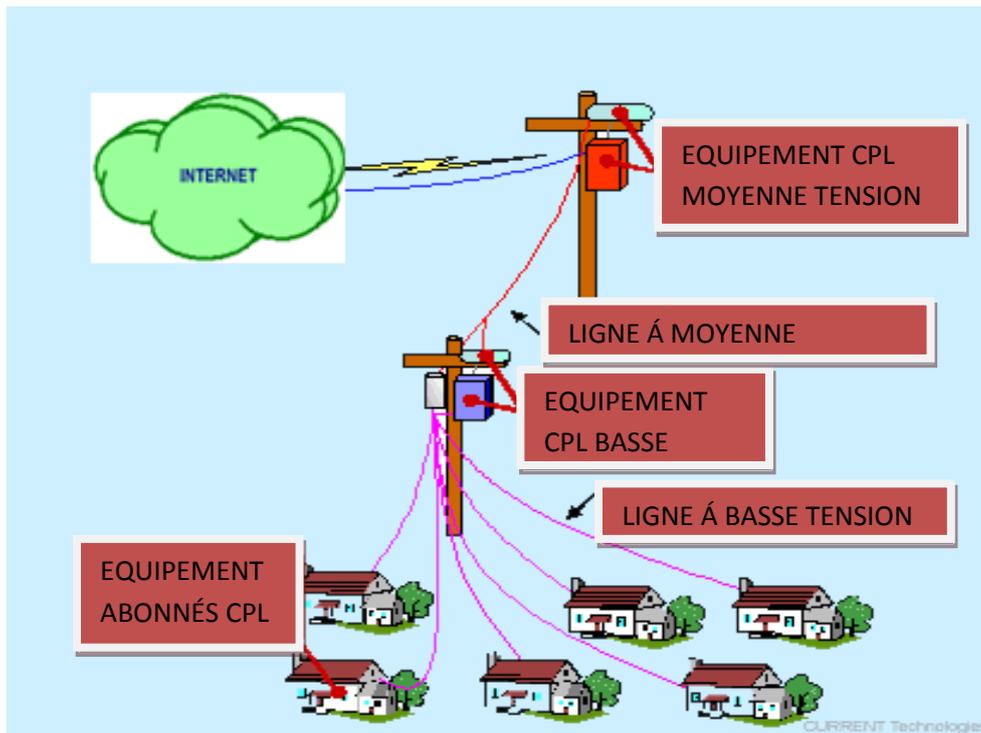
Tout ceci doit enfin être étudié pour donner un débit suffisant à l'utilisateur en bout de ligne. Tout le problème consiste ainsi à limiter la puissance de fonctionnement des courants porteurs tout en assurant un débit suffisant, et limiter les effets du bruit et de la distorsion sur la ligne. La solution : allier un traitement du signal le plus performant possible et effectuer un couplage optimal du réseau CPL au réseau électrique.

Il existe deux méthodes de couplage : couplage capacitif en parallèle sur le réseau électrique ou couplage inductif via un tort de ferrite. En ce qui concerne les installations en intérieur (indoor), le couplage capacitif est fait 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), beaucoup plus complexes à réaliser.

### **2.9.1 Le marché Outdoor:**

L'accès extérieur Outdoor consiste à acheminer, via le réseau électrique (figure 2. 5), un flux haut débit depuis un point d'accès préexistant. Concrètement, la transmission de données s'effectue sur le réseau électrique basse tension (BT), par la mise en place d'équipements spécifiques au niveau du transformateur moyenne / basse tension (MT/BT) et au niveau de l'utilisateur final. Dans le cas de l'outdoor, les déploiements sont encore au stade de l'expérimentation. Les freins au développement de ce marché ne sont pas seulement d'ordre technique -l'absence de standard par exemple -, ils sont aussi d'ordre juridique. En effet, l'activité du transport de données relève des télécommunications et nécessite une licence d'opérateur de réseaux télécoms.

Bien que toujours en phase d'expérimentation, les CPL outdoor devraient intéresser fortement les collectivités locales et permettre un accès au haut débit beaucoup plus large sur le territoire.

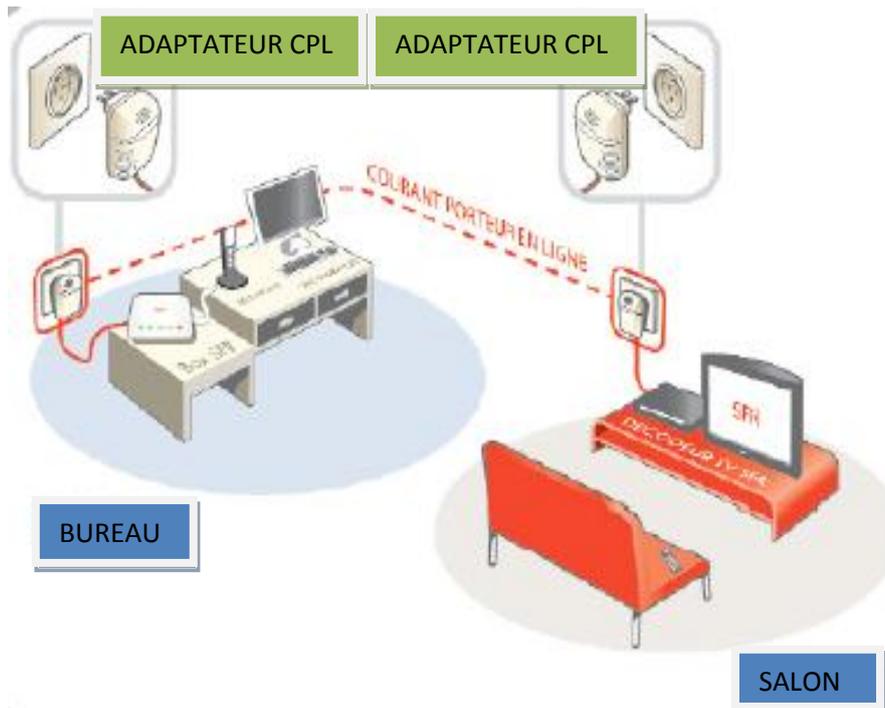


**FIGURE 2. 5:** Réseau Outdoor du courant porteur en ligne

### 2.9.2 Le marché Indoor:

L'accès intérieur Indoor permet d'acheminer les flux de données vers toutes les prises électriques du bâtiment, à partir d'un accès haut débit à Internet. Les CPL permettent donc d'élaborer un réseau local informatique.

Cette technologie est appropriée pour les établissements privés ou publics ne disposant pas, pour des raisons techniques ou financières, de réseau local. Elle est également mise en avant pour le développement des réseaux domestiques.



**FIGURE 2. 6:** Réseau Indoor du courant porteur en ligne -SFR PLC Coupling units LEA 200 Mb

## 2.10 Avantages et inconvénients des CPL:

### 2.10.1 Avantage des CPL:

Comme la plupart des systèmes, les CPL présentent des avantages par rapport aux technologies concurrentes (ADSL, WIFI), mais également des inconvénients. Un des atouts majeurs des CPL est l'utilisation du réseau électrique préexistant. Aucun câblage supplémentaire n'est requis, ce qui rend cette technologie particulièrement attractive.

Les principaux avantages des CPL sont les suivants :

- Utilisation du réseau électrique existant, ce qui implique une couverture potentielle de la totalité du pays considéré,
- Déploiement rapide, pas de câblage supplémentaire,
- Facilite l'installation de l'Internet dans les régions sans réseau de télécommunication (Outdoor),
- Facilite les connexions des services de télécommunication dans les bâtiments résidentiels (Indoor),
- Les investissements et les coûts d'exploitation sont similaires à xDSL et plus faible que dans les services de câblodistribution.

Les pays qui ne disposent pas de réseau téléphonique très densifié sont très intéressés par cette technologie.

## 2.10.2 Inconvénients des CPL :

Parmi les inconvénients des CPL, citons les problèmes liés :

- à l'émission de bruit électromagnétique qui peut interférer avec la radio publique,
- à l'établissement de limites pour le courant mené dans l'équipement et des champs rayonnés par le réseau,
- l'absence de définition de méthodes de mesure sur le terrain,
- le problème de l'immunité du réseau aux perturbations externes et internes,
- au partage des flux de données entre les utilisateurs desservis par le même transformateur électrique,
- à l'identification des applications distribuées,
- à la distance à couvrir qui limite le débit disponible.
- au problème des différentes phases.

La figure 2. 7 ci-dessous, montre certains désavantages de cette technologie.

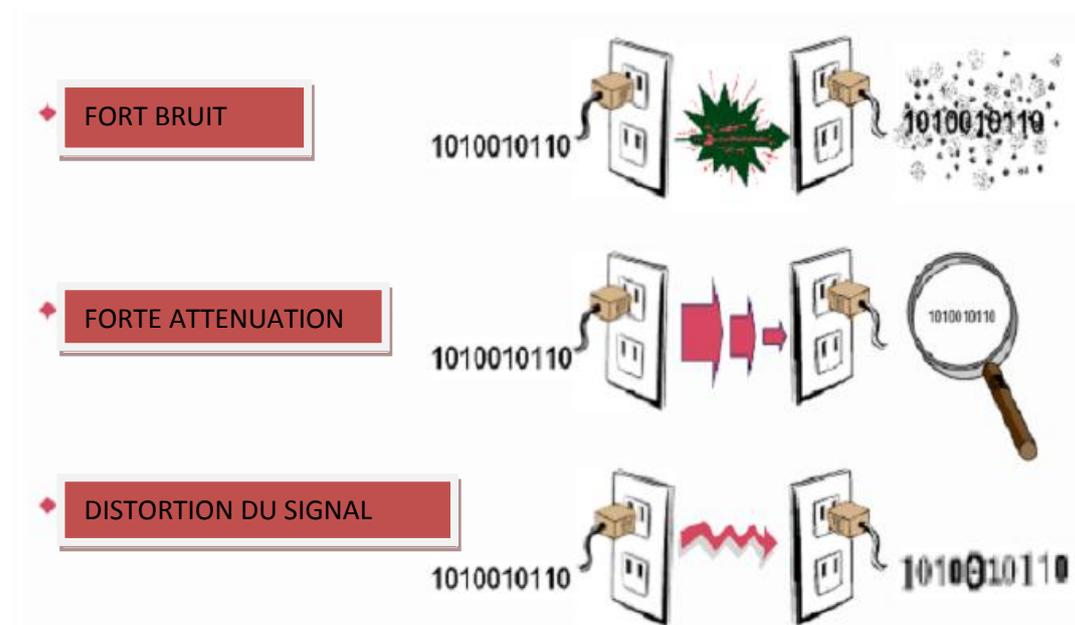


FIGURE 2. 7: perturbation du signal, l'atténuation et la distorsion

## 2.11 Techniques de modulation:

Pour transmettre les données sur une ligne électrique, on les fait circuler sous la forme d'une onde. Celle-ci, appelée onde porteuse, permet par la modification d'une de ses caractéristiques (amplitude, fréquence ou phase) de transporter des informations. Le choix d'une technique de modulation convenable pour le CPL doit tenir compte de plusieurs facteurs [8] dont les essentiels sont :

- la présence de bruits et de perturbations provoquant un mauvais rapport signal/bruit.
- les contraintes relatives à la compatibilité électromagnétique limitant la puissance transmissible.

Le but des travaux sur la transmission par courant porteur en ligne est d'allier un débit important à un niveau d'émission le plus faible possible. Pour cela, deux solutions sont possibles: soit on effectue une limitation de la puissance de fonctionnement des courants porteurs en ligne, soit on fait un traitement le plus performant possible du signal afin d'atténuer le niveau des émissions.

Sur les solutions actuelles, deux techniques de modulation sont plus particulièrement utilisées. Ces types de modulation sont tous les deux basés sur l'étalement du spectre :

- OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing.
- SS - Spread Spectrum.

### **2.11.1 La modulation OFDM:**

Le principe de la modulation OFDM, ou Orthogonal Frequency Division Multiplexing, pourrait être défini uniquement par ces 4 mots. En effet, les mots Division et Multiplexing nous indiquent que l'idée principale de la modulation réside dans le fait de répartir un train binaire haut débit en une multitude de trains (ou canaux), lesquels étant modulés à bas débits.

Les deux premiers mots, Orthogonal et Frequency, eux nous disent que chacun de ces sous canaux est modulé par une fréquence différente, l'espacement entre chaque fréquence restant constant. L'information est distribuée sur différents canaux pour augmenter le débit total. Ces fréquences constituent une base orthogonale : le spectre du signal OFDM présentera une occupation optimale de la bande allouée.

L'OFDM résout également les problèmes de distorsion des signaux transmis en apportant une solution au problème des échos multiples que l'on rencontre quand on monte en débit. Cette modulation a été choisie par le comité Home plug, donc tous les équipements qui respectent la norme Home plug utilisent la modulation OFDM.

La technique de transmission OFDM est basée sur  $n$  bandes de fréquence (situées entre 2 et 30 MHz) de  $N$  porteuses sur chaque bande. Le signal est réparti sur les porteuses: répartition d'un train binaire haut débit en une multitude de trains modulés à bas débit.

Les fréquences de travail sont choisies en fonction des réglementations, les autres sont « éteintes » de manière logicielle. Le signal est émis à un niveau assez élevé pour pouvoir monter en débit, et injecté sur plusieurs fréquences à la fois. Si l'une d'elles est atténuée le signal passera quand même grâce à l'émission simultanée. Le

spectre du signal OFDM présente une occupation optimale de la bande allouée grâce à l'orthogonalité des sous-porteuses.

### **2.11.2 La modulation SS:**

La modulation avec étalement de spectre SS est quant à elle optimisée pour lutter contre le bruit, dont elle limite mieux les effets. Elle consiste à "étalement" l'information sur une bande de fréquences beaucoup plus large que la bande nécessaire, dans le but de combattre les signaux interférents et les distorsions liées à la propagation : le signal se confond avec le bruit.

Le signal est codé au départ, un code est assigné à chacun des usagers afin de permettre le décodage à l'arrivée.

L'étalement est assuré par un signal pseudo aléatoire appelé code d'étalement. A la réception, le signal est perçu comme du bruit si le récepteur n'a pas le code.

### **2.12 Conclusion:**

Le second chapitre a été consacré à l'étude de la technologie CPL et aux modulations utilisées pour adapter le canal CPL. Le chapitre suivant aura pour but d'étudier le réseau électrique.

## Chapitre 3 : Le réseau électrique.

### 3.1 Introduction :

Le support de communication utilisé dans les technologies CPL est le câble électrique, qui n'est pas au départ conçu pour transporter des données, et dont les caractéristiques physiques sont avant tout adaptées au transport du signal 220 V/Hz.

### 3.2 Caractéristique du câble électrique

Cette section présente un certain nombre de ces propriétés physiques afin de faire mieux comprendre les capacités (avantages et limitations) qu'offre ce support à la transmission de données.

#### 3.2.1 Impédance:

Un câble électrique présente une impédance  $Z$  (valeur absolue des composantes résistives, inductives et capacitives des éléments du réseau électrique), qui, n'est pas fixe. Les équipements branchés et débranchés en permanence sur le câble électrique modifient l'impédance du câble, rendant difficile une modélisation du support de communication et donc du canal de transmission.

Par principe, un équipement électrique peut être branché ou débranché du réseau à tout moment, engendrant une modification de l'impédance globale du réseau électrique. De plus, cet appareil peut subir une modification de sa propre impédance en fonction de son mode de fonctionnement, de sa vitesse de fonctionnement, de son état de vieillissement, de sa conception, etc.

Des études ont montré que l'impédance des équipements électriques BT varie classiquement entre  $10 \Omega$  et  $1 k\Omega$ .

#### 3.2.2 Capacité et inductance:

Les différents équipements qui sont connectés sur le réseau électrique ont chacun une certaine capacité et une certaine inductance vis-à-vis du courant électrique qui circule sur le circuit 220 V alternatif à la fréquence de 50 Hz. L'inductance ( $L$ ), aussi appelée bobine ou self, d'un circuit ou d'un dipôle électrique est une valeur qui traduit le flux d'induction créé par le courant électrique traversant ce circuit. Le déplacement de charges électriques dans un matériau de susceptibilité magnétique ( $\mu$ ) non nulle crée un champ magnétique ( $H$ ) et une induction magnétique ( $B$ ).

Dans le cas d'un matériau qui se limite à une surface circonscrite, typiquement un câble électrique, le champ magnétique provenant du courant qui traverse ce circuit crée un flux d'induction. L'inductance peut être propre au circuit ou mutuelle avec un autre circuit électrique.

L'inductance vis-à-vis du champ magnétique ( $\Phi$ ) et du courant électrique ( $I$ ) peut être exprimée par la formule :

$$L = \frac{\Phi}{I}$$

En régime sinusoïdal (cas du courant électrique 220 V/50 Hz), cette équation est exprimée en valeurs efficaces par la loi d'Ohm, en fonction de la tension (U), du courant électrique (I) et de la fréquence (f) :

$$L = \frac{U}{2\pi f I} \text{ (Exprimée en henry)}$$

La capacité (C), aussi appelée condensateur ou capacitance, d'un circuit électrique est une valeur qui traduit l'énergie potentielle stockée dans un champ électrique constitué de deux plaques conductrices séparées se faisant face et de charge électrique opposée.

Cette énergie potentielle, ou capacité, est proportionnelle à la charge électrique stockée par le dipôle électrique constitué de ces deux plaques. Cette charge électrique peut être également exprimée en flux électrique ( $\Phi$ ) et associée au potentiel électrique entre les deux plaques du dipôle :

$$C = \frac{\Phi}{V} \text{ (Exprimée en coulomb)}$$

En régime sinusoïdal (cas du courant électrique 220 V/50 Hz), cette équation est exprimée en valeurs efficaces par la loi d'Ohm, en fonction de la tension (U), du courant électrique (I) et de la fréquence (f) :

$$C = \frac{I}{2\pi f U} \text{ (Exprimée en farad)}$$

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.

Ces caractéristiques influent sur le comportement global du réseau électrique en fonction des niveaux de courant électrique circulant dans ce réseau. Du point de vue informatique, ces caractéristiques se traduisent par une modélisation particulière de la couche physique afin d'obtenir la meilleure qualité possible du canal de transmission.

L'impédance peut s'exprimer en valeurs complexes par la loi d'Ohm comme la somme de ses composantes résistives, inductives et capacitives, ( $j$ ) exprimant la partie imaginaire d'un nombre complexe :

$$Z = R + jL2\pi f + \frac{1}{C2\pi f} \text{ (Exprimée en ohm pour la valeur absolue)}$$

L'ensemble des impédances des différents circuits électriques traversés par le courant électrique forme donc un réseau complexe d'impédances en série et en parallèle, qui peuvent être connectées et déconnectées en permanence du réseau. De plus, ces différentes impédances induisent des champs magnétiques et électriques mutuels, qui se traduisent par des courants électriques proportionnels

les uns par rapport aux autres. Du point de vue du canal de transmission, cette caractéristique peut se révéler étonnante, comme nous le verrons.

Les caractéristiques inductives et capacitives modifiant en permanence le canal de transmission physique, cela nécessite une optimisation et une consolidation des techniques de transmission CPL.

### **3.2.3 Bruits et perturbations électromagnétiques:**

Le canal de transmission récolte un certain bruit des différents équipements électriques connectés à la proximité du câble électrique.

Les différents types de bruits qui peuvent être perçus sur et autour du câble électrique sont les suivants :

- bruits impulsionnels dus aux arrêts/démarrages des appareils électriques.
- bruits blancs à large bande, dont la densité spectrale de puissance est la même pour toutes les fréquences.
- bruits périodiques à plusieurs fréquences.
- bruits harmoniques, composés des multiples fréquences utilisés par les équipements électriques branchés sur le réseau et qui sont, par exemple, des multiples de 50 Hz (300, 600, etc.).

Ces bruits sont exprimés globalement par le rapport signal sur bruit, ou SNR (Signal to Noise Ratio), généralement mesuré en décibels (dB).

En plus des bruits sur le support électrique, les appareils électriques connectés ou déconnectés du réseau électrique à proximité du câble électrique engendrent un certain nombre de perturbations sur le canal de transmission. Ce sujet technique fort complexe est appelé CEM (compatibilité électromagnétique), ou EMC (Electro-Magnetic Compatibility).

Du point de vue de la CEM, chaque appareil électrique alimenté en énergie est générateur de perturbations électromagnétique, c'est-à-dire transportées sur le câble électrique, ou induites, c'est-à-dire émises dans l'environnement radio de l'équipement perturbateur.

De nombreux groupes de travail du Cenélec (Comité Européen de normalisation Electrotechnique) et de la CEI (common electrical international) ont mis en place des règles fixant les limites des perturbations autorisées pour chaque classe d'équipement électrique, y compris les équipements CPL. De leur côté, les organismes de standardisation et de normalisation des télécommunications ETSI (européen) et ITU (international) travaillent sur les seuils de perturbation afin d'optimiser le canal de transmission et les techniques de traitement du signal à mettre en œuvre pour obtenir les meilleures performances des CPL. L'IEEE travaille également sur ces sujets pour optimiser la couche physique du modèle ISO.

Le groupe de travail ISRIC (International Special Radio Interference Committee) a fixé les limites de perturbations autorisées des appareils électriques CPL dans la bande 150 kHz-30 MHz.

Les perturbations CEM reçues et provoquées par les CPL font l'objet de nombreux autres travaux et études en vue d'harmoniser les niveaux d'émission de chaque appareil et d'obtenir un canal de transmission efficace avec ces niveaux d'émission.

### **3.2.4 Atténuation:**

De même que le signal radio subit une atténuation de sa puissance en fonction de la distance parcourue par les ondes ou que le signal DSL s'atténue le long du câble à paires de cuivres du RTC (Réseau Téléphonique Commuté), le signal électrique perd de sa puissance en fonction de la distance parcourue.

Il est important de prendre en compte cette caractéristique du câble électrique pour implémenter un réseau CPL.

Les différences d'impédances sur le réseau électrique provoquent des effets tels que les multitrajets, qui entraînent des « notches », ou pics d'amplitude du signal CPL, importants à certaines fréquences. Dans un habitat domestique, l'atténuation du signal sur le câble électrique est de l'ordre de 20 à 60 dB, en fonction de la charge réseau.

L'atténuation minimale de l'ensemble compteur/disjoncteurs est de 30 dB pour un équipement émettant un signal à une fréquence supérieure à 20 MHz. Pour les fréquences situées en dessous de 20 MHz, la valeur moyenne de l'atténuation est d'environ 50 dB.

Un coupleur CPL de bonne qualité permet toutefois de réduire l'atténuation de 10 à 15 dB pour certaines fréquences.

La fréquence du signal d'un modem HomePlug 1.0 étant comprise entre 4 et 25 MHz, la densité spectrale de sa puissance est de  $-50$  dBm/Hz.

Le tableau 3. 1 récapitule quelques valeurs d'atténuation pour les principaux équipements du réseau électrique.

Équipement électrique	Atténuation	Commentaire
Compteur électromécanique	15 dB	Les compteurs électromécaniques atténuent le signal CPL mais ne le bloquent pas, si bien que le signal CPL se propage hors du réseau électrique privé.
Compteur électronique	15 dB	Idem
Disjoncteur	5 dB	S'il traverse un trop grand nombre de disjoncteurs pour relier deux équipements CPL, le signal CPL risque d'être trop atténué.
Multiprise	10 dB	La qualité de fabrication de la multiprise influe énormément sur l'atténuation. Il faut donc éviter de brancher les équipements CPL sur des multiprises.
Compteur électronique + disjoncteurs	20 à 30 dB	L'ensemble compteur + disjoncteurs n'atténue pas assez le signal pour empêcher qu'il se propage hors du réseau électrique privé d'un appartement ou d'une entreprise.
Compteur électromécanique + disjoncteurs	30 dB	Au-dessus de 20 MHz
	50 dB	En dessous de 20 MHz

**Tableau 3. 1:** Atténuation des principaux équipements électriques d'un réseau électrique

Les différences mesures effectuées indiquent que dans un réseau de distribution basse tension, l'atténuation moyenne du signal est de l'ordre de 50 dB/km.

### 3.2.5 Couplage entre phases:

Un signal électrique alternatif à haute fréquence circulant dans un câble électrique provoque un champ électromagnétique, appelé couplage, à proximité de ce câble.

Le couplage est appelé diaphonique lorsque l'induction concerne deux câbles d'un même réseau électrique et tellurique lorsqu'elle s'effectue entre des câbles de deux réseaux électriques différents.

### 3.2.6 Réponse fréquentielle:

Selon la nature des câbles électriques (matériau, constitution, âge, etc.), la réponse du câble, c'est-à-dire sa capacité à propager le signal, aux signaux HF diffère notablement.

### 3.2.7 Sensibilité des interfaces:

Les équipements électriques sont constitués d'interfaces analogiques, qui permettent leur couplage au support électrique (inductif ou capacitif). Dans le cas

des CPL, ces interfaces permettent en outre la transmission du signal numérique sur les câbles électriques.

Selon les composants électroniques utilisés, l'interface analogique présente une certaine « sensibilité », qui influe sur sa capacité à transmettre le signal CPL sans trop de dégradation.

Cette sensibilité est modélisée par une impédance entre le câble électrique et les circuits numériques de l'équipement. [5]

### **3.3 Modélisation des réseaux électriques:**

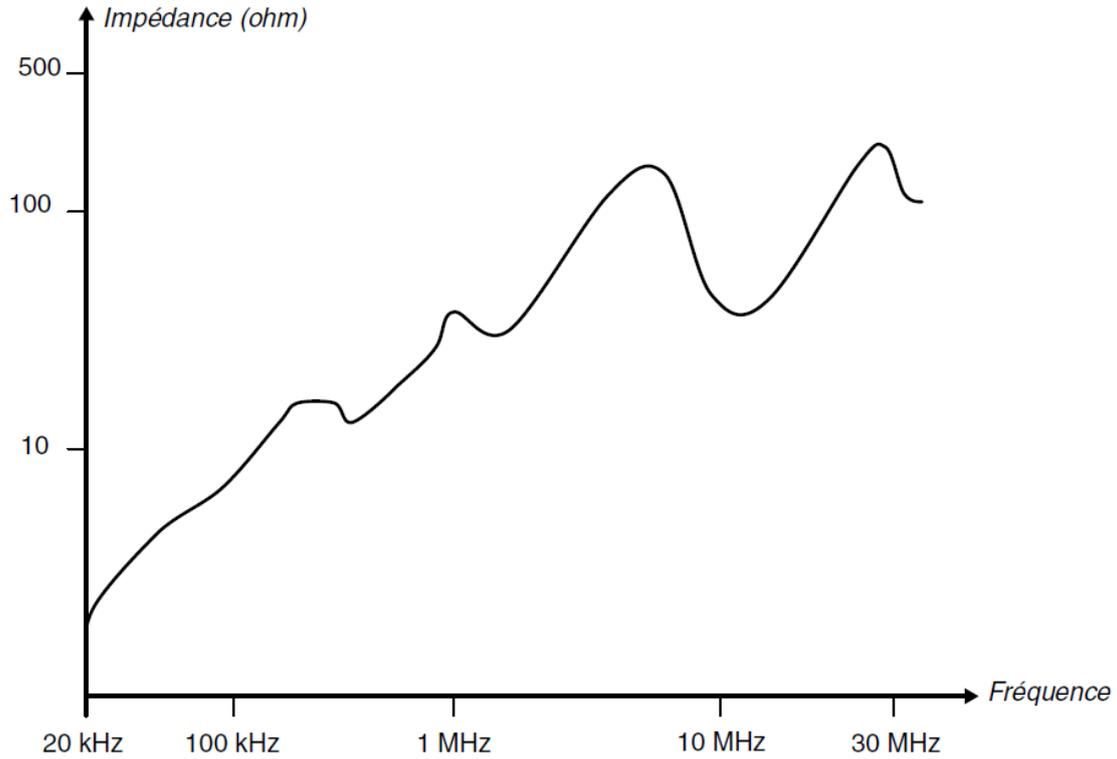
La modélisation d'un réseau électrique permet d'anticiper les phénomènes qui se produisent lors de la transmission des données (perturbations, perte de liens, etc.) et d'en proposer une représentation susceptible d'aider à l'ingénierie du réseau.

La modélisation des réseaux électriques, qu'ils soient domestiques, d'entreprise ou publics (dans le cas des réseaux de distribution électrique) est un sujet technique difficile qui exige de prendre en compte de nombreux paramètres (topologie, nature des câbles, perturbations, équipements branchés sur le réseau, heures de la journée, etc.).

Comme il n'existe pas d'outil de modélisation complet des réseaux électriques, l'ingénierie des réseaux CPL de télécommunications se limite à modéliser la couche physique de transport du signal CPL.

Les mesures effectuées sur les réseaux électriques ont permis de quantifier l'impédance moyenne d'une ligne électrique dans les fréquences hautes du type de celle utilisées par les équipements CPL.

La figure 3. 8 illustre la courbe de l'impédance exprimée en ohm (impédance en valeur absolue) en fonction de la fréquence. Cette impédance varie de 50 à 150 ohms pour les fréquences des CPL.



**Figure 3. 8:** Impédances moyennes d'une ligne électrique en fonction de la fréquence

Les travaux de Nicholson et Malak [5] ont permis d'exprimer l'impédance moyenne d'une ligne électrique par la formule :

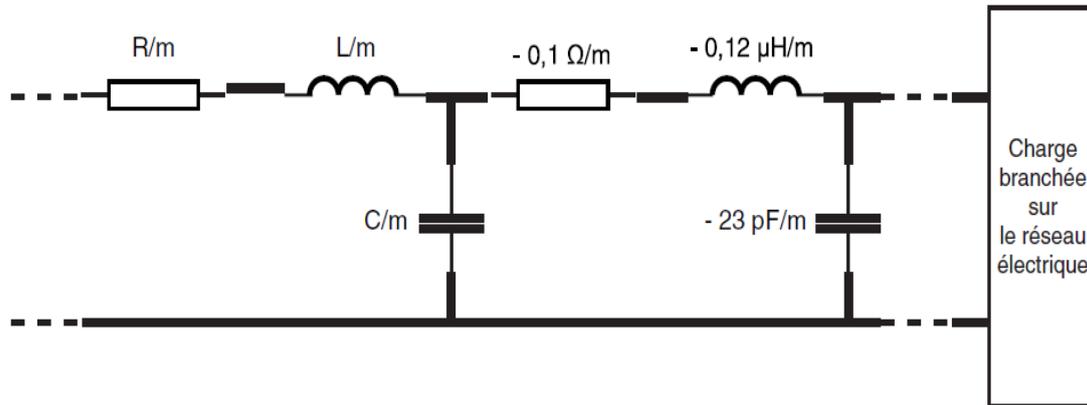
$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Où

$L = \text{mH/m}$  (inductance linéaire de la ligne électrique)

$C = \text{mF/m}$  (capacitance linéaire de la ligne électrique)

Les travaux de Downey et Sutterlin [11] ont permis de modéliser le circuit électrique équivalent d'une ligne électrique. Ce circuit, composé de résistances, d'inductances et de capacités peut être schématisé comme illustré sur la figure 3. 9.



**Figure 3. 9:** Circuit schématique d’une ligne électrique selon le modèle de Downey et Sutterlin [5]

L’impédance d’une ligne électrique est décrite par l’équation suivante :  
 $Z = R(f) + s \times L$  (exprimée en ohm)

Où  $R$  est la résistance du câble électrique en fonction de la fréquence du signal qui se propage dans le câble,  $s$  la section du câble électrique et  $L$  l’inductance de la ligne électrique.

L’impédance dépend de la charge branchée sur la ligne électrique, c’est-à-dire des équipements électriques (tels que sècheurs électriques, lampes halogènes, etc.) branchés sur le réseau, avec leur impédance propre.

Ces éléments de modélisation des réseaux électriques permettent de donner des ordres de grandeur des valeurs caractéristiques des réseaux électriques influant sur le transport des signaux CPL.

### 3.3.1 Modélisation des équipements électriques sur le réseau:

De la même manière qu’il est difficile de modéliser des réseaux électriques, il est difficile de modéliser les équipements électriques branchés sur le réseau électrique. Ces équipements de toutes sortes sont en effet branchés et débranchés de manière aléatoire, modifiant la charge du réseau en permanence.

De plus, les caractéristiques de ces équipements changent au cours de leur vie, des heures de la journée, de leur fréquence d’utilisation, etc., rendant parfois peu fiable cette modélisation.

À l’exception d’EMTP, qui permet de modéliser l’ensemble d’un réseau électrique avec ses différents câbles en fonction de la topologie, il n’existe pas d’outil susceptible de faciliter l’ingénierie et la compréhension des comportements des signaux CPL sur les câbles électriques.

Le Cenélec travaille toutefois à la mise au point d'un projet destiné à faciliter la modélisation des réseaux électriques domestiques.

### **3.4 Conclusion :**

Selon les éclairages et les explications apportées sur les propriétés du réseau électrique, nous confirmons l'utilité de son fonctionnement dans le CPL.

Le quatrième chapitre va être la modélisation du canal CPL et les modèles utilisés.

## Chapitre 4: Modélisation du canal CPL

### 4.1 Introduction:

Une ligne électrique est un réseau d'une infrastructure très étendue dans chaque bâtiment. On utilise ce réseau pour la distribution d'énergie, aussi pour transmettre des données. Cependant, il y'a des aspects réglementaire et technique qui limite le débit: aspect réglementaire et aspect technique. À l'heure actuelle la norme EN CENELEC permet l'utilisation des fréquences allant jusqu'à 148,5 kHz avec des tensions de transmission limitées en Europe. Grâce à une forte pression de nombreuses entreprises qui sont intéressées par les communications courant porteuses il pourrait y avoir des changements qui permettront l'utilisation de fréquences plus élevées dans un proche avenir.

Comme la ligne électrique a été conçue pour la distribution d'énergie, les caractéristiques de transmission de données ne sont pas favorables: variation d'impédance, un fort bruit et une forte atténuation. Au moyen d'une gamme de fréquences étendue et des systèmes de transmission appropriées, il pourrait être possible de transmettre des débits beaucoup plus élevés. De cette façon, un réseau interne pourrait être construit pour relier certains ordinateurs ou téléviseurs avec magnétoscopes, le dernier kilomètre pourrait être un accès rapide à Internet ponté ou d'autres services télécoms.

Afin de développer les techniques de transmission, elles doivent être déterminées avec les moyens de simulations. Ces simulations nécessitent des modèles qui décrivent les caractéristiques des canaux CPL typiques avec peu de paramètres possibles. Des modèles qui facilitent les comparaisons des différentes techniques de transmission (modulation, technique d'accès, de correction d'erreur) dans un environnement de simulation qui doit être aussi réaliste que possible.

Les caractéristiques du canal peuvent être subdivisées en fonction de transfert  $H(f)$  et un bruit additif  $B(f)$ . Ces caractéristiques dépendent de la fréquence, l'heure et le lieu. Les mesures montrent que les caractéristiques du canal ne changent pas très rapidement dans le temps et la cohérence est grande par rapport à la durée du symbole typique. Ainsi, le canal peut être considéré comme quasi-stationnaire.

### 4.2 Caractéristiques du canal:

Les caractéristiques du canal de la ligne électrique montrent un comportement typique. L'impédance est très variable selon la fréquence et varie de quelques ohms à quelques kOhms, à certaines fréquences le réseau présente des pics de l'impédance caractéristique. À ces pics le réseau se comporte comme un circuit résonant parallèle. Dans la plupart des gammes de fréquence l'impédance présente un comportement inductif ou capacitif. L'impédance caractéristique d'un câble

Power line est typiquement dans la gamme de 90 Ohm. L'impédance n'est pas seulement influencée par l'impédance caractéristique, mais aussi par la topologie du réseau et des charges connectées.

Le spectre de bruit est fortement variant avec la fréquence et le temps. Il existe une dégradation globale du niveau de bruit en augmentant la fréquence. Le Bruit dans la ligne électrique est influencé par différentes sources. Il y a des perturbations à large bande, par exemple des moteurs universels et des perturbations à bande étroite, par exemple signaux HF-radio, alimentations...etc.

Une fonction de transfert mesurée comprenant un facteur de transfert de mesure et des caractéristiques de phase du canal (longueur d'environ 10 m). La fonction de transfert présente des encoches à bande étroite profondes, réparties sur la gamme de fréquences. Les angles de phase sont en baisse en augmentant la fréquence.

Les caractéristiques de phase montrent une non-linéarité qui conduit à des variations remarquables dans le retard. Il y'a beaucoup de facteurs qui contribuent à ce comportement. En outre, les charges qui montrent des impédances différentes ainsi qu'une multitude de discontinuités d'impédance, par exemple : des câbles de branchement, provoquent des réflexions et des échos. Ces effets conduisent à la propagation par trajets multiples et peuvent produire des encoches à bande étroite.

Dans ce qui suit nous présentons deux approches de modélisation des caractéristiques des canaux CPL dans la gamme de fréquences allant jusqu'à 30 MHz à l'intérieur des bâtiments. Pour la description des caractéristiques de transfert deux modèles ont été mis au point: un modèle de l'écho et un modèle de circuit de résonance série.

#### 4.2.1 Modèle *Echo*: [10]

Les Réflexions aux discontinuités d'impédance provoquent des échos du signal transmis. Ainsi, le canal CPL peut être considéré comme un environnement à trajets multiples. Chaque signal émis atteint le récepteur non seulement sur un chemin direct, mais aussi retardé et dans la plupart des cas atténué. De ce fait, un modèle écho a été élaboré.

Le récepteur reçoit des signaux via N voies. Sur le chemin  $v$  le signal est retardé par un retard  $\tau_v$  et atténué par le coefficient complexe  $\rho_v$ . Atténuation complexe de chaque chemin est:

$\rho_v = |\rho_v| * e^{j\varphi_v}$  Implique que:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{Im\{\rho_v\}}{Re\{\rho_v\}}\right)$$

La réponse impulsionnelle  $h(t)$  peut s'écrire suivant la somme des impulsions de Dirac qui sont multipliées par  $\rho_v$  et retardés par  $\tau_v$ :

$$h(t) = \sum_{v=1}^N |\rho_v| \cdot e^{j \cdot \varphi_v} \cdot \sigma(t - \tau_v)$$

La fonction de transfert  $H(f)$  est alors obtenue au moyen d'une transformation de Fourier de la réponse impulsionnelle:

$$H(f) = \sum_{v=1}^N |\rho_v| \cdot e^{j \cdot \varphi_v} \cdot e^{-j \cdot 2\pi \cdot f \cdot \tau_v}$$

$$H(f) = F\{h(t)\}$$

La fonction de transfert est composée d'une somme de sinus-cosinus et de l'onde des oscillations complexes qui ont un décalage de phase dépendant de la fréquence. En outre, chaque oscillation est atténuée et soumise à un décalage de phase constant.

Dans la figure 4. 10, le modèle d'écho dérivé est représenté. Chaque chemin est décrit par la réponse impulsionnelle  $h(t)$  provoquant un retard  $\tau_v$ , une atténuation  $|\rho_v|$  et un déphasage  $\varphi_v$ . Pour chaque voie 3 paramètres doivent être défini. Ainsi, le modèle avec  $N$  chemins est complètement décrit par  $3 \cdot N$  paramètres. Afin de réaliser une bonne corrélation entre mesuré et modélisé une optimisation très poussée des paramètres doit être effectuée. Afin de réduire la complexité de l'optimisation, une stratégie évolutive est utilisée qui minimise l'erreur quadratique moyenne et maximise la corrélation.

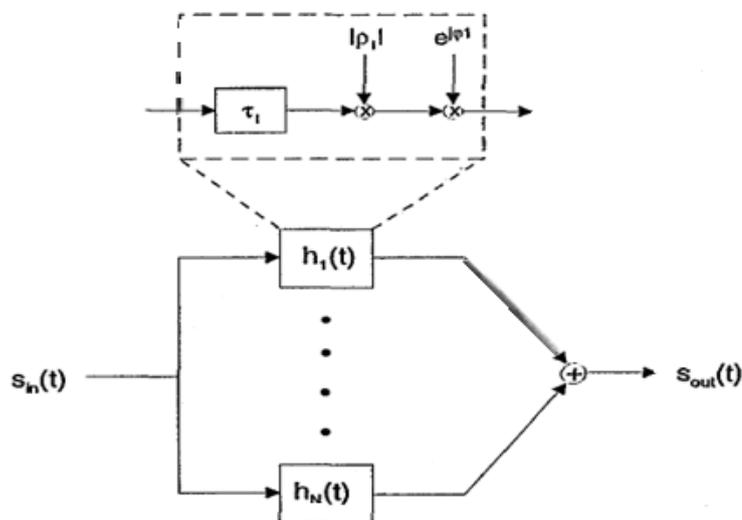


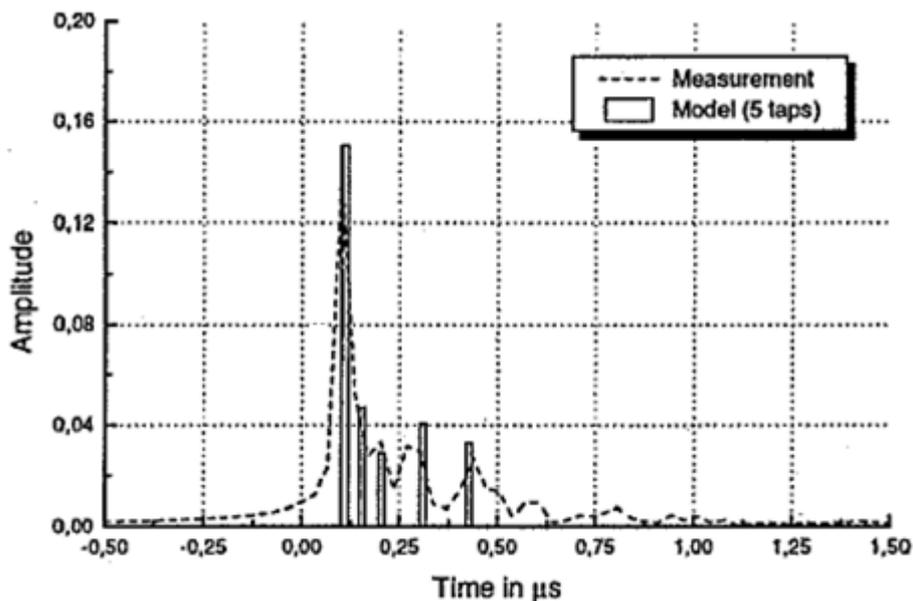
FIGURE 4. 10 : Model écho.

Un ensemble de paramètres du modèle qui en résulte est indiqué dans le tableau 4. 2.

N°	$ \rho $	$\varphi$ (rad)	$\tau$ ( $\mu\text{s}$ )
1	0.151	0.691	0.110
2	0.047	-0.359	0.154
3	0.029	0.591	0.205
4	0.041	2.913	0.311
5	0.033	1.012	0.427

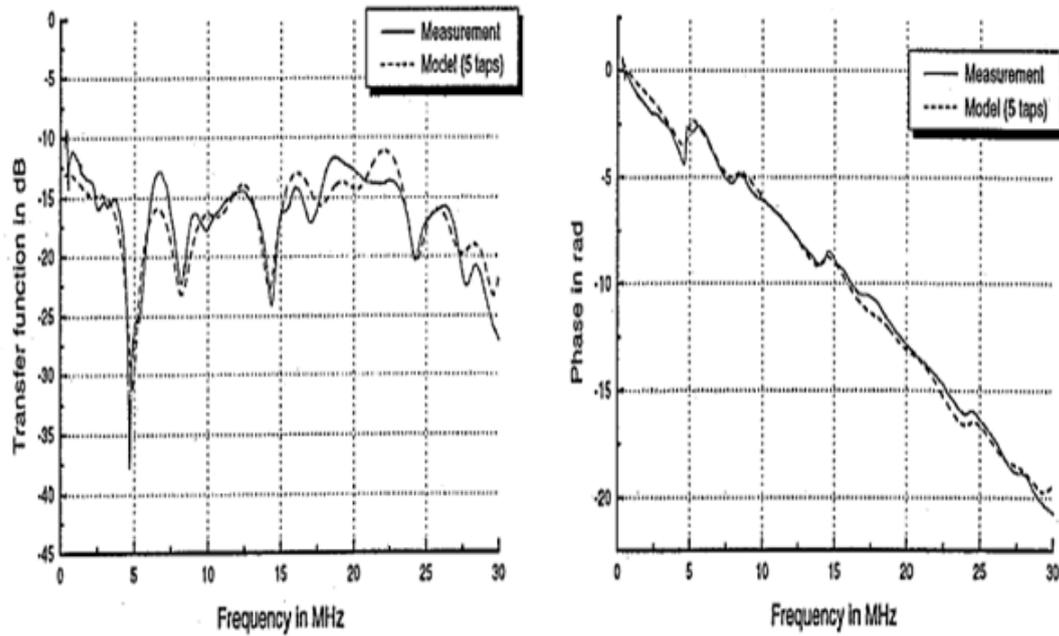
**Tableau 4. 2:** Ensemble de paramètres du modèle d'écho.

Dans la figure 4. 11 la réponse d'impulsion mesurée et la réponse impulsionnelle discrète du modèle sont représentées. Le premier pic a  $\tau = 110 \mu\text{s}$  est le pic principal et il est d'au moins 10 dB au-dessus des pics succédant. Dans une période de  $1 \mu\text{s}$  presque la quantité totale d'énergie de l'impulsion émise atteint le récepteur.



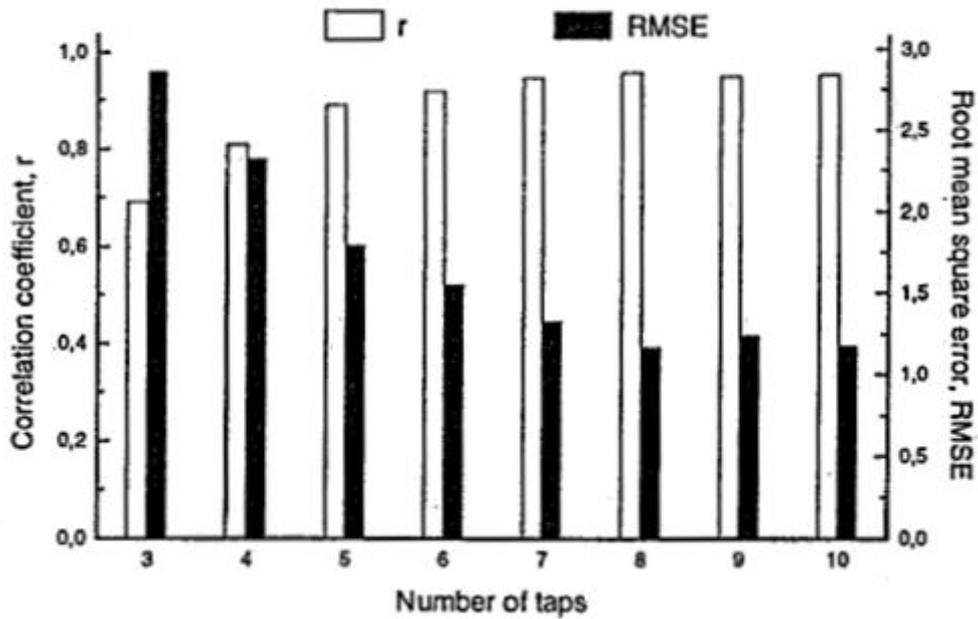
**FIGURE 4. 11:** mesures de la réponse impulsionnelle dans le model écho.

La mesure des caractéristiques du modèle (L'Amplitude et la phase) est représentée sur la Figure 4. 12. Les entailles profondes dans la fonction de transfert mesurée sont copiées assez exactement par le modèle. Les courbes de la fonction de transfert montrent une bonne corrélation par le facteur  $r = 0,89$ . La corrélation entre les caractéristiques de phase est encore mieux ( $r = 0,99$ ). L'erreur quadratique du facteur de transfert est d'environ 1,8 dB, l'une des caractéristiques de phase est d'environ 0,37 rad. Bien que seulement 5 entailles aient été utilisées, le modèle est en accord avec la mesure.



**FIGURE 4. 12:** mesure des caractéristiques de la fonction du transfert du model écho.

Afin d'évaluer l'influence du nombre d'entailles sur l'adéquation entre la mesure et le modèle, une optimisation a été réalisée pour un nombre différent d'entailles (entre 3 et 10), Pour chacun de ces optimisations le coefficient de corrélation et l'erreur quadratique moyenne (RMSE) entre et la fonction de transfert mesurée et modélisée ont été déterminés et représentés (Figure 4. 13). En général, il y a une diminution de la RMSE et une augmentation de la corrélation avec la croissance du nombre d'entailles. Dans le cas présent, un modèle avec 5 entailles conduit à des résultats assez bons. Comme la procédure de recherche utilise des méthodes statistiques les résultats obtenus ne sont pas nécessairement optimales. C'est pourquoi, le résultat de 8 entailles est meilleur que celui des 9 et 10 entailles.

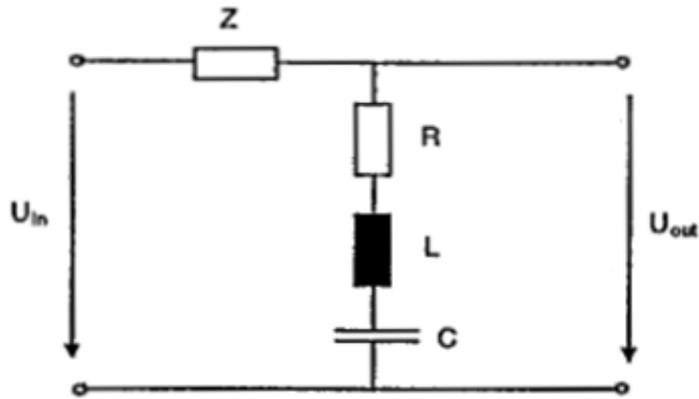


**FIGURE 4. 13:** corrélation et erreur quadratique moyenne de la fonction du transfert en fonction des nombres d'entailles.

#### 4.2.2 Modèle de circuit série résonant:[10]

Les mesures d'impédance des charges électriques ont montré que dans de nombreux cas, ces charges peuvent être décrites par un ou plusieurs circuits résonnants série qui se composent de résistance  $R$ , capacité  $C$  et inductance  $L$ . Comme de nombreux appareils intègrent des condensateurs antiparasites à leur entrée et possèdent une ligne qui a une résistance et une partie inductive de l'impédance cette approche est en étroite correspondance avec l'alimentation réaliste, depuis des charges qui sont souvent très éloignées les unes des autres et qu'elles ne s'influencent pas mutuellement. Par conséquent, un canal CPL peut être décrit comme une cascade de circuits résonnants série découplés (SRC).

La figure 4. 14 représente un circuit résonnant série connecté à une ligne d'impédance  $Z$ .



**FIGURE 4. 14:** Circuit résonnant série

L'impédance des Zs circuits résonant est dépendante de la fréquence et peut être décrite par:

$$Z_s(f) = R + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L + \frac{1}{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

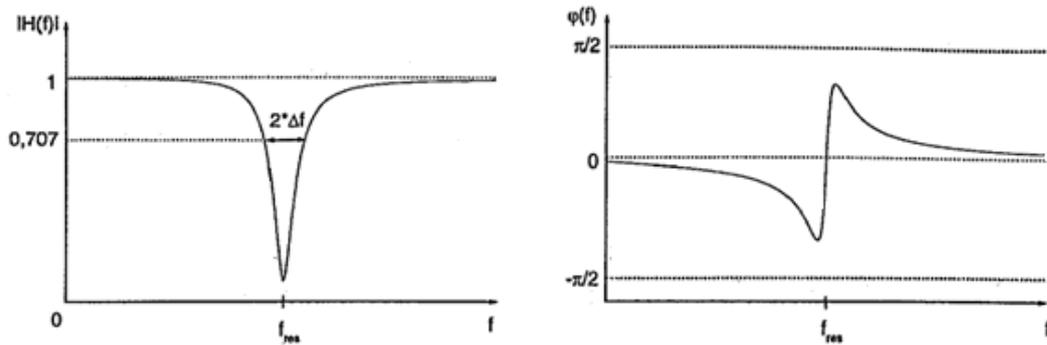
L'impédance est minimale avec une partie imaginaire de l'impédance égale à zéro et une partie réelle égale à R. La fonction de transfert H (f) est:

$$H(f) = \frac{1}{1 + \frac{Z}{Z_s(f)}}$$

La fonction de transfert résultante est représentée sur la Figure 4. 15. Une entaille dans les caractéristiques d'amplitude peut être vue à la fréquence de résonance, à des fréquences inférieures et supérieures, la fonction de transfert est presque 1. La profondeur de l'entaille dépend de la résistance R et l'impédance Z. La qualité Q du circuit résonnant est définie par  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ -largeur (égal  $2 \cdot \Delta f$ , voir figure 4. 13.) de la courbe  $|H(f)|$  est égal à:

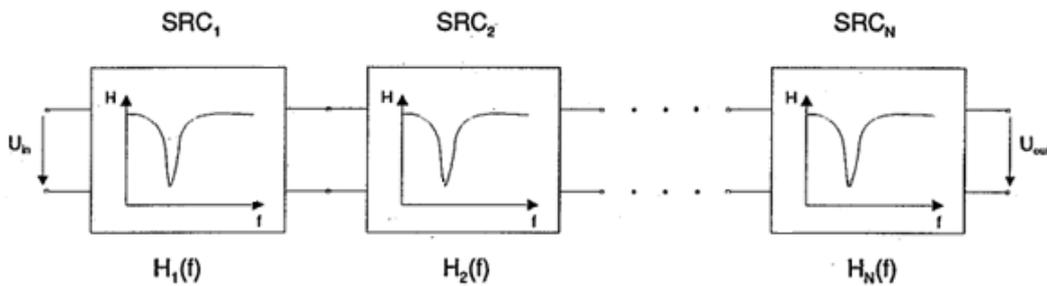
$$Q = \frac{f_{res}}{2 \cdot \Delta f} \text{ implique que } Q = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Q est une fonction de la largeur de l'entaille. Á l'entaille la plus étroite Le Q est supérieur. Les caractéristiques de phase montrent une hausse de la fréquence de résonance. À des fréquences inférieures, l'impédance des Zs circuits résonants est capacitive et à des fréquences plus élevées elle est inductive.



**FIGURE 4. 15:** caractéristiques d'un circuit série résonnant (amplitude et phase).

La fonction de transfert du canal de courant porteur en ligne est modélisée comme une cascade de N circuits résonnants série découplés. Un schéma de principe de ce modèle est représenté dans la figure 4. 16.



**FIGURE 4. 16:** Modèle de circuit série résonnant

Chaque circuit résonnant est décrit par une fonction  $H_i(f)$ . La fonction de transfert globale  $H(f)$  résultante est:

$$H(f) = \prod_{i=1}^N H_i(f)$$

Chaque circuit résonnant peut être décrit par trois paramètres: la résistance R, l'inductance L et la capacité C. En outre, l'impédance Z doit être définie. Dans ce cas l'impédance a été fixée à 90 Ohm (correspondant à sa propre mesure). Afin d'ajuster un modèle avec N circuits résonnants à une fonction de transfert mesurée,  $3 * N$  paramètres doivent être optimisés.

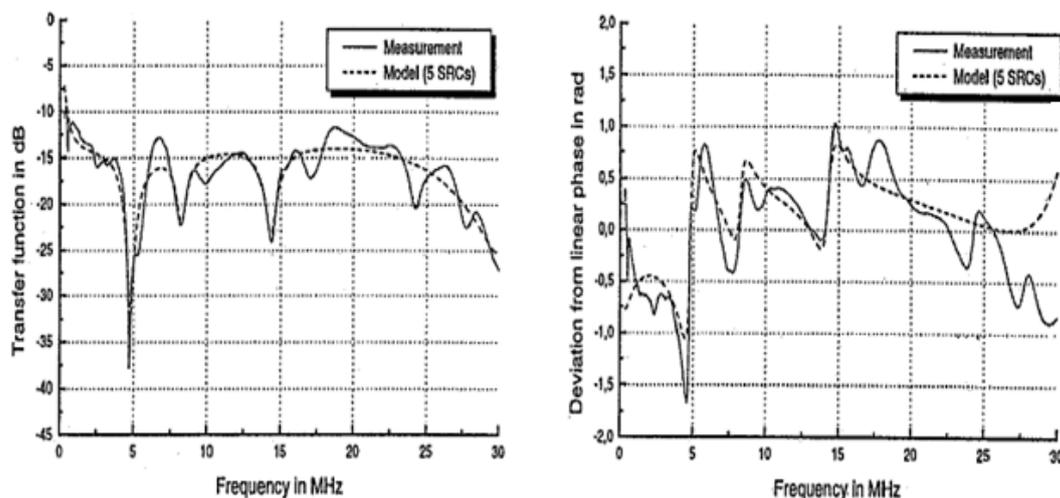
Un ensemble de paramètres du modèle à cinq circuits résonnants en série pour une fonction de transfert mesurée (même canal que dans la figure 4. 12) a été

déterminée au moyen d'une stratégie d'évolution. Les Valeurs des paramètres et des fréquences de résonance sont indiqués dans le Tableau 4. 3.

N°	R (Ohm)	L ( $\mu$ H)	C (nF)	fres(MHz)	Q
1	21.4	0.137	10.8908	4.122	0.165
2	12.1	8.264	0.1334	4.793	20.640
3	67.9	18.919	0.0197	8.238	14.431
4	46.4	11.948	0.0103	14.324	23.183
5	19.6	1.008	0.0273	30.357	9.799

**Tableau 4. 3:** Ensemble de paramètres du modèle SRC

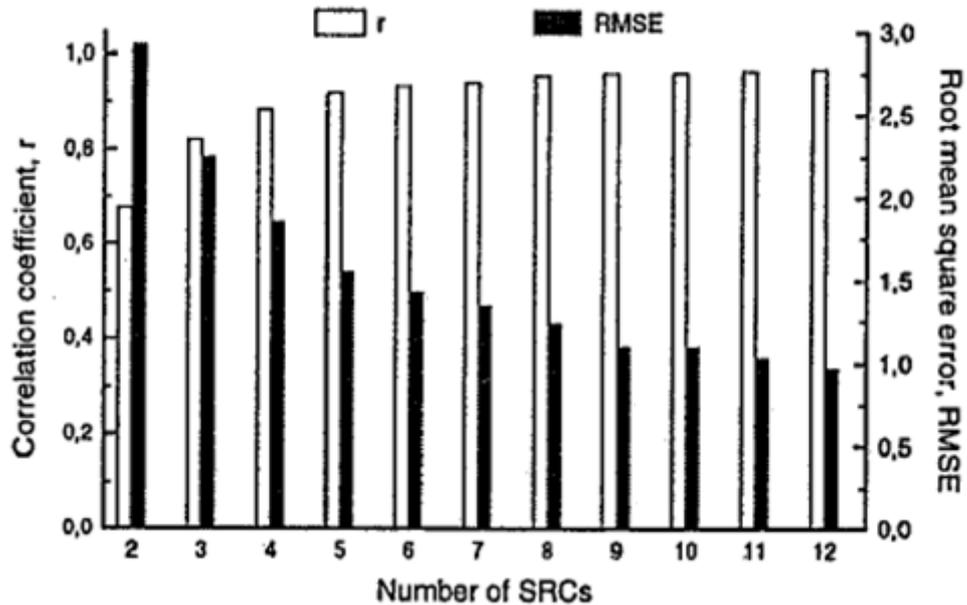
La fonction de transfert résultante du modèle est représentée sur la Figure 4. 17. Les trois entailles plus profondes sont représentées par un circuit résonant. Un autre circuit résonnant provoque la diminution de la fonction de transfert à des fréquences basses. Le dernier circuit résonnant à environ 30 MHz est la raison de la baisse dans les hautes fréquences. Il existe une corrélation de  $r = 0,92$  signifie une erreur quadratique moyenne de 1,6 dB. Ces valeurs sont légèrement supérieures à celles du modèle d'écho avec 5 entailles. Les caractéristiques de phase montrent un écart par rapport à la phase linéaire. Comme le modèle ne prend pas le temps de propagation des signaux en considération, les caractéristiques de phase ne diminuent pas avec la fréquence et la durée de transmission. Une pente croissante peut être vue dans les caractéristiques de phase à la fréquence de résonance. Les courbes ont une corrélation de  $r = 0,76$  et une moyenne quadratique de 0,38 rad. Même avec seulement 5 circuits résonnants série une bonne conformité entre la mesure et le modèle a été obtenu.



**FIGURE 4. 17:** Les caractéristiques de la fonction du transfert du modèle SRC.

Dans le but d'estimer l'influence du nombre de circuits résonnants série sur la performance du modèle, sur la Figure 4. 18 le coefficient de corrélation et l'erreur quadratique moyenne sont représentés pour différents nombres (entre 2 et 12) des

circuits résonnants. Il peut être vu que par un nombre croissant de circuits résonnants le coefficient de corrélation est en augmentation et cela signifie que l'erreur quadratique est en baisse. Plus le nombre de circuits résonnants est grand, plus la pente est la plus petite



**FIGURE 4. 18:** Corrélation et RMSE de la fonction de transfert En fonction du nombre de SRCs

Une extension est possible du modèle de la figure 5. 16 pourrait prendre la longueur du câble en considération. Pour cela, un déphaseur pourrait être ajouté au modèle.

### 4.3 Conclusion:

On a présenté dans ce chapitre les caractéristiques du canal CPL, et nous avons étudié deux modèles :

Le modèle **ECHO** et **le circuit série résonnant**.

Les deux modèles s'avèrent après optimisation des paramètres assez proches des mesures.

## Conclusion générale et perspectives:

Le Courant Porteurs en Ligne est une nouvelle technologie réseau qui émerge. La mise en place d'un réseau CPL est rapide et peu coûteuse dans la mesure où il utilise le réseau électrique existant pour transporter des données ; toutes les prises électriques devient alors un accès potentiel au réseau.

Les solutions CPL peuvent être vues comme des solutions complémentaires ou alternatives aux réseaux filaires traditionnels, aux réseaux sans fils et au VDSL.

Suivant les architectures des réseaux existants, des bâtiments ou des contraintes techniques, l'une ou l'autre des solutions peut être choisie, mais l'on peut également envisager de les utiliser conjointement en utilisant leur complémentarité et les avantages propres à chacune.

Les débits des solutions CPL sont amenés à augmenter et ce en Indoor comme en Outdoor.

La spécification Homeplug AV notamment est à l'étude pour diffuser des canaux de télé numérique pour les architectures Indoor.

De nombreux projets de recherche portent sur ces solutions et leurs évolutions, tout est à venir, il faut donc suivre de près les informations sur le sujet !

Notre travail constitue un point de départ d'un vaste projet sur le CPL, ainsi nous avons commencé par un bref historique des technologies CPL, nous avons par la suite étudié les différentes technologies des courant porteurs en ligne, en abordant les aspects de modulation, de réglementation et de standardisation, ainsi que les caractéristiques du canal de transmission.

Un des avantages et aussi inconvénients d'un dispositif CPL est l'utilisation des câbles de transport et distribution de l'énergie électrique, ainsi nous avons présenté de manière non exhaustive les caractéristiques et modélisations du réseau électrique et équipements rattachés à ce dernier.

Finalement nous abordons la modélisation du canal CPL proprement dite, en étudiant deux modèles :

- le modèle **echo** qui prend en considération l'aspect des multi-trajets engendré par des discontinuités d'impédance le long du canal,
- le modèle **circuit série résonant**, qui considère le réseau électrique comme une cascade de circuits résonants constitués de résistances, capacités et inductances.

Chacun des deux modèles dépend de trois paramètres, qu'il a fallu optimiser. Les deux modèles s'avèrent assez proches des mesures.

Comme suite et perspectives à ce travail nous avons abordé la modélisation du canal CPL pour procéder à l'optimisation d'une chaîne de transmission en utilisant la modulation OFDM.

On a considéré notre canal CPL comme un environnement á multi trajets, ensuite on a utilisé le logiciel matlab pour le faire programmer.

L'adaptation du canal CPL à notre chaine de transmission est un problème qu'on veut bien le résoudre durant notre recherche, ce qu'on a commencé de faire est de caractériser notre canal suivant matlab mais le problème d'adaptation est toujours présent.

Dans l'avenir on voudra bien améliorer notre travail pour y arriver a notre objectif qui est :

L'adaptation du canal CPL.

## Les références:

- [1] Site Defidev.com-Publié en Novembre 2003- "Définition du CPL".
- [2] Site Net territorial.weka.fr "les courants porteurs en ligne : une solution haut débit pour les collectivités locales "
- [3] Site de référence à consulter (technologie, actualités,...etc.) <http://CPL-France.org>
- [4] <http://www.erdfdistribution.fr>
- [5] Xavier Carcelle- Réseaux CPL par la pratique- ÉDITIONS EYROLLES. Paris : EYROLLES, 2006. N° d'éditeur : 7373
- [6] directive 89/336 Compatibilité ElectroMagnétique
- [7] Partie du réseau public de distribution d'électricité qui regroupe les clients d'un même réseau moyenne tension.
- [8] <http://www.homeplug.org/>
- [9] <http://www.cpl-france.org>
- [10] Philipps, H., "Modelling of Powerline Communication Channels", Proceedings of the 1999 International Symposium on Power-Line Communications (ISPLC '99), Lancaskr, UK, MarchApril 1999, p. 14-21



**INTRODUCTION GENERALE**



# CHAPITRE 1: HISTORIQUE

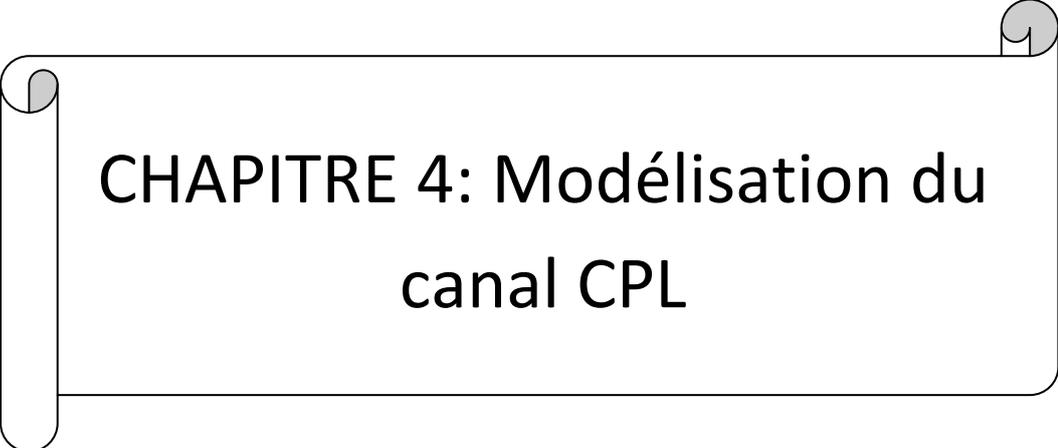


# CHAPITRE 2:LA TECHNOLOGIE

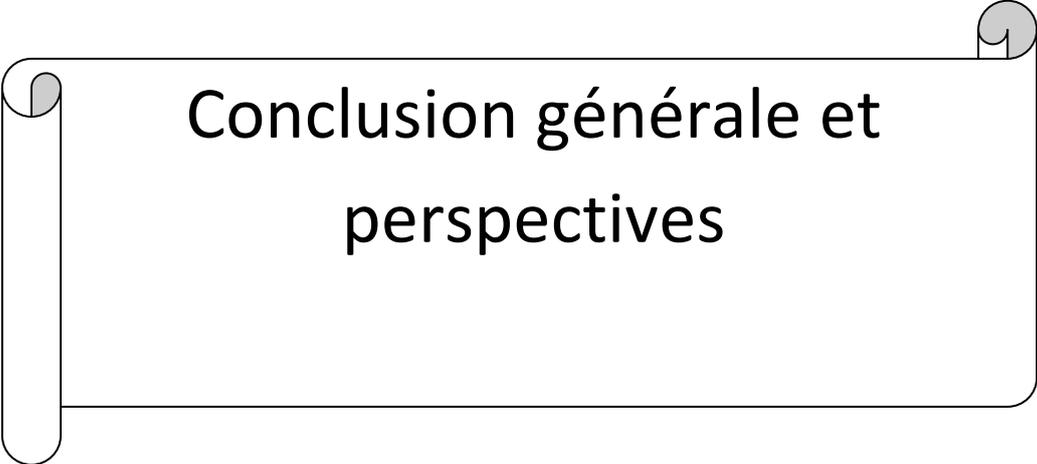
## CPL



**CHAPITRE 3: LE RESEAU  
ELECTRIQUE**



## CHAPITRE 4: Modélisation du canal CPL



Conclusion générale et  
perspectives



Les références

## **Glossaire :**

CPL : courant porteur en ligne

PLC: Power Line Carrier

EDF : Électricité de France

PLCA: Power Line Communication Association

OFCOM : Office Fédéral de la Communication.

Opera: Open PLC European Research Alliance

ART: Agence de régulation des télécommunications

QoS: Qualité de service (Quality of service)

VLAN: Vertical Local Area Network

IEEE: Institute of electrical and Electronics Engineers

CPL HPP: CPL Home plug power

CPL UPA: CPL Universal Power line Association

CPL CEPCA: CPL Consumers electronics power line communication alliance

ERDF: Electricité Réseau Distribution France

xDSL: xDigital subscriber line

ADSL : Asymmetric Digital Subscriber Line

PLT : PowerLine Telecommunications

BPL : Broadband over PowerLine

IP : Internet Protocol

Wifi : wireless fidelity

LAN : Local Area Network

DRM : Digital rights management

RTE : Réseau de transport d'Electricité

Cenélec : Comité Européen de normalisation Electrotechnique

MT : Moyenne Tension

BT : Basse Tension

CEM : Compatibilité ElectroMagnétique

OSI : Organisation Internationale Standardisation

PHY : physique

MAC : Media Access Control address

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing.

TVHD : High-definition television

SNR : Signal to Noise Ratio

EMC : Electro-Magnetic Compatibility

CEI: Commission Électronique Internationale

ETSI : European Telecommunications Standards Institute

ITU : International Telecommunication Union

ISRIC: International Special Radio Interference Committee

RTC: Réseau Téléphonique Commuté

EMTP: Electromagnetique Transients Program

HTB: High tension B

HTA: High tension A

HT: high tension

THT: Through-hole technology

SS: Spread Spectrum.

DSLAM: digital subscriber line access multiplexe

DSL: Digital subscriber line

ISRIC: International Special Radio Interference committee



## Les symboles :

Z : L'impédance.

L : L'inductance.

$\Phi$  : flux électrique

I : courant électrique

f : fréquence

C : La capacité

v : potentiel électrique

u : la tension

R : la résistance

Zc : l'impédance moyenne

s: la section du câble électrique

$\rho v$ : Atténuation complexe

h(t) : La réponse impulsionnelle

$\tau$ : *le retard*

$\varphi$ : *déphasage*

t : le temp

H (f) : La fonction de transfert

r : le facteur de corrélation

Q : qualité du circuit résonnant



## Liste des figures

<i>Figure 2. 1</i> Principe du courant porteur en ligne.....	7
<i>Figure 2. 2</i> L'architecture du réseau de distribution électrique.....	9
<i>Figure 2. 3</i> Le réseau d'accès CPL. ....	10
<i>Figure 2. 4</i> Bandes de fréquences utilisées par les réseaux CPL. ....	14
<i>Figure 2. 5</i> Réseau Outdoor du courant porteur en ligne. ....	16
<i>Figure 2. 6</i> Réseau Indoor du courant porteur en ligne -SFR PLC Coupling units LEA 200 Mb. ....	17
<i>Figure 2. 7</i> perturbation du signal, l'atténuation et la distorsion.....	18
<i>Figure 3. 8</i> Impédances moyennes d'une ligne électrique en fonction de la fréquence .....	27
<i>Figure 3. 9</i> Circuit schématique d'une ligne électrique selon le modèle de Downey et Sutterlin .....	28
<i>Figure 4. 10</i> Model écho. ....	32
<i>Figure 4. 11</i> mesures de la réponse impulsionnelle dans le model écho.....	33
<i>Figure 4. 12</i> mesure des caractéristiques de la fonction du transfert du model écho.....	34
<i>Figure 4. 13</i> Corrélation et erreur quadratique moyenne de la fonction du transfert en fonction des nombres d'entailles. ....	35
<i>Figure 4. 14</i> Circuit résonnant série. ....	35
<i>Figure 4.15</i> caractéristiques d'un circuit série résonnant (amplitude et phase).....	36
<i>Figure 4. 16</i> Modèle de circuit série résonnant.....	37
<i>Figure 4. 17</i> Les caractéristiques de la fonction du transfert du modèle SRC. ....	38
<i>Figure 4. 18</i> Corrélation et RMSE de la fonction de transfert En fonction du nombre de SRCs.....	39

## Liste des tableaux

*Tableau 3. 1* Atténuation des principaux équipements électriques d'un réseau électrique ..... 25

*Tableau 4. 2* Ensemble de paramètres du modèle d'écho ..... 33

*Tableau 4. 3* Corrélation et erreur quadratique moyenne de la fonction du transfert en fonction des nombres d'entailles. .... 38

# Table des matières

<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 Historique</b> .....	<b>3</b>
1.1 Introduction .....	3
1.2 Historique de la technologie CPL .....	3
1.3 Conclusion.....	4
<b>Chapitre 2 La technologie courant Porteur en Ligne (CPL)</b> .....	<b>5</b>
2.1 Introduction .....	5
2.2 C'est quoi le CPL? .....	5
2.3 Principe de fonctionnement.....	6
2.4 La transmission de l'information sur les lignes électriques .....	8
2.5 Le rayonnement des réseaux CPL .....	11
2.6 Le standard Home Plug.....	12
2.7 Spectre des offres CPL .....	13
2.8 Fréquences utilisées dans les systèmes CPL .....	13
2.9 Canal de transmission.....	14
2.9.1 Le marché Outdoor.....	15
2.9.2 Le marché Indoor .....	16
2.10 Avantages et inconvénients des CPL.....	17
2.10.1 Avantages des CPL.....	17
2.10.2 inconvénients des CPL .....	18
2.11 Techniques des modulations.....	18
2.11.1 La modulation OFDM .....	19
2.11.2 La modulation SS .....	20
2.12 Conclusion.....	20
<b>Chapitre 3 Le réseau électrique</b> .....	<b>21</b>
3.1 Introduction .....	21

3.2	Caractéristique du câble électrique .....	<b>21</b>
3.2.1	Impédance.....	21
3.2.2	Capacité et inductance .....	21
3.2.3	Bruits et perturbations électromagnétiques .....	23
3.2.4	Atténuation .....	24
3.2.5	Couplage entre phases .....	25
3.2.6	Réponse fréquentielle .....	25
3.2.7	Sensibilité des interfaces .....	25
3.3	Modélisation des réseaux électriques .....	26
3.3.1	Modélisation des équipements électriques sur le réseau .....	<b>28</b>
3.4	Conclusion.....	<b>29</b>
<b>Chapitre 4</b>	<b>Modélisation du canal CPL .....</b>	<b>30</b>
4.1	Introduction .....	<b>30</b>
4.2	Caractéristiques du canal .....	<b>30</b>
4.2.1	Modèle Echo.....	<b>31</b>
4.2.2	Modèle de circuit série résonant.....	<b>35</b>
4.3	Conclusion.....	39
	<b>Conclusion générale et perspectives.....</b>	<b>40</b>
	<b>Les référence.....</b>	<b>42</b>