

P0021/05B

*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**

Département de Génie Electrique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

*Projet de fin d'études*

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en Automatique

**Implantation d'un réseau PLC de  
ville**

Dirigé par :  
M<sup>r</sup>. O.STIHI

Etudié par:  
M<sup>lle</sup>. TOUADI Nacera  
M<sup>lle</sup>. IABBASSEN Nabila

*Soutenu le 26 Juin 2005*

Année Universitaire 2004 / 2005

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE 10 AVENUE HASSEN BADI  
EL-HARRACH - ALGER.

## *Remerciements*

---

*Ce travail n'aurait pu se faire seul ! Ce sont les compétences, la disponibilité, le dynamisme, la bonne humeur et la patience de chacun, qui nous ont permis de poursuivre nos études et d'achever ce mémoire dans les meilleures conditions. C'est pourquoi nous tenons chaleureusement à remercier ici toutes les personnes qui ont contribué de loin comme de près pour achever ce modeste travail.*

*Nous tenons à remercier nos enseignants du département Génie Electrique qui ont contribué à notre formation durant notre cursus universitaire, à qui l'on doit tout nos respects. En particulier notre directeur de thèse M<sup>r</sup> O.STIHI, qui nous a encouragées.*

*Nous remercions également, la SONELGAZ pour leur collaboration en particulier M<sup>r</sup> AKAM, M<sup>lle</sup> F.WALLI, M<sup>r</sup> TOUAHRIA, M<sup>r</sup> O.BOUCHAIB*

*Nous n'oublions pas de remercier le personnel de la bibliothèque.*

*Nous profitons de l'auditoire qui nous est offert pour adresser un grand merci à nos parents qui se sont sacrifiés pour notre réussite et pour le bon déroulement de notre cursus universitaire.*

## DEDICACES



*C'est avec beaucoup de reconnaissance que je dédie  
ce modeste travail*

*A*

*Mes très chers parents qui se sont sacrifié toute leur vie pour que je réussisse  
dans mon cursus scolaire et universitaire.*

*Mon frère Said , ma sœur Nezha, et Tarik.*

*Ma chère binôme : Nabila.*

## DEDICACES

---



*Je dédie ce travail aux êtres les plus chers à mes yeux, à ceux qui ont su m'inculquer le sens de la vie et ses valeurs, ceux qui ont suscité en moi le noble besoin de toujours aller plus loin, ceux dont l'amour, la foi et le soutien me tiennent en confiance et m'encouragent à aller de l'avant : à mes parents Ali et Djaouida.*

*Je dédie ce travail à mes très chers frères : Aziz et Said, et à mes très chères soeurs : Zabia, et Dalila.*

*Aux sources de force d'amour et de fidélité, ce qui ont toujours répondu dans le besoin, emblème amitié, aux grands coeurs, pour leurs encouragements morales : mes amies : Ibtissem , Hayet, à mon amie Khaoula et toute sa famille surtout sa mère Habiba.*

*A ma chère binôme : Nacera.*

## Abréviations :

ACK :Acknowledge  
ADSL : Asymmetric Digital Subscriber Line  
AMR : Automatic Meter Reading  
ARQ : Automatic Request  
AU: Access Unit  
BDB : Bande de Base  
BLE : Boucle Locale Electrique  
BS: Base Station  
BOM : Begining Of Message  
BT: Basse Tension  
CDMA : Code Division Multiple Access  
CEM : Compatibilité Electro-Magnétique  
COM : Continuing Of Message  
CSMA-CA : Carrier Sense Multiple Access – Collision  
CSMA-CD : Carrier Sense Multiple Access – Collision Detect  
CTS : Clear To Send  
DS : Direct Sequence  
DIFS : Distributed Inter Frame Space  
DES : Data Encryption Standard  
EOM : End Of Message  
ETTD : Equipement Terminal de Transmission de Donnée  
ETCD : Equipement Terminal du Circuit de Donnée  
FEC : Forward Error Correction  
FH : Frequency Hop  
FT : Fonction de Transfert  
HF : Haute Fréquence  
LAN : Local Area Network  
LLC : Logical Link Control  
MAC : Media access Control  
MAN : Metropolitan Area Network  
MT : Moyen Tension  
M-ASK : Modulation –Amplitude Shift Keying  
M-PSK : Modulation –Phase Shift Keying  
M-FSK : Modulation –Frequency Shift Keying  
NAK : Negative Acknowledgement  
NRZ : Non Return to Zero

OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OSI : Open System Interconnection

PLC : Power Line Communication

PSTN :

PVC : Polychlorure de Vinyle

QAM : Quadrature Amplitude Modulation

QPSK : Quadrature Phase Shift Keying

QoS : Quality of Service

RLD :Réseau Longue Distance

RLE : Réseau Local Electrique

RM : Réseau Metropliteain

RTS : Ready To Send

SAP : Service Access Point

SNR : Signal Noise Ratio

SS: Spread Spectrum

SSM : Simple Segment of Message

TCP/IP :

TEM : Electro-Magnétique

TDMA : Time division multiple access

WAN : Wide Area Network

## Notation :

$v(z,t)$  : La tension du signal instantanée.

$i(z,t)$  : Le courant du signal instantané.

$R$  : La résistance par unité de longueur pour les deux conducteurs ( $\Omega/m$ ).

$z$  : Les emplacements .

$t$  : Temps.

$G$  : L'admittance par unité de longueur ( $S/m$ ).

$C$  : La capacité générée par les deux conducteurs par unité de longueur ( $F/m$ ).

$\omega$  : La pulsation du signal.

$\gamma$  : La constante de propagation.

$\alpha$  : La constante d'atténuation ( $dB/m$ ).

$\beta$  : La constante de phase ( $rad/m$ ).

$\tau$  : Le groupe retard ( $s/m$ ).

$A$  : Section transversale uniforme d'un conducteur.

$a$  : Le rayon de l'âme conductrice en ( $m$ ).

$b$  : La distance entre le centre de l'âme conductrice et l'écran en ( $m$ ).

$f$  : La fréquence d'onde en ( $Hz$ ).

$\mu$  : La perméabilité magnétique du matériel conducteur exprimée en ( $m.kg^{-2}.C$ ).

$\varepsilon$  : La permittivité absolue du matériel isolant entre l'âme et l'écran exprimée en ( $m^{-3}kg^{-1}s^2C^2$ ).

$\rho$  : La résistivité du conducteur en ( $\Omega m$ ).

$g_i$  : Le facteur d'atténuation complexe pour le trajet  $i$ .

$h(t)$  : La réponse impulsionnelle du canal.

$H(s)$  : La transformée de Laplace du canal.

$\Gamma_{BT}$  : Le coefficient de réflexion du point terminale 4 de la branche.

$\Gamma_{PJ}$  : Le coefficient de réflexion du câble de distribution.

$\Gamma_{BJ}$  : Le coefficient de réflexion du câble de dérivation.

$T_{PJ}$  : Le coefficient de transmission du câble de distribution.

$T_{BJ}$  : Le coefficient de transmission du câble de dérivation.

$v_p$  : La vitesse de phase.

$L_{lk}$  : La longueur du  $l^{ème}$  chemin d'un  $k^{ème}$  canal de transmission.

$D$  : La propagation dans un câble de longueur correspondant au pas  $L_i$  du segment.

$N_p$  : Le nombre de chemins pris en considération.

$\{\lambda_{jk}\}$  : sont les la pondérations des chemins dont le nombre est infini.

$\{g_{lk}\}$  : Les pondérations du  $l^{ème}$  chemin d'un  $k^{ème}$  canal de transmission.

$trI$  : Le segment qu'on veut étudier.

$LO$  : Le pas de calcul des trajets.

$v$  : La fréquence pour la quelle on implémente des répéteurs.

$Nu$  : La taille du segment.

$h$  : Le vecteur FT des différentes stations après placement des répéteurs à la fréquence  $v$ .

$n$ ,  $h2$  et  $m$  : Variables internes.

$nbrep$  : Nombre des répéteurs.

$t$  : Le numéro de la station dans le segment.

$freq$  : Le vecteur des fréquences utilisé pour simuler les différentes fonctions de transfert après emplacement des répéteurs.

## Sommaire





## INTRODUCTION GENERALE

2

## CHAPITRE I

## Généralités sur les réseaux informatiques

|  |    |
|--|----|
| <b>I.1.</b> Introduction               | 5  |
| <b>I.2.</b> Définitions                | 5  |
| <b>I.3.</b> Classification Des Réseaux | 6  |
| <b>I.4.</b> Topologies Des Réseaux     | 8  |
| <b>I.5.</b> Architecture Des Réseaux   | 9  |
| <b>I.5.1.</b> Structure En Couches     | 9  |
| <b>I.5.2.</b> Le Protocole             | 9  |
| <b>I.5.3.</b> L'Architecture OSI       | 10 |
| <b>I.5.3.1.</b> La couche physique     | 10 |
| I.5.3.1.a. Le codage                   | 10 |
| I.5.3.1.b. La modulation               | 10 |
| I.5.3.1.c. La transmission             | 13 |
| I.5.3.1.d. Sens de la transmission     | 14 |
| I.5.3.1.e. Le multiplexage             | 14 |
| I.5.3.1.f. Le débit                    | 15 |
| <b>I.5.3.2.</b> La couche Liaison      | 16 |
| I.5.3.2.a. La sous-couche LLC          | 16 |
| I.5.3.2.b. La sous-couche MAC          | 16 |
| <b>I.5.3.3.</b> La couche Réseau       | 16 |
| <b>I.5.3.4.</b> La couche Transport    | 16 |
| <b>I.5.3.5.</b> La couche Session      | 17 |
| <b>I.5.3.6.</b> La couche Présentation | 17 |
| <b>I.5.3.7.</b> La couche Application  | 17 |
| <b>I.6.</b> Conclusion                 | 17 |

## CHAPITRE II

## Les caractéristique du réseau électrique en HF

|  |    |
|--|----|
| <b>II.1.</b> Introduction  | 19 |
| <b>II.2.</b> Présentation  | 19 |
| <b>II.3.</b> La distorsion   | 20 |
| <b>II.4.</b> L'atténuation   | 21 |
| <b>II.5.</b> Le rayonnement  | 22 |
| <b>II.6.</b> Les sources de bruit                                      | 23 |
| <b>II.6.1.</b> Le bruit stationnaire                                   | 23 |
| <b>II.6.1.a.</b> Bruit coloré  | 23 |
| <b>II.6.1.b.</b> Bruit bande étroite                                   | 23 |
| <b>II.6.2.</b> Le bruit impulsif                                       | 23 |
| <b>II.6.2.a.</b> Bruit périodique synchrone à la fréquence du secteur  | 23 |
| <b>II.6.2.a.</b> Bruit périodique asynchrone à la fréquence du secteur | 23 |
| <b>II.6.2.a.</b> Bruit apériodique asynchrone                          | 23 |
| <b>II.7.</b> classification des bruits                                 | 24 |

|  |    |
|--|----|
| II.7.1. Le bruit de fond                         | 24 |
| II.7.2. Le bruit impulsif                        | 25 |
| II.7.2.1. La densité spectrale d'énergie         | 26 |
| II.7.2.2. Les caractéristiques du bruit impulsif | 26 |
| II.8. Conclusion                                 | 28 |

## CHAPITRE III La Technologie PLC

|   |    |
|---|----|
| III.1. Introduction                                     | 30 |
| III.2. Principe   | 30 |
| III.2.1. Définition                                     | 30 |
| III.2.2. L'Architecture En Couches Des PLC              | 30 |
| III.3. Les Techniques De Modulation                     | 31 |
| III.3.1. Spread Spectrum (SS)                           | 31 |
| III.3.1.1. Principe                                     | 31 |
| III.3.1.2. Les types de modulation SS                   | 33 |
| III.3.1.2.a. Séquence Directe (DS-SS)                   | 33 |
| III.3.1.2.b. Saut De Fréquence (FH-SS)                  | 33 |
| III.3.2. Orthogonal Frequency Division Multiplexing     | 34 |
| III.3.2.1. Orthogonalité fréquentielle                  | 34 |
| III.3.2.2. Méthodes d'annulation des interférences      | 35 |
| III.3.2.2.a. Interférence entre symboles                | 35 |
| III.3.2.2.b. Interférence entre sous canaux             | 36 |
| III.3.3. Comparaison Des Techniques De Modulation       | 37 |
| III.4. La Couche MAC (Media Access Control) dans la PLC | 38 |
| III.4.1. la structure physique du réseau PLC            | 39 |
| III.4.2. Le modèle du réseau                            | 39 |
| III.4.3. La spécification du service de la couche MAC   | 40 |
| III.4.4. La couche MAC dans les systèmes PLC basés OFDM | 40 |
| III.4.5. Analyse des protocoles MAC pour la PLC         | 42 |
| III.4.6. Méthodes D'Accès Au Média                      | 42 |
| III.4.6.1. CSMA/CA                                      | 42 |
| III.4.6.2. Polling                                      | 43 |
| III.4.6.3. Le jeton de passage (Token Passing)          | 43 |
| III.4.6.4. TDMA (Time division multiple access)         | 44 |
| III.4.7. Les Mécanismes De Correction D'Erreur          | 44 |
| III.4.7.1. ARQ (Automatic Repeat Request)               | 45 |
| III.4.7.1.a. Les Mécanismes ARQ existants               | 46 |
| III.4.7.1.b. Comparaison entre les mécanismes ARQ       | 47 |
| III.4.7.2. FEC (Forward Error Correction)               | 47 |
| III.5. La Sécurité                                      | 47 |
| III.6. Le Modem PLC                                     | 48 |
| III.6.1. Les Modems Dans Une Installation               | 48 |
| III.6.2. Management Fréquence Puissance                 | 49 |
| III.7. Accès Intérieur & Extérieur                      | 49 |
| III.7.1. Les PLC En Indoor                              | 49 |
| III.7.2. Les PLC En Outdoor                             | 50 |
| III.7.2.1. Définition                                   | 50 |
| III.7.2.2. Adaptation Des PLC Au Réseau Électrique      | 51 |

## CHAPITRE IV Installation d'un réseau PLC de ville

|   |     |
|---|-----|
| IV.1. Introduction  | 53  |
| IV.2. Étude Des Câbles MT En Communication                    | 53  |
| IV.2.1. Description Des Câbles MT                             | 53  |
| IV.2.1.1. Câble MT Unipolaire                                 | 54  |
| IV.2.1.2. Câble MT Tripolaire                                 | 54  |
| IV.2.2. Comportement Des Lignes MT En HF                      | 55  |
| IV.2.2.1. Modélisation  | 55  |
| IV.2.2.2. Simulation D'une Transmission À Travers Un Câble MT | 59  |
| IV.3. Étude D'un Réseau PLC À Une Seule Branche               | 61  |
| IV.4. Étude D'un Réseau PLC MT De Ville                       | 65  |
| IV.4.1. Description du site de l'installation                 | 65  |
| IV.4.2. Installation Et Solutions Proposées                   | 69  |
| IV.4.2.1. La Station De Base                                  | 69  |
| IV.4.2.2. Branchement Des Coupleurs                           | 69  |
| IV.4.2.3. Les répéteurs                                       | 71  |
| IV.4.2.3.a. Comportement du réseau en HF                      | 71  |
| IV.4.2.3.b. Emplacements des répéteurs                        | 78  |
| IV.4.3. L'aspect logiciel de l'installation                   | 84  |
| IV.4.3.1. La structure du réseau                              | 84  |
| IV.4.3.2. Le système OFDM                                     | 84  |
| IV.4.3.3. La structure logique du canal                       | 85  |
| IV.4.3.4. Le protocole de la couche MAC                       | 86  |
| IV.4.3.4.a. Les canaux de signalisation et de données         | 87  |
| IV.4.3.4.b L'organisation de l'accès                          | 88  |
| IV.4.3.4.c La correction des erreurs                          | 90  |
| IV.5. Conclusion  | 90  |
| <hr/>   |     |
| <b>CONCLUSION GENERALE</b>                                    | 91  |
| <b>ANNEXES.</b>   | 94  |
| <b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.</b>                           | 102 |

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

# *Introduction Générale*

La communication numérique à travers les câbles électriques est une vieille idée qui remonte aux années vingt du dernier siècle. Dans les années cinquante, le réseau électrique a été utilisé pour la commande des relais. Plusieurs systèmes normalisés ou en cours de normalisation ont été utilisés pour la transmission de signaux de commande ou de gestion d'énergie (tel que AMR : Automatic Meter Reading), par des compagnies d'électricité. Cependant les lignes électriques, ont souvent été décrites comme étant très perturbées avec une fiabilité incertaine.

A partir de 1998, des performances dans le domaine du codage, de la modulation et de détection, ont permis la conception d'un système de communication fiable et efficace à travers les câbles électriques. L'idée d'exploiter le réseau électrique en basse et moyenne tension est considéré aujourd'hui, comme un sérieux candidat pour la fourniture d'accès résidentiel rapide aux services de communication tel que l'Internet. Les systèmes PLC (Power Line Communication) représentent une alternative aux autres solutions du 'dernier kilomètre' classiques telle que l'ADSL et la Wifi.

En pratique, il faut différencier deux utilisations distinctes des PLC : l'utilisation 'Indoor' à l'intérieur d'un bâtiment, et l'utilisation dite 'Outdoor' pour acheminer l'information d'un poste de transformation qui serait connecté à un terminal fournisseur de service de communication jusqu'à l'abonné.

Le réseau électrique Outdoor a une topologie arborescente, il est constitué de l'interconnexion des câbles sous terrains et aériens, avec un modem PLC installé au niveau des postes transformateurs MT/BT ou HT/MT, fournissant la connectivité aux résidences avoisinantes. L'architecture du réseau PLC doit être optimisée selon les caractéristiques du réseau électrique, qui change d'un emplacement géographique à l'autre. Dans le cas d'un réseau Outdoor BT, le nombre de maisons par poste transformateur, et la distance entre ce dernier et l'utilisateur, doivent être pris en compte. Pour un réseau Outdoor MT, on prendra en considération le nombre de postes MT/BT par poste transformateur HT/MT, ainsi que les distances les séparants. Si de grandes distances sont impliquées, comme c'est le cas en zone rurale, des répéteurs intermédiaires sont nécessaires pour régénérer le signal.

On peut aussi exploiter les câbles des constructions domestiques ou industrielles, pour réaliser un réseau local Indoor d'entreprise ou un réseau d'automatisation de l'infrastructure. Dans ce dernier cas, aucun câblage supplémentaire n'est nécessaire, puisque la plupart des infrastructures industrielles ou résidentielles possèdent un vaste réseau électrique, cela procure l'énorme avantage d'offrir une grande souplesse d'utilisation puisque les systèmes électroniques qui y seront connectés impliquent, dans la quasi-totalité des cas, une alimentation en énergie fournie par le « réseau secteur ».

Dans le cas d'absence d'un réseau fédérateur conventionnel tel que la fibre optique, le réseau MT peut le substituer. Les lignes MT ont leurs propres caractéristiques de

communication ; elles sont moins bruitées, moins perturbées, et la densité de branchement est moindre relativement aux lignes BT, donc leur environnement est beaucoup moins hostile, en plus elles peuvent couvrir de plus grandes distances.

Comme toute nouvelle technologie, la PLC n'est pas encore normalisée au niveau international. Les seuls points qui doivent être respectés actuellement portent sur les problèmes de compatibilité électromagnétique (CEM) et sur la sécurité du réseau électrique. Au niveau international, une normalisation PLC (CEI 61000-3-8) existe pour les fréquences inférieures à 535kHz. Pour les fréquences supérieures, la publication CISPR 22 spécifie les limites des équipements de la technologie de communication. Au niveau européen selon la norme EN50065, la plage de fréquence [3kHz, 148.5kHz] nommée bande CENELEC est permise pour les PLC bas débit (jusqu'à 100kbit/s). Pour les fréquences supérieures, le groupe de travail CENELEC/ETSI développe des recommandations pour la compatibilité électromagnétique, la limitation de la distance de rayonnement à 3 mètres est souvent proposée par différents pays européens dans la gamme de fréquence inférieure à 30MHz. Au Japon une normalisation nationale n'autorise la PLC que dans la gamme de fréquences comprises entre 10-450kHz.

L'objectif de ce travail en premier lieu, est de présenter cette nouvelle technologie. En second lieu, est de proposer une installation d'un réseau de communication sur le réseau électrique MT de Bouzaréah. Afin d'atteindre cet objectif nous avons scindé notre étude en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, on développera des généralités sur les réseaux informatiques et sur la transmission des données, sans impliquer le support de transmission.

Le deuxième chapitre concerne une étude sur les caractéristiques des lignes électriques en hautes fréquences, ainsi que les problèmes liés à ce support autant que moyen de transmission de données (distorsion, atténuation, réflexions, rayonnement et les bruits).

On abordera dans le troisième chapitre, quelques solutions adoptées pour l'établissement d'une communication via le réseau électrique, en présentant la technologie PLC par ses techniques de modulation, ses protocoles de l'organisation d'accès et ses méthodes de correction d'erreur. Puis on présentera les différents segments des réseaux PLC qui répondent à différents objectifs.

Notre travail dans le quatrième chapitre exploitera l'étude des phénomènes présents sur les câbles électriques en hautes fréquences, ainsi que les solutions adoptées pour l'établissement d'une transmission sur ce support, dans le but de proposer une installation après avoir étudié la faisabilité d'établissement d'un réseau PLC de ville sur le réseau Sonelgaz dans la commune de Bouzaréah.

# *Chapitre I*

---

## *Généralités sur les réseaux informatiques*

## I.1. Introduction :

Dans ce chapitre on étudiera les éléments de base d'une liaison de transmission, ainsi que les topologies et les classes des réseaux informatiques, et leur architecture en couches. Compte tenu de notre application, les fonctionnalités des deux premières couches, physique et liaison de données, sont plus développées, en passant par les éléments nécessaires à l'élaboration d'une transmission de données.

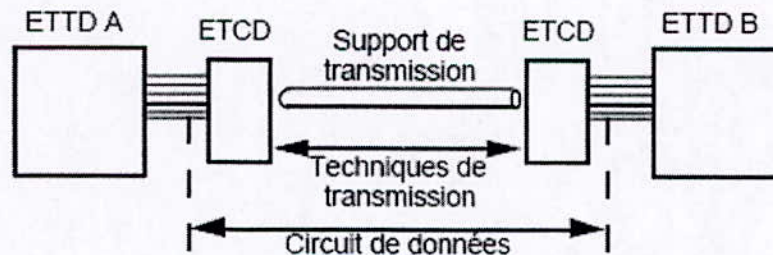
## I.2. Définitions :

### *Un Réseau :*

Un réseau est un ensemble de postes, pouvant utiliser les mêmes ressources ou échanger des informations, ils sont reliés entre eux par l'intermédiaire des lignes physiques de communication, qui servent de transport et d'échange de données. On distingue 3 familles de réseau : Filaire, Sans-fil et PLC.

### *Une liaison de transmission :*

On peut structurer une liaison de transmission en un ensemble de " boîtes noires ", chacune remplissant une fonction particulière, comme le montre la *figure I.1.*



**Figure .I.1.** Une liaison de transmission.

Ainsi les éléments de base d'une liaison de transmission sont [PUJ\_00] :

- L'ETTD, *Équipement Terminal de Traitement des Données*, désigne l'équipement qui génère les données à transmettre et traite les données reçues.
- L'ETCD, *Équipement de Terminaison du Circuit de Données*, joue le rôle d'un adaptateur entre le système de traitement de données et le support de transmission. Il peut être un modem ou un onduleur. Il reçoit en entrée la suite de données binaires (en forme BDB) et fournit en sortie un signal sinusoïdal, dont les caractéristiques sont adaptées au support de transmission. Il effectue également



l'opération inverse. L'ETCD rend ainsi transparente à l'utilisateur la nature du support de transmission réellement utilisé.

- Jonction terminal : Sont des circuits de liaison placés entre l'ETTD et l'ETCD, elles impliquent une procédure de dialogue entre eux.
- Le support de communication : est le média qui transporte les données d'un point à l'autre. Il peut être téléphonique, réseau câblé (fibre optique, câble coaxial, paire torsadée), réseau Wi-fi ou réseau électrique.

#### *La qualité de service :*

Le transfert d'une information élémentaire entre deux équipements peut faire intervenir de multiples autres équipements et provoquer la transmission de signaux de nature variée sur des supports également variés. La qualité de service est souvent notée QoS, elle représente la qualité du circuit de données [PUJ\_00] est mesurée par les critères suivants :

- La *disponibilité* des moyens de transfert de l'information qui est liée au taux de panne des équipements et des liaisons. Elle permet d'évaluer la proportion de temps pendant lequel la transmission est possible (absence de panne ou de coupure).
- Le *taux d'erreurs* est le rapport du nombre de bits erronés reçus au cours d'une période d'observation, au nombre total de bits transmis pendant cette période.
- Le *débit binaire*  $D$  représente le nombre de bits transmis par seconde. En précisant éventuellement, si ce débit est possible en duplex intégral, en semi duplex ou en simplex.
- La *rapidité de modulation*  $R$  indique le nombre de symboles transmis par unité de temps et s'exprime en *bauds*. Si  $d$  représente la durée exprimée en seconde de l'intervalle significatif le plus court séparant deux symboles successifs, alors  $R = 1/d$  bauds. On a alors :  $D = R \cdot \log_2 V$  où  $V$  est la valence des signaux émis ( nombre de symboles utilisés).

### 1.3. Classification Des Réseaux :

En classant les réseaux sur la base des distances entre entités communicantes, et en partant de la plus petite taille on trouve [PUJ\_00] :

#### *Les bus :*

Ce sont des réseaux limités à de très courtes distances. Ils sont déterminés par des fils électriques spéciaux, à l'intérieur d'un même ordinateur en général. Ils doivent relier les processeurs, les mémoires, les entrées sorties d'un ordinateur ou d'un multiprocesseur. La distance maximale entre les points de connexion les plus éloignés, est inférieure à un mètre.

### Les structures d'interconnexion :

Elles relient, dans une même pièce ou à de faibles distances, différents calculateurs entre eux. Ce sont des réseaux qui ont des débits très importants : plusieurs centaines de Mbit/s. La distance maximale entre deux points est très faible pour permettre ces hauts débits.

### Les réseaux locaux :

Ce sont les Réseaux Locaux d'Entreprise (RLE) ou LAN (Local Area Network), ils correspondent par leur taille aux réseaux intra entreprises, qui ont un environnement local de jusqu'à plusieurs centaines de mètres, comme pour un quartier par exemple. Les débits actuels peuvent atteindre plusieurs dizaines de Mbit/s.

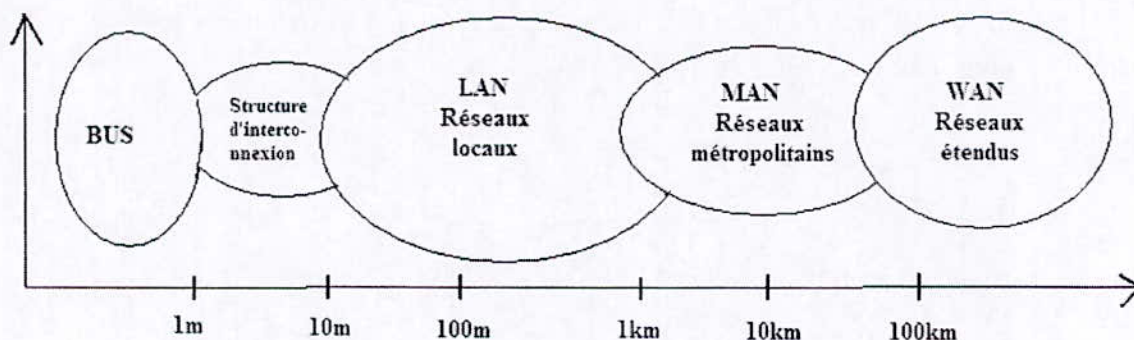
### Les réseaux métropolitains :

Ou encore réseau RM ou MAN (Métropolitain Area Network), qui correspond à une interconnexion de plusieurs bâtiments d'une ville. Les réseaux métropolitains doivent permettre d'interconnecter les réseaux locaux des différents bâtiments, et de prendre en charge les machines communes à l'ensemble de la gestion du site distribué.

### Les réseaux longues distances :

Les Réseaux Longue Distance ou RLD, ou encore WAN (Wide Area Network), connus aussi sous le nom de « réseaux étendus », comprennent les réseaux de très grandes distances. Ils sont destinés à transporter les données à l'échelle d'un pays et à l'échelle mondiale. Le réseau est soit terrestre, et il utilise des infrastructures au niveau du sol, le réseau électrique nationale ou mondial en est un, soit satellite et nécessite des engins spatiaux pour mettre en place les répondeurs, qui retransmettront les signaux vers la terre.

On illustre les différentes classes de réseaux présentées, dans la *figure I.2*.



*Figure I.2. Les différentes catégories de réseaux informatiques.*

## I.4. Topologies Des Réseaux :

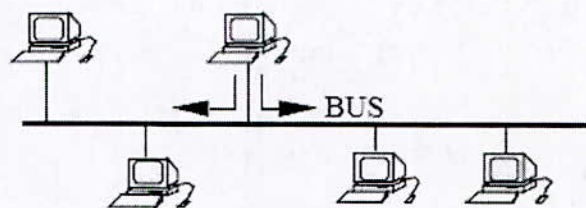
Un réseau est constitué de plusieurs stations, reliées entre elles grâce à du matériel (câblage, cartes réseaux...), dont l'arrangement physique est appelé "Topologie Physique".

On en dénombre trois :

- La topologie en bus ;
- La topologie en étoile;
- La topologie en anneau.

*Topologie en bus:*

Tous les ordinateurs sont reliés à une même ligne de transmission ou bus (ligne physique) par l'intermédiaire d'un câble.



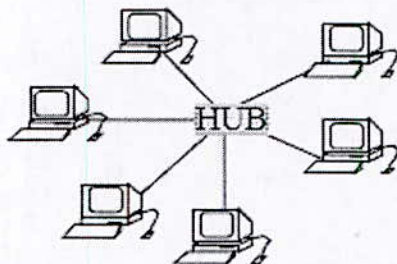
**Figure .I.3.** Topologie en bus.

*Topologie en étoile:*

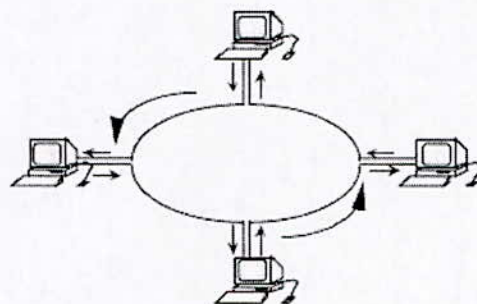
Elle consiste en la liaison concentrée de tous les ordinateurs, qui convergent vers un système matériel appelé hub ou concentrateur : c'est une boîte comprenant un nombre de jonctions auxquelles on peut connecter les câbles en provenance des ordinateurs.

*Topologie en anneau:*

Dans un réseau en topologie en anneau, les ordinateurs forment une boucle sur laquelle chacun d'entre eux va "avoir la parole" successivement.



**Figure .I.4.** Topologie en étoile.

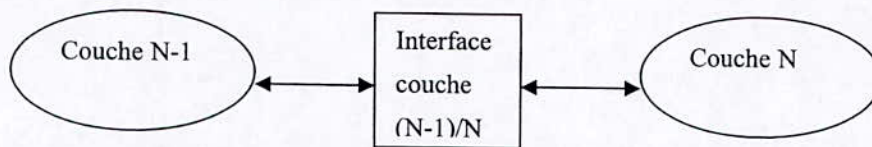


**Figure .I.5.** Topologie en anneau.

## I.5. Architecture Des Réseaux :

### I.5.1. Structure En Couches :

L'architecture du réseau définit la hiérarchie à suivre, afin d'expédier les données, elle est en général structurée sous forme de couches, [PUJ\_00]. Comme le montre la *figure I.6*, entre deux couches adjacentes (de niveau N et (N+1) d'une même machine), une interface couche (N+1)/N sert d'échanges de différents paramètres pour la réalisation des services (N), que la couche inférieure offre à la supérieure, et cela après traduction par la couche inférieure pour le compte de la supérieure. Ces échanges s'effectuent dans des points particuliers appelés les (N)-SAP ((N)- Service Access Point).



*Figure .I.6. La structure en couche.*

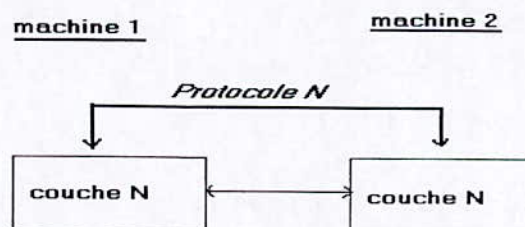
L'architecture logicielle peut être définie par un ensemble de règles suivant une normalisation mondiale. Ainsi, deux grandes architectures sont concurrentes :

- Interconnexion des Systèmes Ouverts – OSI = Open System Interconnection de l'ISO.
- Architecture de l'environnement TCP/IP.

### I.5.2. Le Protocole :

Chaque couche N d'une machine du réseau gère la conversation (~ communication) avec la couche N d'une autre machine de ce même réseau. Cette conversation est gérée par un certain nombre de règles et conventions, qui sont connues sous le nom de protocole (ou protocole de la couche N), [PUJ\_00] comme c'est illustré sur la *figure I.7*. Ce dernier définit les mécanismes permettant le transport des données.

En réalité, les données de la couche N d'une machine ne sont pas directement transférées à la couche N d'une autre machine, mais chaque couche passe les données et le contrôle à la couche immédiatement inférieure, jusqu'à la plus basse, et cette dernière couche est appelée la couche physique qui est responsable, réellement, de la communication.



*Figure .I.7. Protocole de conversation niveau N.*

### I.5.3. L'Architecture OSI :

L'architecture OSI forme le modèle de référence pour les autres architectures. Ce modèle comporte 7 couches :

- La couche Physique ;
- La couche Liaison de données ;
- La couche Réseau ;
- La couche Transport ;
- La couche Session ;
- La couche Présentation ;
- La couche Application.

#### I.5.3.1. La couche physique :

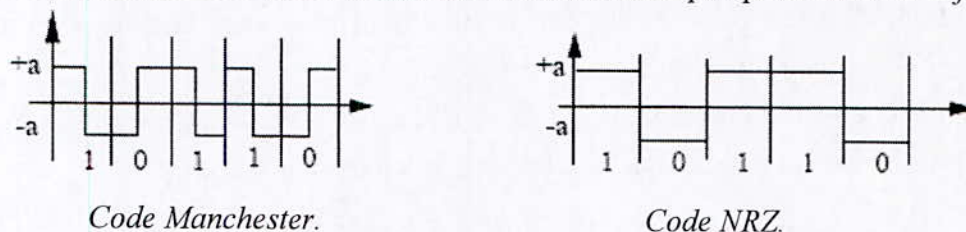
La première couche de l'architecture OSI a pour rôle de conduire les éléments binaires (suite des 0 et des 1) sur le support physique. Dans cette couche, [PUJ\_00] on y trouve tout le matériel et logiciel nécessaires au maintien et la désactivation des connexions physiques destinées à la transmission des éléments binaires :

- Les interfaces de connexions ou jonctions ;
- Les modems ;
- Les multiplexeurs ;
- Les nœuds de commutation.

La couche physique est caractérisée par les éléments suivants :

##### I.5.3.1.a. Le codage :

C'est la numérisation ou la représentation binaire des données, le réseau englobe leur transmission leur mémorisation et leur usage. Il existe plusieurs types de codage tel que le BDB : la transmission en bande de base, dont on schématise quelques codes sur la *figure I.8*.



**Figure .I.8.** Exemples de code BDB.

##### I.5.3.1.b. La modulation :

###### i. Modulation en amplitude M-ASK:

La distinction entre le « 0 » et le « 1 » se fait par une différence d'amplitude. Soit une porteuse  $v(t)$  de fréquence  $f_0$  tel que :  $v(t) = \cos(2\pi f_0 t)$ .

En modulation d'amplitude, l'amplitude du signal modulé  $m(t)$  varie linéairement en fonction du signal d'entrée  $x(t)$  :  $m(t) = (a+k x(t)) \cos(2\pi f_0 t)$  où  $k < 1$  est l'indice de modulation. La modulation d'amplitude présente l'inconvénient d'être sensible au bruit car la puissance du signal modulé est fonction du signal d'entrée. De plus, le spectre du signal modulé est doublé par rapport au spectre du signal d'entrée. Elle est essentiellement utilisée pour la transmission de radiodiffusion analogique (et du son TV hertzien).

ii. Modulation en phase M-PSK:

Les signaux « 0 » et « 1 » commencent en des endroits différents de la sinusoïde. En effet, en modulation de phase, le signal à transmettre est utilisé pour faire varier la phase de l'onde porteuse utilisée pour décaler le spectre fréquentiel du signal à transmettre. Elle peut s'écrire sous la forme :  $m(t) = \cos(2\pi f_0 t + k x(t))$

iii. Modulation en fréquence M-FSK:

Elle permet à l'émetteur de changer la fréquence d'envoi des signaux, suivant que l'élément à transmettre soit « 0 » ou « 1 ». Le signal est obtenu en utilisant le signal à transmettre pour faire varier la fréquence de l'onde porteuse utilisée :

$$m(t) = \cos(2\pi [f_0 + k x(t)] t + \varphi)$$

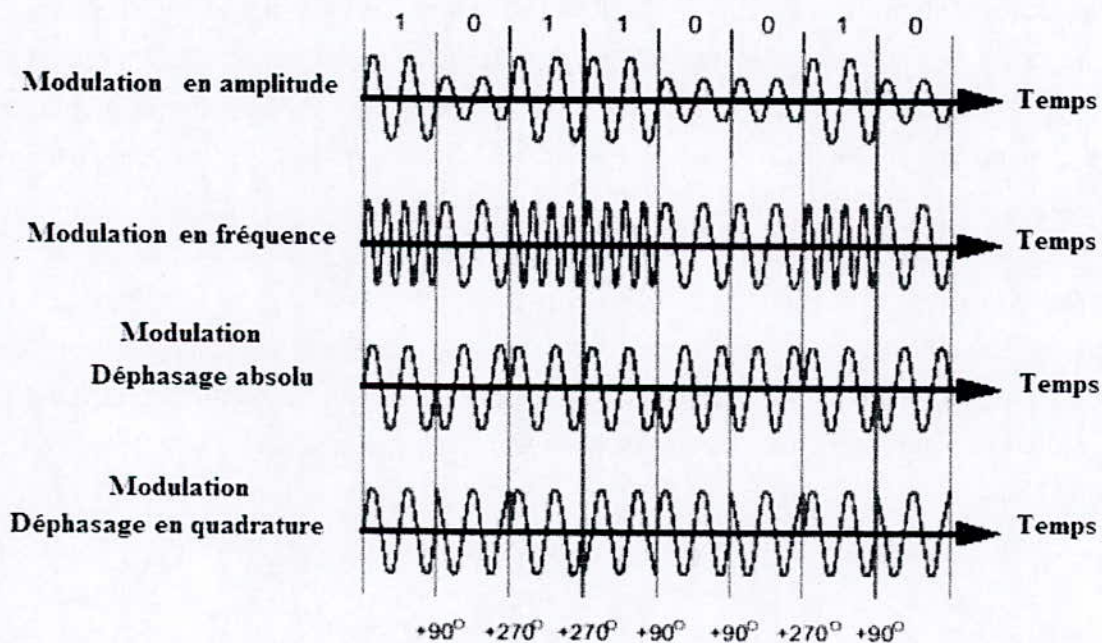
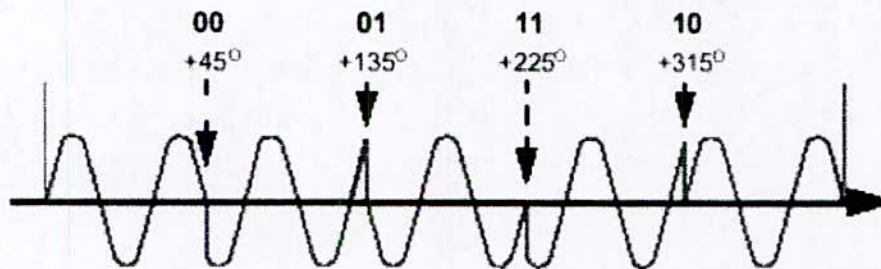


Figure .I.9. Les différents types de modulation.

iv. Modulation en phase M-PSK:

Il est possible de représenter plus de deux états en codant deux ou plusieurs bits en un seul état, cela en utilisant par exemple 4 fréquences 4 amplitudes ou 4 phases (QPSK). Cette dernière est représentée sur la *figure I.10*.



**Figure .I.10.** Modulation en phase à 4 moments (QPSK).

v. Modulation QAM:

Soit  $R$  le nombre de bits à transmettre, on note modulation  $M$ -QAM (Quadrature Amplitude Modulation), modulation QAM avec, la taille  $M$  de la constellation étant  $2^R$ . Chaque symbole est représenté par un nombre complexe. La *figure III.11* montre deux exemples de codage de bits par code Gray : le codage de la 4-QAM, identique à celui de la QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), qui code 2 bits par symbole, et le codage 16-QAM, qui code 4 bits par symbole.

Chaque constellation est bâtie sur le même modèle, à savoir que les parties réelles et imaginaires des symboles prennent leurs valeurs dans  $\{+/-v, +/-3v, +/-5v, \dots\}$ . La valeur de  $v$  est ensuite normalisée pour que la puissance moyenne des symboles, appartenant à une constellation, soit égale à 1 watt, la normalisation étant basée sur une valeur d'impédance de charge de  $1\Omega$ . Cette condition de normalisation s'écrit mathématiquement sous la forme suivante :

$$\frac{1}{M} \sum_{k=1}^M |D_k|^2 = 1$$

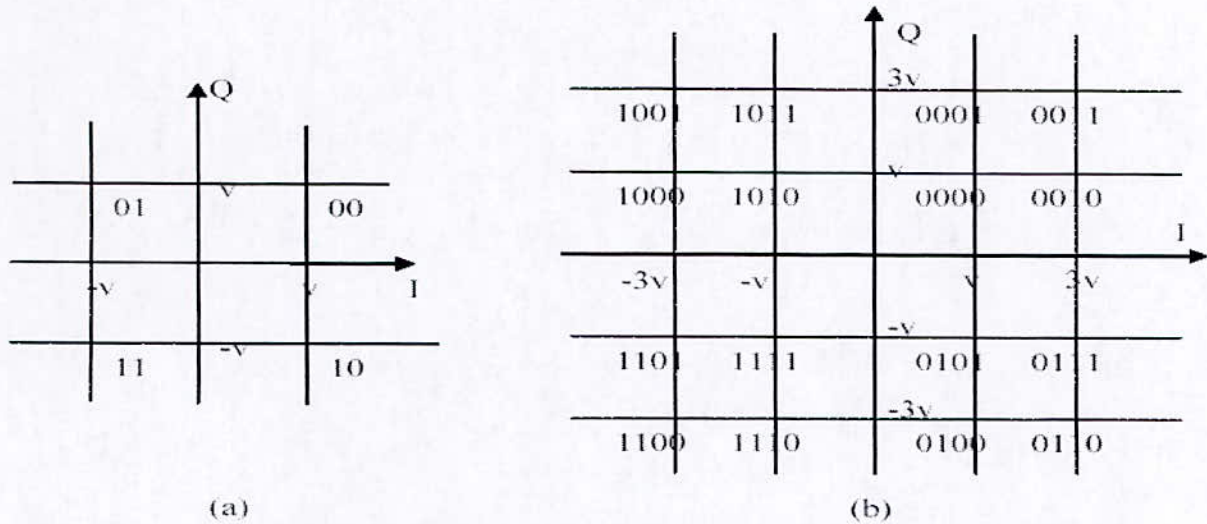


Figure .III.11. (a) : Codage 4-QAM. (b) : Codage 16-QAM.

**I.5.3.1.c. La transmission :**

*i. Série :*

Les bits sont envoyés en succession en mode synchrone: chaque bit d'un caractère est envoyé dans un intervalle de temps constant, ou asynchrone : chaque caractère est entouré de deux signaux START et STOP.

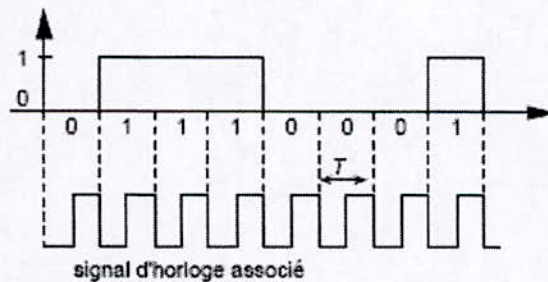


Figure I.12. Transmission synchrone.

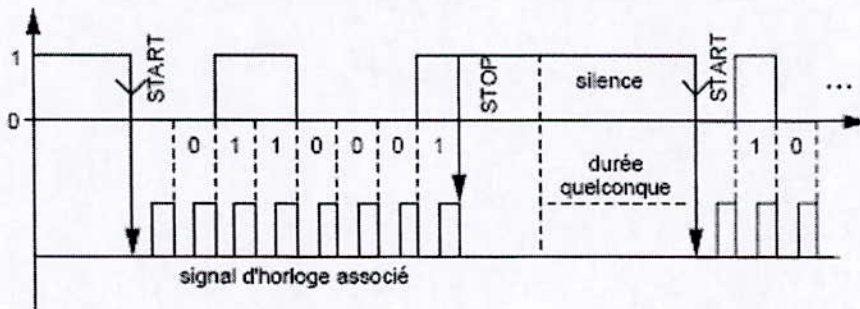


Figure-I.13. Transmission asynchrone.



ii. *Parallèle :*

Les bits d'un même caractère sont envoyés sur des fils ou porteurs distincts pour arriver ensemble à destination. Cette méthode pose un problème de synchronisation.

**I.5.3.1.d. Sens de la transmission :**

i. *Simplex :*

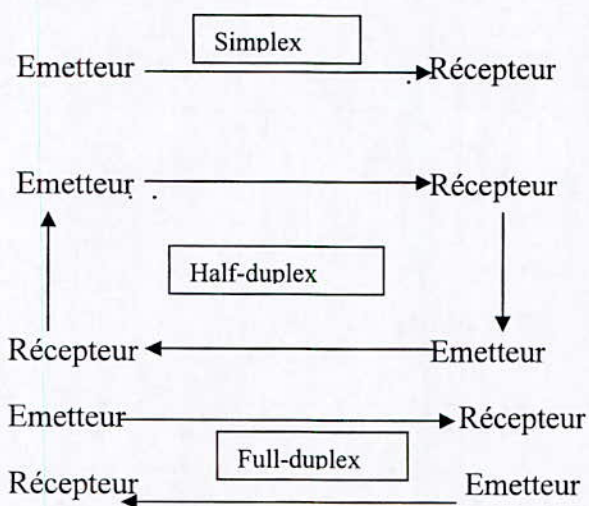
Pour des liaisons unidirectionnelles c'est-à-dire, qui ont toujours lieu dans le même sens : de l'émetteur vers le récepteur.

ii. *Semi- duplex*

C'est une liaison bidirectionnelle à l'alternat, ou encore half- duplex, qui permet de transformer l'émetteur en récepteur et vice versa. La communication change de sens à tour de rôle.

iii. *Full duplex*

C'est une liaison bidirectionnelle simultanée ou duplex, qui permet une transmission simultanée dans les deux sens. Les différents modes d'exploitation d'une ligne sont schématisés dans la *figure-I.14*.



**Figure-I.14.** Les sens de transmission.

**I.5.3.1.e. Le multiplexage :**

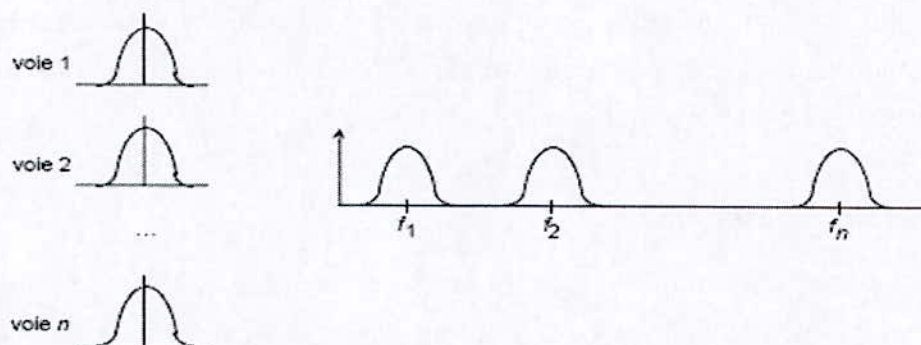
Sur une ligne de communication formant une liaison entre deux points distants, il est possible de faire transiter en même temps les données de plusieurs clients. Le multiplexeur a pour tâche de recevoir des données de plusieurs terminaux par des liaisons spécifiques, appelées voies basse vitesse, pour les transmettre toutes ensemble sur une voie unique appelée

voie haute vitesse. A l'autre extrémité de la liaison, la démarche inverse est effectuée, c'est-à-dire à partir des informations arrivant sur la voie haute vitesse, récupérer les données des différents utilisateurs et les envoyer sur la bonne voie de sortie.

De nombreuses possibilités de multiplexage sont possibles, on citera les principales :

i. *Le multiplexage fréquentiel :*

Dans ce type de multiplexage, chaque voie basse vitesse possède sa propre bande passante sur la voie haute vitesse. Dans ce cas la voie haute vitesse doit avoir la capacité nécessaire pour absorber toutes les trames qui proviennent des équipements terminaux raccordés.



**Figure-I.15.** Les voies basses vitesses multiplexées en fréquence.

ii. *Le multiplexage temporel :*

Le temps est découpé en tranches qui sont affectées régulièrement à chaque voie basse vitesse ; en transmettant d'abord un ou plusieurs bits de la voie 1, puis de la voie 2 et ainsi de suite jusqu'à la voie n pour former une trame TDMA et répéter ce cycle. Un problème de synchronisation se pose lors du démultiplexage, il est nécessaire de transmettre des éléments de synchronisation afin de réaffecter correctement l'entrée à la voie correspondante.

**1.5.3.1.f. Le débit :**

Le débit est la quantité d'informations pouvant être transmises (sur une voie de communication) par unité de seconde. Le débit binaire obtenu par la numérisation des signaux analogiques a une valeur demandant un support physique dont la bande passante est très supérieure à celle nécessaire au transport d'un signal analogique. Le débit maximal  $D$  qui peut être acheminé sur une bande  $W$  Hz et avec un rapport signal sur bruit  $S/B$ , est obtenu par le théorème de Shannon :

$$D = W \log_2(1 + S/B)$$

### 1.5.3.2. La couche Liaison :

En fournissant les moyens procéduraux nécessaire, elle s'occupe du maintien et de la libération des connexions entre entités de réseau, en contrôlant l'allocation des ressources du réseau (canaux de transmission, mémoires tampons...etc.). En outre, elle a comme rôle de corriger les erreurs produites au niveau 1, en les détectant et en les récupérant. En général la couche liaison de données est partagée en deux sous- couches : LLC et MAC :

#### ***1.5.3.2.a. La sous-couche LLC :***

La sous-couche de control de la liaison logique des données ou bien LLC, se situe au niveau 2, elle offre un service de transport des paquets au niveau 3, et elle est chargée du contrôle de la liaison de données, en contrôlant l'émission et la réception des trames, tout en étant indépendante de la technique d'accès.

#### ***1.5.3.2.b. La sous-couche MAC :***

La sous-couche de control d'accès au média ou bien MAC, se situe en réalité entre les couches 1 et 2, elle rend un service d'accès au support, dont la politique garantit qu'un seul utilisateur à la fois est en train de transmettre, sinon les signaux se superposeraient et deviendraient de ce fait indéchiffrables. La couche LLC demande les services de transmission de la couche MAC. Parmi les techniques d'accès, utilisées par le protocole qu'adopte la sous-couche MAC, on cite la technique d'Accès Aléatoire au Média avec Ecoute de la Porteuse, connue sous le nom de CSMA (Carrier Sense Multiple Access), elle consiste à écouter le canal avant d'entreprendre une transmission, et si un signal sur la ligne est détecté il diffère son émission à une date ultérieure. Cette méthode réduit les risques de collision.

### 1.5.3.3. La couche Réseau :

La couche Réseau permet l'acheminement correct des paquets d'informations jusqu'à l'utilisateur final, en fournissant les moyens nécessaires à l'échange des unités de données du service réseau entre entités du niveau transport. Les principales fonctions de ce niveau sont : le contrôle de flux des paquets, le routage et l'adressage des paquets.

### 1.5.3.4. La couche Transport :

C'est l'ultime niveau qui s'occupe de l'acheminement de l'information, en s'assurant du transfert des données entre les entités du niveau 5. Le service transport doit optimiser les ressources du réseau en gérant un contrôle du flux ou un multiplexage des messages.

#### 1.5.3.5. La couche Session :

La couche session a pour but d'ouvrir et de fermer des sessions entre les utilisateurs, en s'assurant que le récepteur est bien présent avant d'émettre les données. Afin d'ouvrir une connexion avec une machine distante, la couche session doit posséder un langage compréhensible de l'autre extrémité, ce qui implique un passage par la couche Présentation.

#### 1.5.3.6. La couche Présentation :

Les différentes machines connectées ne possèdent pas la même syntaxe pour exprimer les applications qui doivent être effectuées. La couche Présentation se charge de la syntaxe des informations et procure un langage syntaxique commun à l'ensemble des utilisateurs connectés, ou bien, aux entités d'application communicantes.

#### 1.5.3.7. La couche Application :

La couche application contient toutes les fonctions nécessaires pour communiquer entre différents systèmes, elle s'occupe de la sémantique.

### 1.6. Conclusion :

On a vu dans ce chapitre que les réseaux informatiques se classifient en terme de distance en cinq catégories : bus, structures d'interconnexion, LAN, MAN et WAN. Les réseaux peuvent avoir une topologie en étoile, en bus ou en anneau. L'architecture d'un réseau de communication est organisée par une structure en couches, on y trouve deux grandes architectures mondiales OSI et TCP/IP. On a notamment, présenté le modèle de référence de l'organisation ISO : OSI. De façon générale la couche physique a été présentée par ses différents paramètres : modulation, codage...etc. Dans le *chapitre III* on présentera en détail les couches physique et liaison de données, d'un réseau de communication établi sur le réseau électrique. La couche liaison de donnée a été présentée en citant ses deux sous-couches, un intérêt particulier est porté sur la couche MAC, qui détient un rôle important dans un réseau PLC.

## *Chapitre II*

---

### *Les caractéristiques du réseau électrique en HF*

## II.1. Introduction :

Pour parvenir à une communication via le réseau électrique, les difficultés techniques à surmonter sont nombreuses, par conséquent ce chapitre a été consacré à l'étude des phénomènes provoqués par la circulation des signaux hautes fréquences dans un réseau électrique, en commençant par la présentation des phénomènes de distorsion puis d'atténuation du signal, dues à la nature du support de transmission. Ainsi que les phénomènes de réflexions et de rayonnement. Finalement, il a été nécessaire de donner une idée générale sur les sources de bruits présents dans le réseau électrique ainsi que sur leurs classifications.

## II.2. Présentation :

Le réseau filaire comporte des dérivations et des impédances de charges, leurs caractéristiques étant éminemment variables d'un réseau à l'autre ou en fonction du temps. Les réflexions sur ces discontinuités vont se traduire par l'apparition de trajets multiples qui seront caractérisés, soit dans le domaine fréquentiel par la fonction de transfert  $H(f)$  entre le point d'injection du signal et un terminal, soit par la réponse impulsionnelle du canal.

Le canal PLC présente de nombreux défis techniques :

- i. L'atténuation, dépendant de la fréquence, est causée par les pertes dans les conducteurs et les diélectriques.
- ii. Les signaux ne se propagent pas au long d'un seul chemin, mais souffrent de réflexions causées par les irrégularités d'impédance aux discontinuités des lignes.

Donc le canal PLC peut être considéré comme un environnement multi trajets avec une atténuation sélective en fréquence. La fonction de transfert du canal a une caractéristique passe-bas [SAR\_04], comprenant de profondes encoches à certaines fréquences. La densité de branchement est responsable de l'augmentation de l'atténuation car chaque dérivation absorbe une quantité de l'énergie transmise. Les réflexions multi trajets mènent à la dispersion du domaine temporel du signal, qui peut être caractérisé par l'étalement du retard (delay spread) [SAR\_04], défini comme l'intervalle du temps total durant lequel les signaux réfléchis, d'une énergie significative, arrivent de la source à la destination. De plus les réponses fréquentielles du canal varient lentement en fonction du temps, quoiqu'à certains instants ils peuvent changer brusquement à cause des variations de la distribution de la charge dans la ligne, provoquées par la connexion ou la déconnexion des appareils électriques. Par conséquent la réponse du canal doit être contrôlée en permanence par l'émetteur /

récepteur, ainsi que la transmission et/ou la détection des paramètres doit être adaptée aux variations dans le canal.

### II.3. La distorsion :

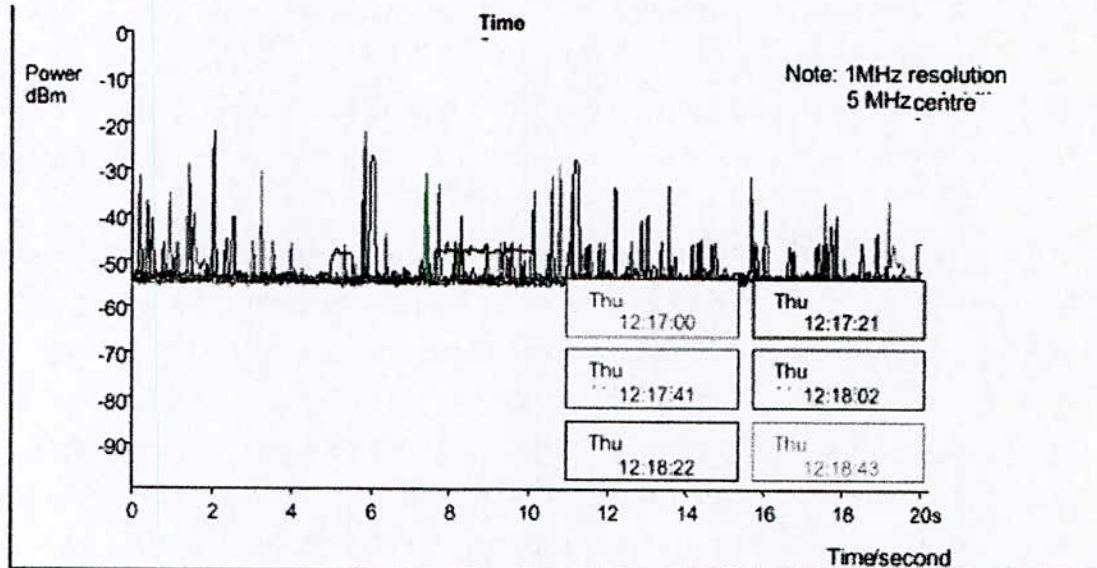
L'influence de la distorsion sur les services délivrés par la PLC dépend de la nature de la distorsion, la capacité de manipuler les distorsions du système PLC considéré et la qualité des paramètres requise par un certain service [HIN\_00]; comme exemple, un service www Internet fait circuler une distorsion d'une seconde peut ne pas être détectée par l'utilisateur, mais la même distorsion dans un appel téléphonique est minimisée la qualité de communication.

Concernant les systèmes PLC, le problème de distorsion doit être évalué pour deux objectifs:

- i. comment les distorsions typiques influencent les paramètres de la qualité de service.
- ii. comment les PLC peuvent manipuler les différentes distorsions.

Pour cela, il est utile d'évaluer le comportement de la PLC dans un environnement déformé.

Les figures II.1 et II.2 montrent un exemple de mesures prises sur la distorsion :



**Figure II.1** : Mesures de la distorsion \_domaine temporel. [NOR\_02]

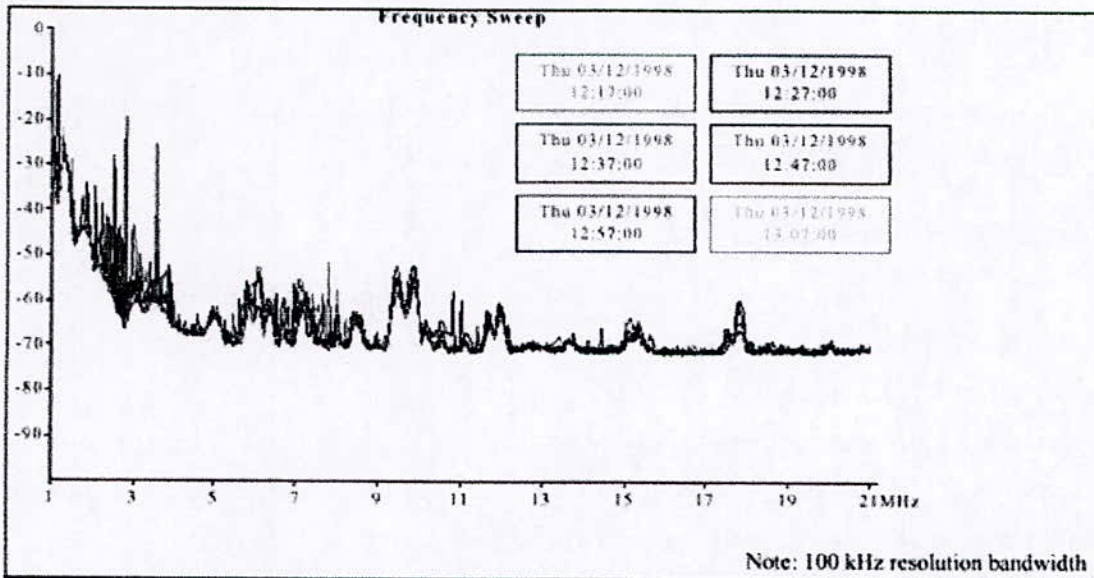


Figure II.2 : Mesures de la distorsion \_domaine fréquentiel. [NOR\_02]

#### II.4. L'atténuation :

L'atténuation définie la propriété d'un réseau à diminuer le niveau du signal par une certaine distance, elle dépend :

- i. du matériel de câblage utilisé.
- ii. des éléments du réseau impliqués.
- iii. des bandes de fréquences utilisées.
- iv. de l'impédance du réseau.

Une particulière dépendance compliquée existe entre l'atténuation et la charge du réseau [HIN\_00]. Donc on doit évaluer les valeurs d'atténuation typiques pour différentes bandes de fréquences pour estimer les meilleures adaptations.

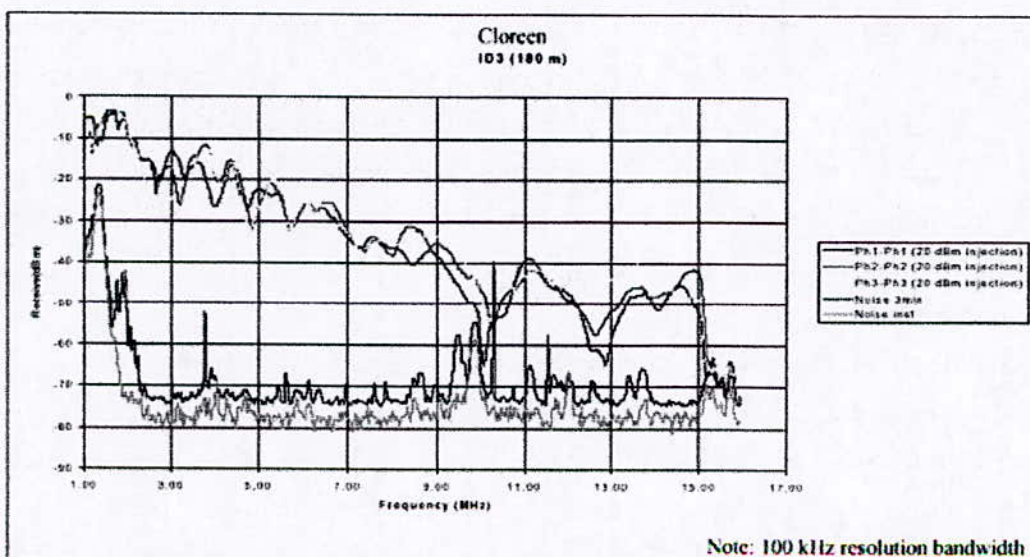


Figure II.3 : Mesures de l'atténuation. [NOR\_02]



Une autre propriété indésirable du réseau électrique en ce qui concerne la PLC est que le signal injecté au réseau peut être réfléchi dans certains éléments du réseau. Ce comportement n'est pas très prévisible.

## II.5. Le rayonnement :

La compatibilité électromagnétique avec les services sans fils existant (radio fixe, radio mobile, TV, radioamateur, radiodiffusion...) est la seule issue pour l'élaboration d'un standard de PLC. Le problème est que les câbles électriques et le réseau électrique sont conçus dans le but d'une distribution efficace d'électricité à des fréquences de 50 ou 60Hz, et certainement pas dans le but de transmettre des signaux d'information de fréquence supérieure à 1MHz [SAR\_04].

Quand les signaux PLC HF sont injectés en mode différentiel, dont les courants sont égaux en amplitudes mais circulent dans des sens opposés. Donc l'équilibrage des lignes est nécessaire pour faire circuler les signaux dans le mode différentiel désiré. Un défaut du réseau ou de symétrie des câbles (défini en terme d'impédance entre le conducteur et la masse), engendre un inversement indésirable du mode commun (habituel). Les courants du mode commun circulent en parallèle dans tout le conducteur, tant dis que le courant du retour circule dans la masse. Ces courants de mode commun sont à l'origine du rayonnement électromagnétique, en effet les lignes électriques opèrent comme des antennes plus ou moins efficace. Deux solutions sont alors proposées afin de minimiser les radiations dues à un réseau PLC :

- La symétrie des lignes utilisées en transmission HF doit être exploitée le mieux possible ou bien même l'améliorer par un conditionnement du réseau. Une meilleure symétrie est obtenue sur le segment d'accès (qui assume la distribution des trois phases aux utilisateurs), en injectant les signaux entre deux phases au lieu de le faire entre une phase et le neutre, cette solution ne s'applique pas à un réseau indoor (deux fils plus une masse de protection) ou l'injection se doit d'être faite entre une phase et le neutre. Les filtres HF sont proposés pour maintenir les signaux HF sur les chemins de propagation habituels et éviter leur intrusion dans des portions inutilisées du réseau électrique.
- Une réduction de la densité spectrale d'énergie du signal transmis est nécessaire. Pour une énergie totale donnée, cela signifie que le spectre du signal doit être étalé le plus possible sur la largeur de bande disponible. Puisque la fonction de transfert décroît rapidement en fonction de la fréquence, l'étalement du spectre diminue l'efficacité de la transmission ce qui constitue une limitation fondamentale des performances des PLC. Les PLC

sont des diffuseurs de radiations, donc l'émission des signaux doit être en accord avec les limites CEM.

Quant au réseau d'accès sous terrain, il possède une structure qui lui confère un faible "effet d'antenne".

## II.6. Les sources de bruit :

En effet on définit les deux sources de bruit :

### II.6.1. Le bruit stationnaire :

Deux classes sont distinguées [SAR\_04], [DEG\_02] :

#### II.6.1.a. Bruit coloré :

Causé par les appareils domestiques usuels, il possède une densité spectrale d'énergie assez faible, qui cependant accroît en basses fréquences, et dont la moyenne varie de  $-140\text{dBm/Hz}$  à  $-125\text{dBm/Hz}$ , elle reste stationnaire sur des durées de quelques minutes à quelques heures.

#### II.6.1.b. Bruit bande étroite :

Consiste en signaux ondulatoires continus dont la modulation est en amplitude. Ils sont provoqués par les stations TV et les radiodiffusions, qui opèrent dans les bandes des ondes courtes et moyennes. Le degré d'interférence varie en fonction de la durée du retard.

### II.6.2. Le bruit impulsif :

Où trois classes sont distinguées :

#### II.6.2.a. Bruit impulsif périodique synchrone à la fréquence du secteur :

Causé par des appareils domestiques à circuits de découpage tel que les variateurs de lumière. Leur fréquence de répétition est de 50Hz ou 100Hz. Ils ont une courte durée de  $10\mu\text{s}$  à  $100\mu\text{s}$ .

#### II.6.2.b. Bruit impulsif périodique asynchrone à la fréquence du secteur :

Causé par des appareils à circuit de commutation d'énergie, leurs fréquences de répétition sont de 50Hz jusqu'à 200KHz.

#### II.6.2.c. Bruit apériodique asynchrone :

Causé par des transitions dues à la commutation sur le réseau. La durée d'impulsion est de plusieurs millisecondes, avec une densité spectrale d'énergie qui peut dépasser de 50dB le niveau du bruit de fond à certaines fréquences. Ce type de

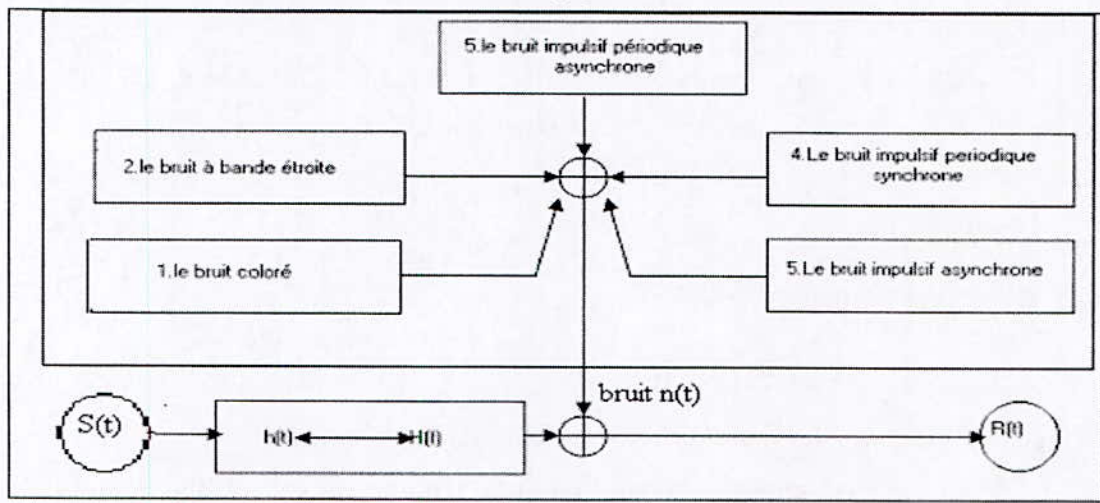
bruit peut apparaître à des intervalles irréguliers avec une énergie considérable, il affecte considérablement les communications haut débit, de sorte que des symboles complets ou même des paquets de symboles ne peuvent plus être décodés par le récepteur. Ce dernier devrait être pris en considération lors de la conception d'un système PLC.

Le bruit impulsif asynchrone est caractérisé par trois variables aléatoires :

- i. l'amplitude,
- ii. la largeur de l'impulsion,
- iii. la durée inter arrivage.

## II.7. Classification des bruits :

Contrairement à plusieurs autres canaux de communication, le canal du réseau électrique ne représente pas un environnement à bruit gaussien additif, selon plusieurs documents, illustrés par quelques mesures enregistrées [HIN\_00], le bruit additif dans les canaux de communication par le réseau électrique peut être vu comme la somme de cinq types de bruit, comme le montre la *figure II.4*.

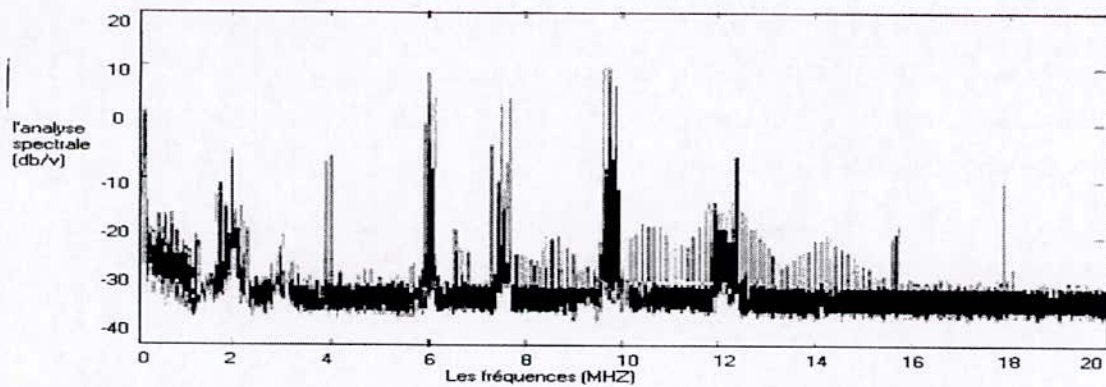


**Figure II.4.** Les bruits présents dans un canal de transmission PLC.

### II.7.1. Le bruit de fond :

Selon l'histogramme des perturbations, deux suppositions peuvent être faites, d'un côté, comme le niveau du bruit à bande étroite est généralement variant en fonction du temps pendant une journée (jour et nuit). Les systèmes de modulation considèrent ce type de bruit comme un bruit de fond par soit, éviter l'utilisation de ces niveaux de fréquences, soit en attachant à ces fréquences un taux de chargement de bit (bit-loading) petit. D'un autre côté, dû au grand taux de répétition des impulsions

(type3) et leur comportement dans le domaine fréquentiel, ce type de bruit est aussi considéré comme un bruit de fond. Donc les trois premiers types de bruit sont classés comme des bruits de fond, dont l'analyse spectrale est montrée à la *figure II.5* [HIN\_00].



*Figure II.5 :L'analyse spectrale d'un bruit de fond.*

Dans certains cas, la densité spectrale de puissance du bruit de fond peut être considérée comme constante dans différents niveaux de fréquences. Alors, les bases du modèle d'un bruit sont des sources de bruit blanc qui doit être défini séparément pour différentes bandes de fréquences adjacentes non chevauchantes. Pour chaque niveau de fréquence, la bande passante et le bruit doivent être définis.

### II.7.2. Le bruit impulsif :

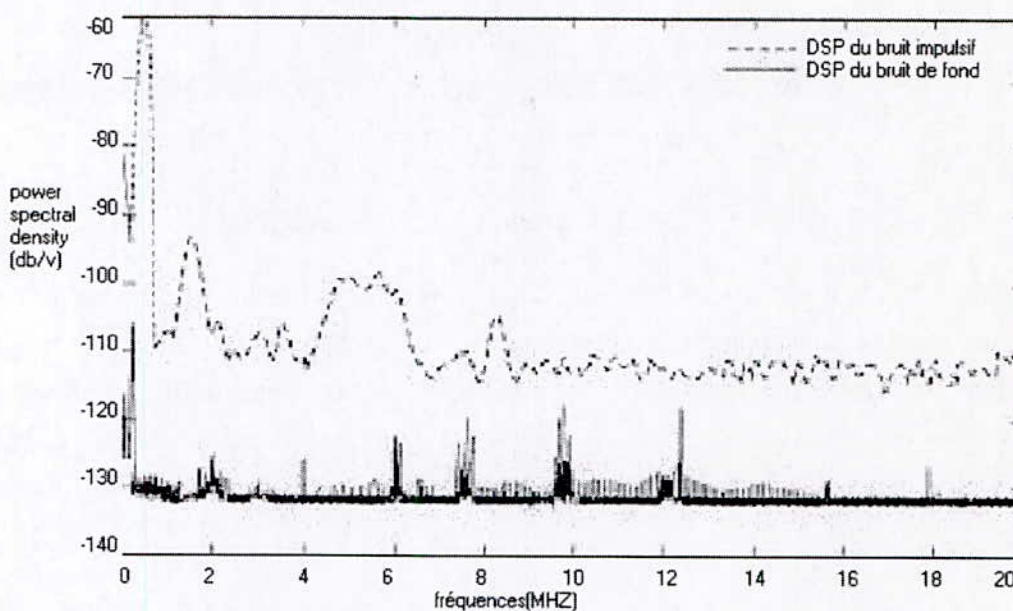
Comme le bruit de fond est stationnaire par seconde, minute ou heure, la faible variation du temps dans l'environnement du réseau électrique est introduite par les bruits de type 4 et 5, qui ont des durées de l'ordre des microsecondes et des millisecondes [DEG\_02]. Selon des mesures, le bruit de type 4 a une densité spectrale d'énergie qui décroît en fonction de la fréquence, un faible taux de répétition et une durée de quelques microsecondes ; dû à cette courte durée, on considère que ces impulsions de bruit n'introduisent pas des erreurs dans l'interprétation des symboles OFDM (technique de modulation adaptée voir *chapitre III*) qui a généralement une durée de  $500\mu s$ . Cependant, la durée du bruit de type 5 peut être de plusieurs millisecondes ou même des secondes avec une densité spectrale d'énergie jusqu'à plus de 50dB au-dessus de celle du bruit de fond.

Les sous-sections suivantes présentent des mesures, se trouvant dans des documents, des domaines fréquentiels et temporels du bruit impulsif asynchrone, qui

est considéré comme la cause principale pour la production des erreurs dans la communication via le réseau électrique.

### II.7.2.1. La densité spectrale d'énergie :

La densité spectrale d'énergie des impulsions des bruits est une caractéristique importante qui influence sur un système de communication. La densité spectrale d'énergie moyenne d'une impulsion de bruit comme tracée à la *figure II-6*, donne une idée du changement réel dans le scénario du bruit. Durant la production de quelques impulsions de bruit, la densité spectrale d'énergie du bruit de fond dans la même location est aussi tracée sur la *figure II.6*

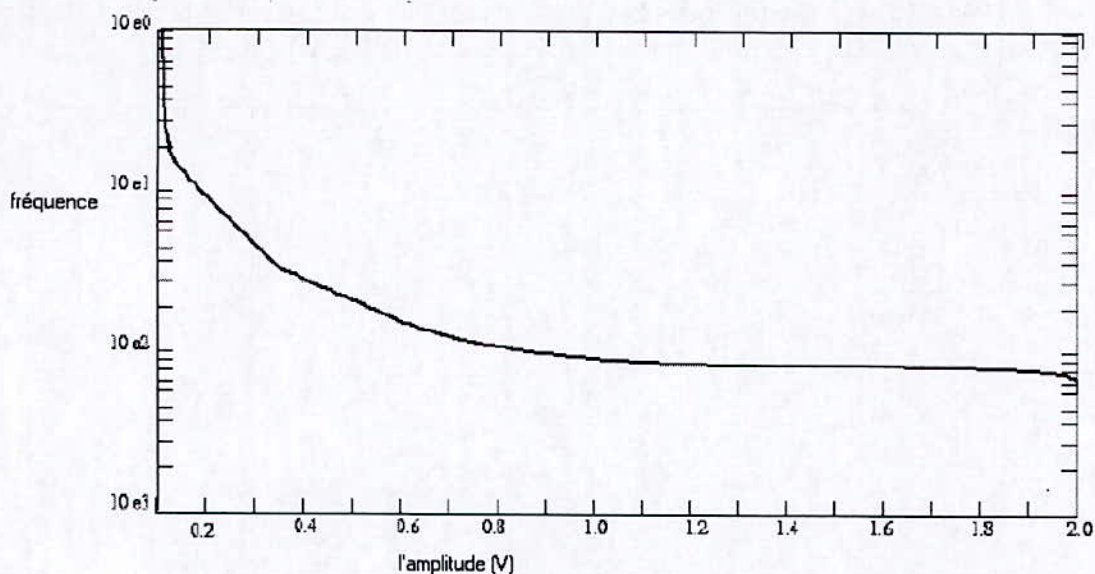


**Figure II.6.** : Densité spectrale d'un bruit de fond et d'un bruit impulsif [HIN\_00]

C'est évident que la densité spectrale d'énergie du bruit durant la production des impulsions est 20-60dB au dessus du niveau des périodes qui sont libres des bruits impulsifs.

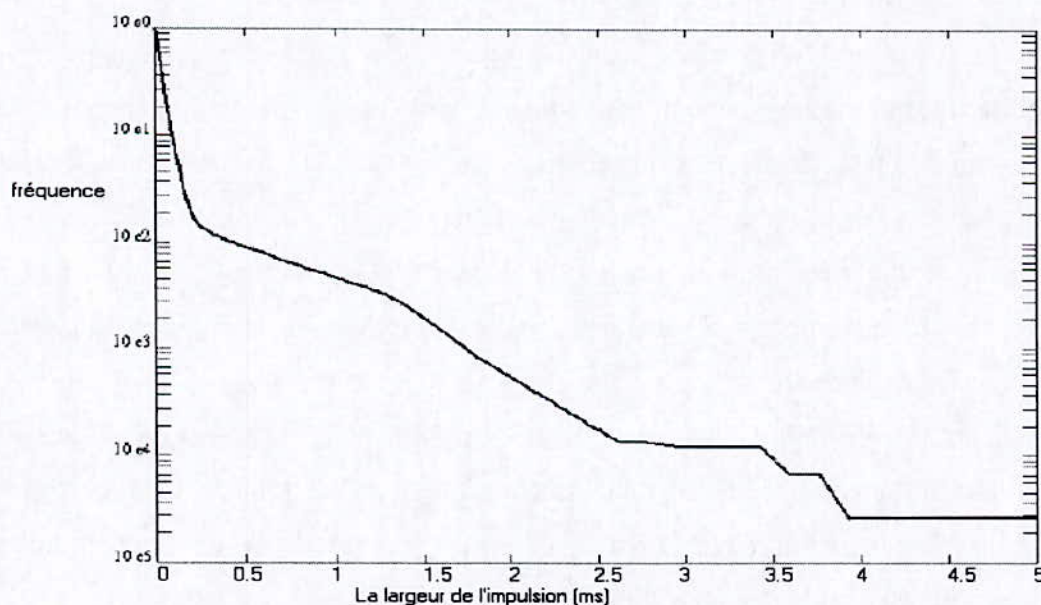
### II.7.2.2. Les caractéristiques du bruit impulsif :

Due à la grande influence du bruit impulsif sur la transmission de données, c'est essentiel d'obtenir des informations caractéristiques sur la probabilité de distribution de l'amplitude de l'impulsion, la largeur de l'impulsion, la distance entre deux impulsions, le temps inter arrivage. Les courbes des différentes mesures montrent la distribution de ces variables aléatoires. La distribution de l'amplitude est repérée dans la *figure II.7*, où la majorité des impulsions ont une amplitude entre 100mV et 200mV et qu'elles sont distribuées exponentiellement.



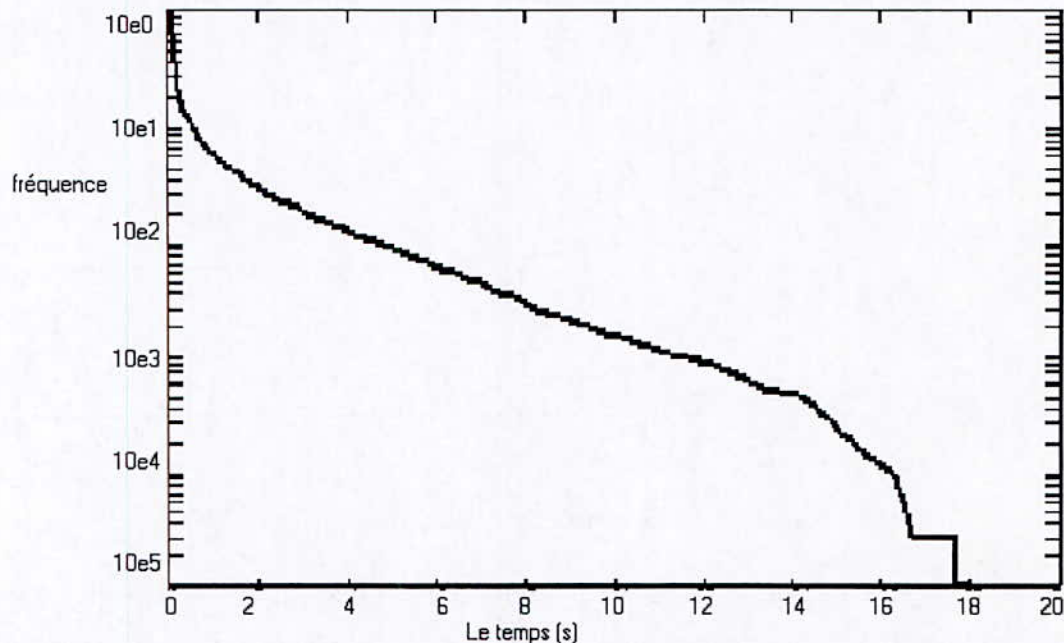
**Figure II.7 .L'amplitude du bruit impulsif [HIN\_00]**

Il peut être vu que la largeur de l'impulsion dont les probabilités sont tracées dans la *figure II.8* peut être modélisée par une variable aléatoire qui a une distribution exponentielle, avec une valeur moyenne égale approximativement à  $m=108.46$  [HIN\_00].



**Figure II.8 .La largeur d'impulsion d'un bruit impulsif [HIN\_00]**

Les résultats des mesures du temps inter arrivage entre deux impulsions est montré à la *figure II.9*, de même ces temps suivent une distribution exponentielle dont le paramètre est peut être pris approximativement égale à 1.67s [HIN\_00].



*Figure II.9 .Le temps inter arrivage des bruits impulsifs*[HIN\_00]

## II.8. Conclusion :

On a vu que les caractéristiques physiques du réseau électrique autant qu'un canal de transmission, présentent des effets indésirables notamment la distorsion due aux discontinuités et ruptures d'impédance dans le canal, ainsi que l'atténuation du signal causée par la nature du canal, on y distingue une atténuation sélective en fréquence et une autre proportionnelle à la distance. On a vu aussi que le fait que le réseau électrique comporte des branches, cause des réflexions des signaux transmis à chaque point de dérivation.

Les sources de bruits dans un réseau électrique sont aléatoires, et on les classifie selon leur influence sur le canal autant que bruit de fond où bruit impulsif, ce dernier ayant un pouvoir perturbateur important, il sera nécessaire de prendre en compte ses caractéristiques lors de la conception d'un système PLC.

Compte tenu de la qualité médiocre du canal physique du point de vue de l'utilisation que l'on veut établir, le chapitre suivant présentera les différentes solutions possibles afin d'adapter ce support à la transmission de l'information.



# *Chapitre III*

---

## *La Technologie PLC*

### III.1. Introduction :

On a vu dans le chapitre précédent que le support physique comporte plusieurs problèmes pour un objectif orienté à la communication, notamment la présence pertinente du bruit et des diverses atténuations et les distorsions dues à la nature du support. Dans ce présent chapitre on citera les solutions présentes qui sont adaptées dans les installations PLC actuelles. Concernant la couche physique on citera les principales méthodes de modulation dédiées PLC, on achèvera ces méthodes par une comparaison des performances. Il sera présenté par la suite, la couche liaison de données, en proposant une organisation générale de la couche MAC et on mettra en premier plan les techniques d'accès au média physique les mieux adaptées à la communication à travers le réseau électrique. On citera quelques performances dans le domaine de la QoS concernant la correction des erreurs. Par la suite, une idée générale sur la conception d'un modem PLC, sera présentée. On achèvera le chapitre par les différents types de PLC et leur adaptation aux différents segments du réseau électrique.

### III.2.Principe :

#### III.2.1.Définition :

La PLC est une technologie qui permet d'utiliser les lignes électriques basse et moyenne tension (220/380 Volts ou MT 10kV/60kV), pour y faire passer des ondes courtes à hautes fréquences sur la bande des 9KHz à 30 MHz, au moyen d'un couplage avec les signaux électriques (50Hz). Cette technologie vise donc à faire passer de l'information à bas débit ou haut débit sur les lignes électriques, en utilisant des techniques de modulation avancées. Les signaux à transporter sont numériques, pouvant être des données de l'image ou de la parole.

#### III.2.2. L'Architecture En Couches Des PLC :

L'architecture OSI est prise comme modèle de référence pour un réseau de communication sur les câbles électriques [SAK\_03]. Comme il a déjà été mentionné dans le *chapitre I*, dans la couche physique on y trouve tout le matériel et logiciel nécessaire au maintien et la désactivation des connexions physiques [PUJ\_00], destinées à la transmission des éléments binaires. Cette couche est caractérisée pour un réseau PLC par deux principaux types de modulation : Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) et Spread Spectrum (SS). La couche liaison de données utilise des protocoles d'accès au média, dédiés communication PLC, elle se distingue dans son architecture par, l'adoption de deux sous-couches : LLC et MAC.

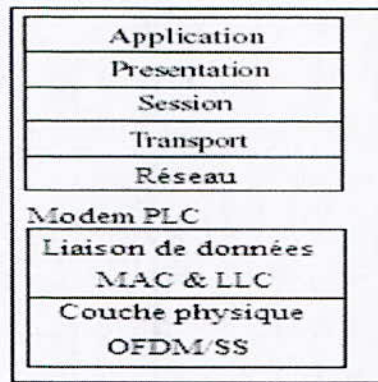


Figure .III.1. La structure en couche d'un réseau PLC.

### III.3. Les Techniques De Modulation :

Divers techniques de modulation développées pour la transmission de données dans les technologies des communications déjà répondues telle que l'ADSL et le sans fil, sont aussi utilisées dans la communication via le réseau électrique. On distingue deux principales techniques de modulation :

- Spread Spectrum (SS);
- Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM).

#### III.3.1. Spread Spectrum (SS) :

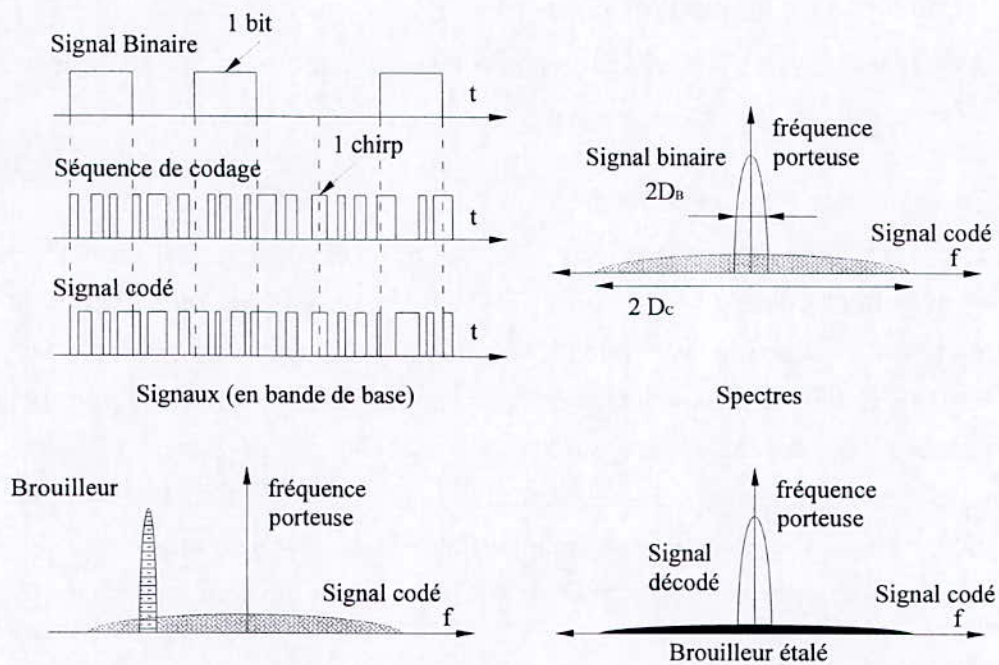
C'est la modulation unie porteuse à étalement de spectre. Historiquement, les systèmes SS ont été utilisés par les militaires et les services de secours, et aussi pour venir en aide lors des détériorations d'une bande étroite (pour un système à modulation en bande étroite) dans le media de communication.

##### III.3.1.1. Principe :

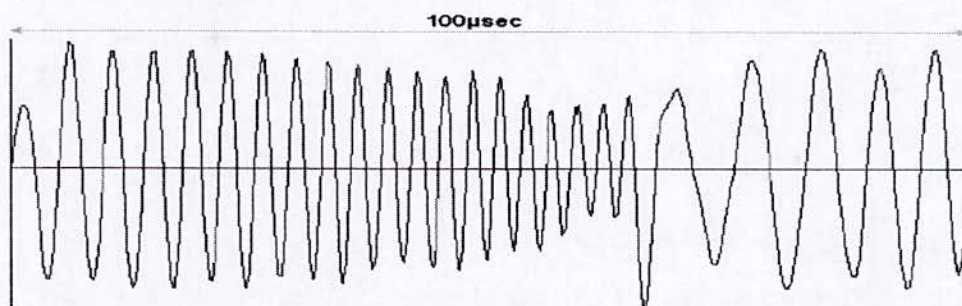
La méthode SS consiste à « étaler » l'information sur une bande de fréquences beaucoup plus large que la bande nécessaire au transport de l'information, [ZUB\_03] ainsi le signal est dispersé dans un spectre élargi, de telle sorte qu'il ait une densité d'énergie inférieure tout en conservant la même énergie globale, comme le montre la *figure III.2*. Cette moindre densité d'énergie diminue l'incidence des interférences éventuelles et les distorsions liées à la propagation, ainsi elle permet la transmission de données numériques confidentielles car le signal se confond avec le bruit. En effet le but est de transformer un signal d'information de manière à ce qu'il apparaisse, en terme d'énergie spectrale, comme un bruit uniforme. Le bruit a un spectre plat, sans relief cohérent, dans lequel le signal est noyé pendant la transmission.

Le signal est codé au départ, un code est assigné à chacun des usagers afin de permettre le décodage à l'arrivée. Si le récepteur n'a pas le code, alors le signal, à la réception est perçu comme du bruit. L'étalement est assuré par un signal pseudo aléatoire court auto synchronisé et variable en fréquence, appelé code d'étalement, il agit autant que porteuse. Le signal

modulé appelé chirp, illustré sur la *figure III.3*, est toujours du même code (d'étalement) connu et détectable par tous les nœuds. Chaque symbole de communication est alors codé sous forme de chirp, lui procurant un comportement pseudo aléatoire.



**Figure .III.2.** Modulation Spread Spectrum [ZUB\_03]



**Figure .III.3.** Une chirp d'une porteuse SS.

A l'arrivée, l'opération de rassemblement qui s'opère au niveau du récepteur est symétrique au processus d'étalement exécuté au transmetteur, qui est répétée pour démoduler le signal en bande de base (ou en une fréquence intermédiaire) avec le même code, tandis que les autres signaux transmis, qui résultent d'échos ou d'interférences, [ZUB\_03] sont perçus par le récepteur comme étant du bruit et sont alors filtrés. Cette technique permet de partager la même fréquence dans un périmètre donné en utilisant différents codes d'étalement CDMA (Code Division Multiple Access).

Les critères qui caractérisent un système à spectre étalé SS, sont en général:

- La bande du signal transmis doit être plus large que celle du message.

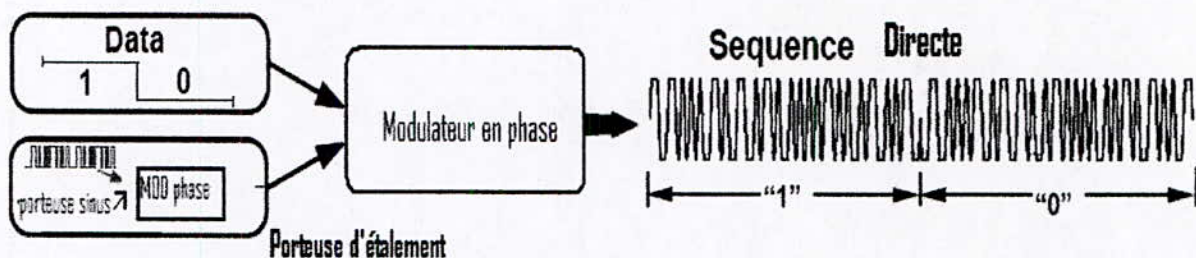
- La largeur de bande du signal doit être générée par une sinusoïde modulante indépendante : c'est le signal d'étalement, ce dernier doit être connu par le récepteur afin de détecter et reconstruire le signal du message.

### III.3.1.2. Les types de modulation SS :

Les deux techniques de modulation en SS les plus connues sont, « séquence directe » et « saut de fréquence ».

#### III.3.1.2.a. Séquence Directe (DS-SS):

Le principe de la séquence directe (DS-SS) est d'étaler le signal sur une plus grande bande de fréquence, comme sur la *figure III.4*, en le multiplexant ou superposant avec une signature (le code) constituée de valeurs binaires pseudo aléatoires pour produire un code incohérent, [ZUB\_03], le système opère à travers un canal fixe. Afin d'étaler le signal, chaque bit du paquet à transmettre est pré modulé par un code. Au niveau du récepteur le signal d'origine est reconstruit en recevant l'ensemble du canal étalé et en le démodulant avec le même code. Puisqu' il utilise qu'une faible partie de la bande totale utilisée par le système, la probabilité d'interférence avec un signal bande étroite, est faible pour un système (DS-SS).



**Figure .III.4.** La modulation DS-SS [ECH\_04].

#### III.3.1.2.b. Saut De Fréquence (FH-SS) :

Cette technique utilise un jeu de canaux à bandes étroites, qui sont tous traversés par la séquence. Le signal saute rapidement d'une fréquence à l'autre, de manière pseudo aléatoire à travers une bande large, comme sur la *figure III.5*. L'ordre spécifique dans lequel les fréquences sont occupées dépend d'une séquence du code, [ZUB\_03] et le nombre de saut d'une fréquence à l'autre est fonction du débit de l'information. La largeur de bande d'un signal FH est égale à  $W$  fois le nombre de créneaux fréquentiels utilisés, ou  $W$  est la largeur de bande de chaque canal de saut. Ce système évite les interférences en ne restant jamais sur le même canal ; si le canal est en mauvais état, le signal attend le prochain canal en bon état.

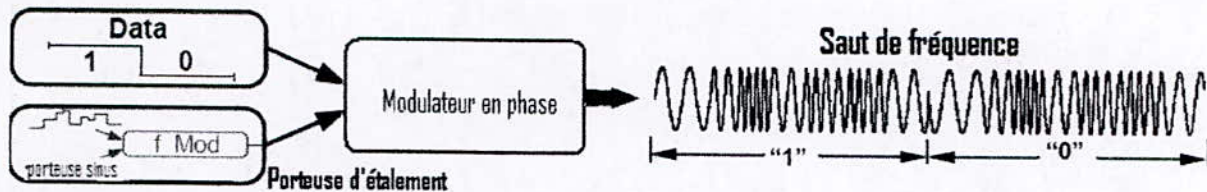


Figure .III.5. La modulation FH-SS [ECH\_04].

Il est aussi possible d'utiliser d'autres formes du signal d'étalement tel qu'il est illustré sur la figure III.6. en se basant sur une chirp triangulaire.

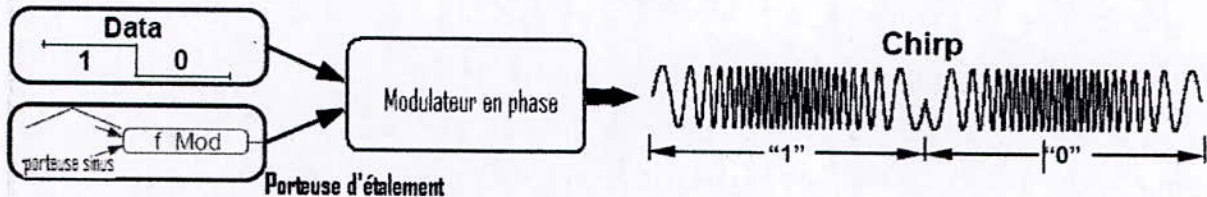


Figure .III.6. Modulation SS avec une chirp triangulaire [ECH\_04].

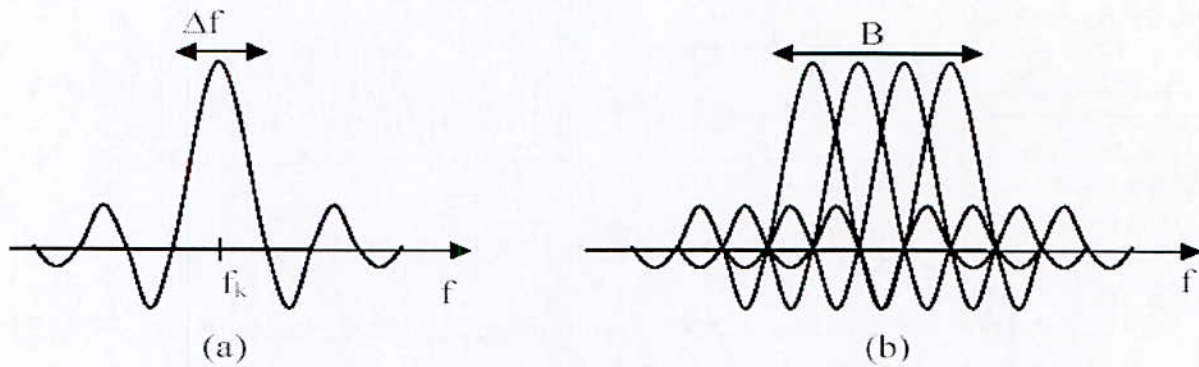
### III.3.2. Orthogonal Frequency Division Multiplexing:

L'OFDM est un procédé de modulation qui consiste à répartir un train binaire à haut débit en  $N$  sous canaux orthogonaux à bas débit. Le terme modulation est un abus de langage dans le sens où il s'agit de répartir l'information sur  $N$  sous porteuses en bande de base. La modulation à proprement parler, qui permet d'adapter le signal autour de la fréquence centrale, reste quant à elle identique à celle dans les chaînes de transmission numériques classiques.

#### III.3.2.1. Orthogonalité fréquentielle :

On peut percevoir la notion d'orthogonalité du signal OFDM dans le domaine fréquentiel, [DEG\_02] en effet si chaque porteuse  $s_k(t)$  est transmise pendant la durée  $T_u$ , cela revient à appliquer à la sous porteuse  $k$  une porte de durée  $T_u$ , dont l'enveloppe spectrale est un sinus cardinal qui s'annule aux premières fréquences  $f_z = f_k - 1/T_u$  et  $f_z = f_k + 1/T_u$ . On remarque que ces deux fréquences sont aussi respectivement égales à  $f_{k-1}$  et  $f_{k+1}$ . On obtient ainsi l'enveloppe spectrale représentée sur la figure III.7., le spectre (a) étant celui d'une sous porteuse  $k$ , de bande  $\Delta f = 1/T_u$  et le spectre (b) celui du signal OFDM qui a un nombre de sous porteuses à  $N=4$  qui s'étalent sur  $B=N \cdot \Delta f = N/T_u$ .

L'orthogonalité dans le domaine fréquentiel est réalisée, puisque le maximum de chaque sous porteuse correspond à un « zéro » des autres. Cette condition permet ainsi d'avoir une occupation spectrale idéale et d'éviter les interférences entre sous porteuses.



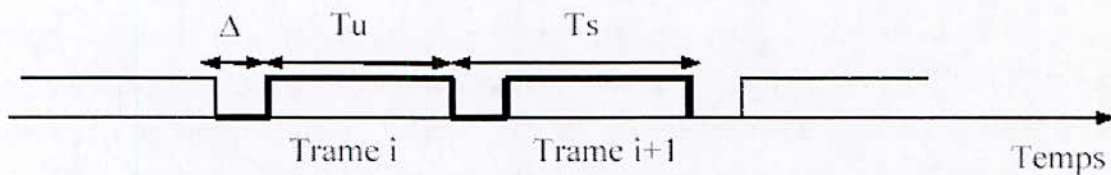
**Figure III.7.** (a) : Spectre d'une sous porteuse. (b) : Spectre d'un signal OFDM. [DEG\_02]

### III.3.2.2. Méthodes d'annulation des interférences :

Dans cette partie, on présente brièvement les méthodes d'égalisation classiques destinées à la modulation multi porteuses pour annuler les interférences entre porteuses, et les interférences entre trames OFDM, Ce dernier type d'interférences est communément appelé interférences entre symboles.

#### III.3.2.2.a. Interférence entre symboles :

Les interférences entre symboles sont dues au comportement multi trajets du canal, le signal reçu provenant de la contribution du trajet direct et des trajets multiples introduisant des déphasages et des retards, ces derniers pouvant être du même ordre de grandeur que la durée d'un symbole, pour remédier à ce problème, on ajoute entre deux trames OFDM, un préfixe ou intervalle de garde, [DEG\_02] dont la durée  $\Delta$  doit être supérieure au retard maximum des signaux issus des trajets indirects. L'insertion de ce préfixe est représentée sur la *figure III.8*.



**Figure III.8.** Insertion du préfixe de garde dans la trame OFDM.

Si on ajoute un préfixe dont la durée est identique à celle de  $L$  symboles, la nouvelle période  $T'_e$  d'échantillonnage pour obtenir le même débit doit être égale à [DEG\_02]:

$$T'_e = \frac{T_u}{N+L} = \frac{NT_e}{N+L}$$

La durée effective de la trame OFDM, comportant les  $N$  symboles échantillonnés à  $T'_e$  est désormais réduite à :

$$T'_u = NT'_e = \frac{NT_u}{N+L}$$

De même l'espacement inter fréquence  $\Delta f'$  entre deux porteuses devient :

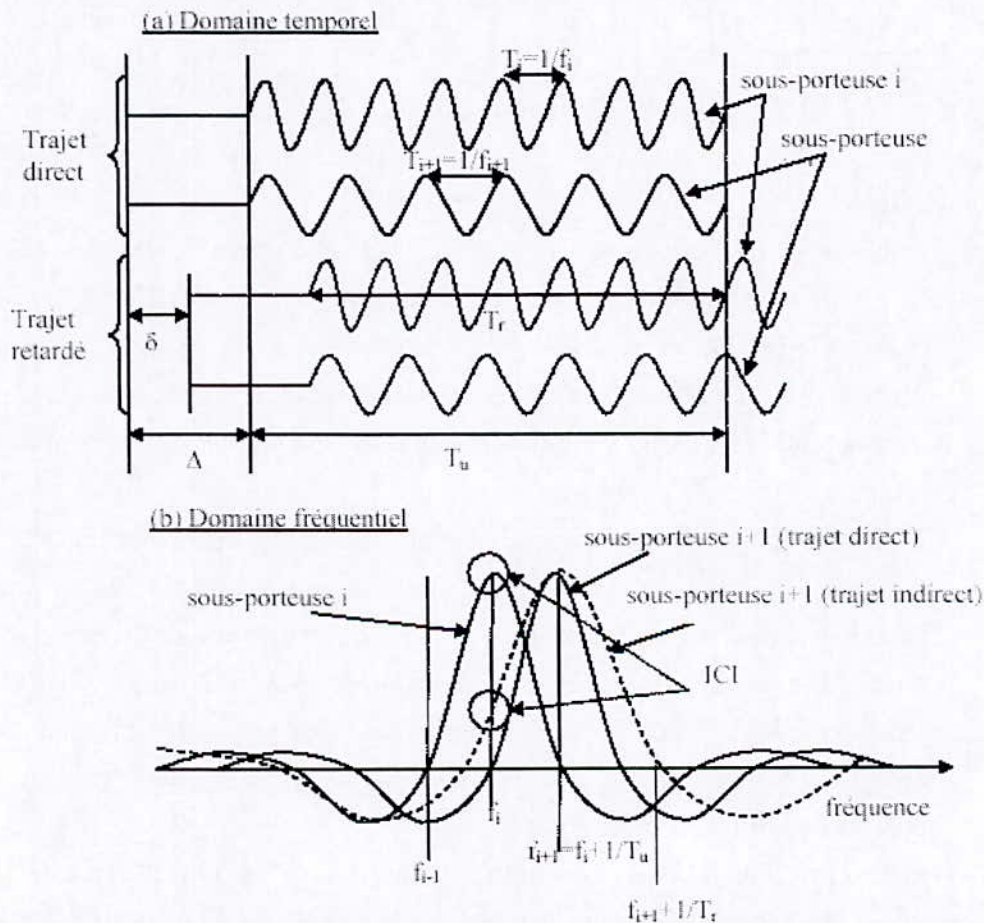
$$\Delta f' = \frac{1}{T'_u} = \frac{N+L}{N} \Delta f$$

La bande de transmission est donc augmentée du même facteur  $k=(N+L)/N$ .

### III.3.2.2.b. Interférence entre sous canaux :

Si le préfixe inséré au début d'une trame OFDM est muet (sans aucun signal), des interférences inter porteuses, vont se produire, pour expliquer ce phénomène, il est beaucoup plus facile de raisonner dans le domaine fréquentiel plutôt que dans le domaine temporel, non échantillonné, soit par exemple une transmission OFDM à  $N$  sous porteuses à travers un canal à deux trajets, dont le retard du trajet indirect est  $\delta$ , inférieur à la longueur du préfixe  $\Delta$ , la durée d'une trame OFDM sans son préfixe est comme précédemment noté  $T_u$ .

Observons sur la *figure III.9*, [DEG\_02] les chronogrammes de deux voies particulières, correspondant aux sous porteuses de fréquences respectives  $f_i$  et  $f_{i+1}$ .



**Figure III.9.** Chronogrammes des voies correspondant aux sous porteuses  $f_i$  et  $f_{i+1}$ .

Afin d'éviter ces interférences, le préfixe ne doit pas être muet, mais être la copie des  $L$  derniers symboles de la trame OFDM, [DEG\_02] comme le présente la *figure III.10*. On parle dans ce cas de préfixe cyclique, l'avantage de cette copie est que chaque signal, issu d'un trajet multiple, possèdera toujours un nombre entier de sinusoides sur la durée  $T_u$ .



Dans le domaine fréquentiel et grâce au préfixe cyclique, la sommation des signaux de la sous porteuse  $f_i$  issus des divers trajets ne détruit donc pas l'orthogonalité des sous porteuses, mais introduit seulement un déphasage. La valeur de  $L$  est choisie de telle façon que la durée des  $L$  symboles soit supérieure au retard maximum entre trajets.

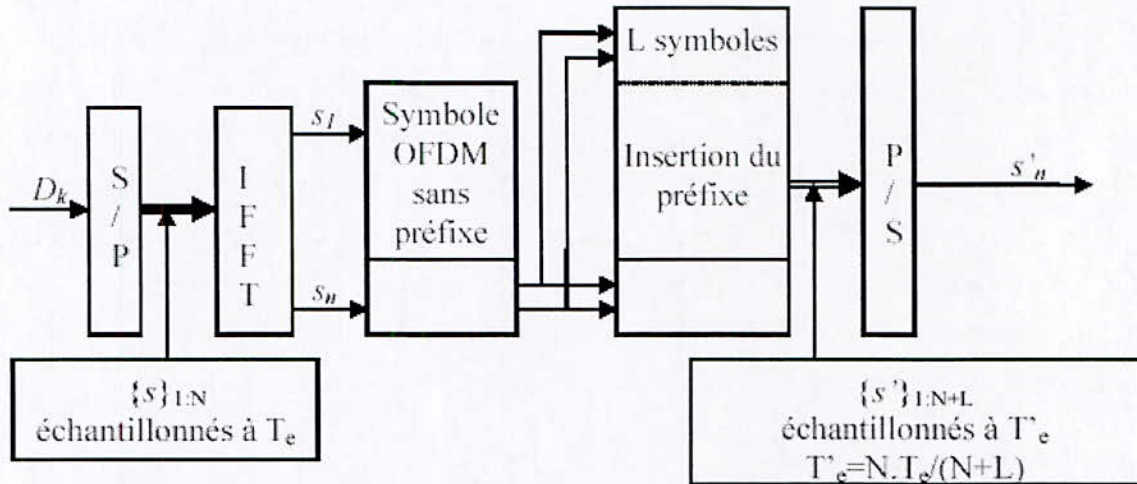


Figure .III.10. La copie des derniers symboles OFDM dans le préfixe de garde.

### III.3.3. Comparaison Des Techniques De Modulation :

Une comparaison des performances de l'OFDM et SS est présentée ci-dessous :

- *Débit* : On a une meilleure exploitation de la bande fréquentielle en OFDM, ainsi il est conseillé d'utiliser l'OFDM pour monter en débit. Par contre l'utilisation du Spread Spectrum ne permet que du bas débit, car la largeur de bande utilisée n'est pas très grande. En effet selon le théorème de Shannon le débit est proportionnel à la largeur de bande utilisée.
- *Confidentialité et sécurité*: Un des avantages du Spread Spectrum, c'est qu'on ne peut pas décoder le message encodé sans connaître la clé privée utilisée pour l'encodage lors l'étalement du signal, Il est donc difficile de le détecter, car il est confondu avec les bruits, et est aussi difficile à intercepter et à démoduler, contrairement en OFDM qui est sécurisé que par la clé de cryptage. Ainsi il est conseillé d'utiliser Spread Spectrum pour avoir un plus grand degré de sécurité et de confidentialité des données.
- *Probabilité d'interférence* : Un autre avantage du Spread Spectrum est sa capacité à rejeter les interférences non désirées qui sont dues à une transmission simultanée d'une autre donnée, cette technique de modulation est optimisée pour lutter contre le bruit, dont elle limite mieux les effets, grâce à une faible probabilité d'interférence. En plus, ils sont plus difficiles à interférer que les signaux à bande étroite. Cette faible probabilité d'interférence et d'interception est la raison pour laquelle, les militaires et les unités de sécurité ont utilisé cette technique pendant

longtemps. En OFDM la probabilité d'interférence avec les bruits et d'autres signaux transmis, est un peu plus élevée car l'énergie spectrale des signaux OFDM est plus importante.

#### III.4. La Couche MAC dans la PLC :

Plusieurs utilisateurs sont connectés au poste transformateur par l'intermédiaire des câbles du réseau électrique, qui représente le seul moyen de transmission physique de la communication dans le réseau PLC, et qui est utilisé par tous les abonnés de ce même réseau PLC, par conséquent il y a une nécessité de l'organisation d'accès au moyen de transmission parmi plusieurs utilisateurs.

L'organisation de l'accès multiple est définie dans la couche MAC (Media Access Control). La tâche de la couche MAC est de délivrer les données préparées à la transmission à la couche physique du réseau, qui transmet simplement le flux de données à travers le média physique. Dans l'autre sens de transmission, la donnée doit aussi être reçue de la couche physique par la couche MAC et préparée et délivrée à la couche LLC.

Il y a plusieurs facteurs dans n'importe quel système de communication, notamment dans un système PLC, qui doivent être pris en compte lors du développement de la couche MAC. Dans le cas d'un accès réseau comme les systèmes d'accès PLC, les caractéristiques suivantes doivent être analysées [HIN\_00]:

*i.* La structure des réseaux d'accès PLC :

Après une considération de la structure des réseaux PLC, une structure de référence du réseau (référence modèle) pour le développement de la couche MAC doit être définie.

*ii.* Les services des communications impliqués dans la PLC (Internet, téléphone,...) :

La spécification des services de communication pour l'examen de la couche MAC, et l'estimation de la capacité du réseau à envoyer /recevoir un grand nombre possible de services de communication avec soit une faible ou une forte demande de transmission, aide à spécifier les caractéristiques et le protocole MAC à implémenter dans le réseau.

*iii.* La stratégie de connexion des réseaux d'accès PLC au réseau fédérateur et les réseaux de communication WAN :

Les réseaux PLC interagissent avec d'autres technologies de transmission, car ils sont interconnectés avec les réseaux de communication classiques.

Lors de l'organisation de la couche MAC, il faut prévoir une interconnexion avec les systèmes de transmission du réseau fédérateur.

La couche MAC et son protocole doivent être capables d'apporter une communication efficace avec son réseau fédérateur, et d'assurer une interconnexion avec un grand nombre possible de différents systèmes de communication.

D'autres caractéristiques spécifiques à la PLC doivent être connues :

*i.* Les caractéristiques du système de communication PLC :

La couche MAC utilise les services de la couche physique pour l'émission et la réception des données, par conséquent les caractéristiques des systèmes de transmission PLC sont très importantes comme une entrée pour le développement de la couche MAC.

*ii.* L'impact des perturbations dans les réseaux PLC sur la couche MAC.

Une autre particularité des systèmes PLC est l'influence fréquente de plusieurs types de bruit dans le réseau électrique (voir *chapitre II*), par conséquent, les réseaux PLC sont plus perturbés que n'importe quel autre réseau de communication câblé.

De plus, à cause du rayonnement électromagnétique des réseaux PLC à l'environnement, ils doivent circuler avec une très faible énergie des signaux, cela rend les systèmes PLC plus sensibles aux perturbations, donc ils doivent traiter ces problèmes en interagissant la couche physique et la couche MAC lors du développement de méthodes de correction d'erreur.

#### III.4.1. la structure physique du réseau PLC :

Il est connu que les structures des réseaux PLC basse tension sont très différents. Cela dépend de plusieurs facteurs :

- *L'emplacement du réseau PLC* : Zone résidentielle urbaine, industrielle ou économique.
- *La densité des utilisateurs* : Nombre d'utilisateurs du réseau PLC, et leur concentration (des maisons individuelles- des petits blocks- des tours).
- *La longueur du réseau* : (court, moyen, long).
- *La structure du réseau- nombre de sections* : Il y a généralement plusieurs sections à partir de la station de base (dans le poste transformateur) aux utilisateurs, chaque section peut avoir une structure différente.

Les utilisateurs peuvent être connectés ou pas et ils peuvent être distribués symétriquement ou pas, il y a aussi une différence entre les longueurs du réseau et les longueurs des sections des réseaux.

#### III.4.2. Modèle Du Réseau :

Généralement le réseau d'accès PLC est connecté à son réseau fédérateur par la station de base principale. Cela signifie que la communication dans un réseau PLC est centralisée dans la station de base qui se charge de la connexion avec le réseau fédérateur. Cependant la communication interne entre les utilisateurs d'un réseau PLC indoor n'est pas centralisée dans la station de base.

On peut différencier deux transmissions dans un réseau PLC :

- i. Les données descendantes /le flux descendant (downlink/downstream) de la station de base vers les utilisateurs.
- ii. Les données montantes/le flux montant (uplink/upstream) des utilisateurs vers la station de base.

Si on suppose que la station de base est placée dans le transformateur, on peut conclure les caractéristiques suivantes de transmission:

- L'information envoyée par la station de base qui est dans la direction descendante, est transmise à toutes les sous-sections du réseau, et reçue par tous ses utilisateurs.
- Dans la direction montante, l'information est envoyée par n'importe quel utilisateur non seulement à la station de base, mais aussi à tous les utilisateurs dans le réseau.

Cela signifie que le moyen de transmission de la PLC (le câble) a comme topologie une structure en bus, bien que le support du réseau basse tension ait une topologie arborescente; cela est aussi valide pour n'importe section du réseau. Par conséquent, il est possible de considérer que la topologie du réseau PLC est en bus.

#### III.4.3. La spécification du service de la couche MAC :

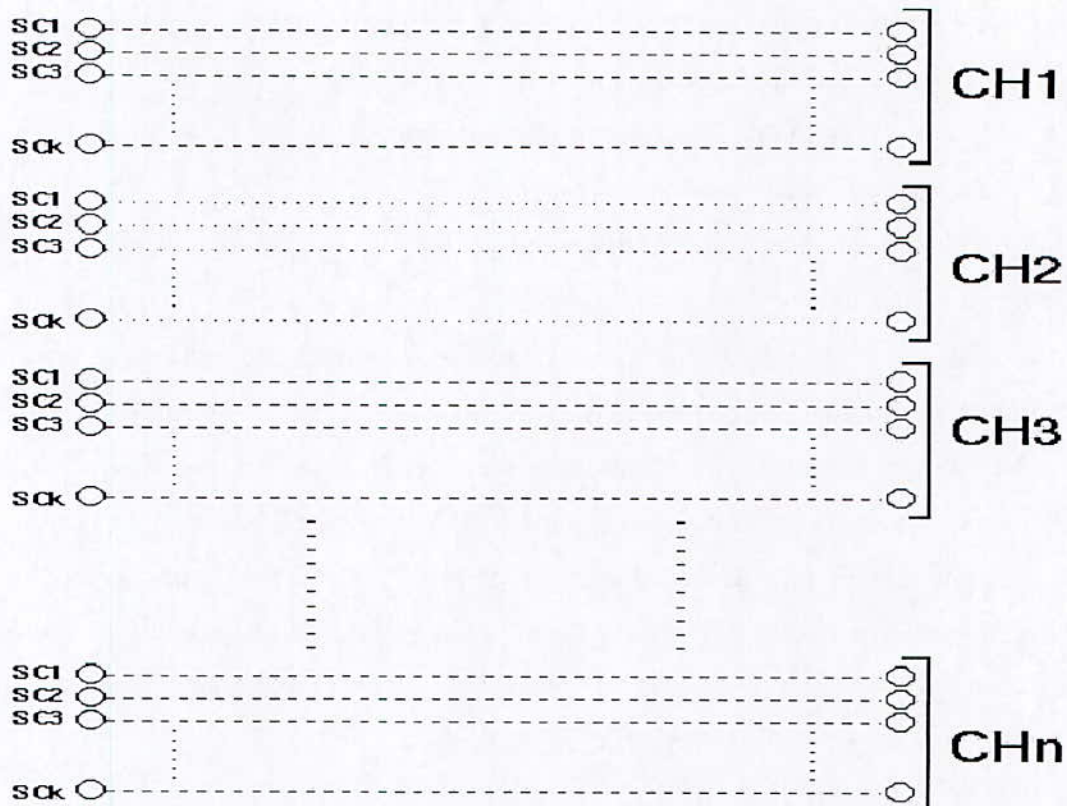
Les utilisateurs d'un réseau PLC utilisent des services dans le développement de la couche MAC. Les services de télécommunication suivants doivent être pris en considération :

- i. Les connexions orientées services comme la téléphonie.
- ii. Les connexions peu services comme la transmission des données sans des garanties de QoS.
- iii. Les services PLC spécifiques comme la télé relève et le contrôle du réseau électrique (puissance, charge...etc.).
- iv. Les transmissions de données avec garantie QoS.

La couche MAC de la PLC et son protocole MAC, doivent être capables de traiter les services mentionnés pour assurer une fiabilité du système face à d'autres technologies.

#### III.4.4. La couche MAC dans les systèmes PLC basés OFDM :

Dans cette partie, la couche MAC est développée [HIN\_00] autour d'un système PLC ayant comme technique de modulation l'OFDM. Le système de transmission OFDM utilise un nombre de sous porteuses dans un spectre de fréquence pour la transmission de données. Chaque sous porteuse a une capacité de transmission, et un groupe de sous porteuses est composé pour construire un canal de transmission :



*Figure.III.11. Un symbole OFDM.*

On cite trois possibilités pour l'exploitation de la capacité, dans le système OFDM à considérer dans le développement de la couche MAC :

- i. Le canal de transmission, (chaque canal comporte un nombre défini de sous porteuses -sous canaux) a une capacité de transmission fixée. La couche MAC gère le choix des canaux à utiliser pour la transmission de sorte à garder la même capacité de transmission. Les canaux de transmission comportent toujours les mêmes sous canaux, c'est-à-dire, si l'un des sous canaux n'est pas disponible (une sous porteuse est perturbée), le canal de transmission ne peut pas être utilisé malgré le fait que d'autres sous canaux soient valables.
- ii. Le canal de transmission a une capacité variable. Les systèmes OFDM peuvent réagir avec une réduction de capacité de transmission des sous canaux selon la situation de la perturbation. Dans ce cas, une capacité d'un canal de transmission est aussi réduite ce qui pose problème pour le service utilisant ce canal.
- iii. L'exploitation des canaux OFDM peut se faire en mixant des canaux à capacité fixe et les restants seront à capacité variable, et on alloue les plus disponibles au service le plus prioritaire.

### III.4.5. Analyse des protocoles MAC pour la PLC :

Dans les sous-sections précédentes, on a mentionné plusieurs facteurs à être considérés dans le développement de la couche MAC pour les réseaux PLC, actuellement il n'y a aucune normalisation de la couche MAC pour PLC. Dans cette section quelques orientations [HIN\_00] pour son développement sont données:

Le développement de la couche MAC et du protocole MAC peut être divisé par l'analyse des sous-tâches suivantes :

- i. L'organisation de la couche MAC.
- ii. Signalisation et définition du protocole MAC.
- iii. Procédure Duplex.
- iv. Manipulation d'erreurs.

L'organisation de la couche MAC inclut les principes de la transmission des données qui doivent être suivis dans le système PLC ainsi que les réflexions basiques de signalisation, manipulation d'erreur et la procédure duplex à implémenter dans le système. Il doit être décidé si une collision est libre ou une collision de transmission peut être passive vis de l'arrêt de transmission, ainsi que la façon avec laquelle les divers services sont mixés dans le réseau.

### III.4.6. Méthodes D'Accès Au Média :

Tous les utilisateurs dans un réseau de communication utilisent le même média physique, donc des techniques qui leur éviteraient de transmettre au même temps, sont nécessaires, ces dernières sont implémentées sur la couche MAC. Elles sont connues sous le nom de "méthodes d'accès au média". L'on cite les plus utilisées en PLC : CSMA/CA ; Polling ; Le jeton de passage et TDMA.

#### III.4.6.1. CSMA/CA :

Cette technique d'accès est la plus utilisée en PLC Indoor, qui est aussi une recommandation de l'alliance Homplug. Elle constitue un protocole à évitement de collisions. C'est à dire, qu'elle consiste à résoudre la contention avant que les données ne soient transmises. Pour ce faire, elle opère par le biais d'un échange d'accusés de réception réciproque, entre l'émetteur et le récepteur, et de temporisateurs.

La procédure des mécanismes du CSMA/CA, [PUJ\_00] est décrite ci-dessous :

- Afin de s'assurer qu'aucune activité n'est détectée, et que la voie est libre, le poste désirant émettre des données, teste le canal à plusieurs reprises, en comparant la densité d'énergie du signal à un certain seuil. Le cas échéant, il attend un temps aléatoire appelé DIFS (Distributed Inter Frame Space) ;

- L'émetteur envoie au récepteur un message de type RTS (Ready To Send). Ce message contient des données sur la vitesse de transmission et la taille des données à transmettre ;
- Le récepteur renvoie alors un message de type CTS (Clear To Send) pour dire qu'il est prêt à recevoir les données ;
- L'émetteur émet ses données ;
- Le récepteur retourne un accusé de réception ACK (Acknowledge) si le nombre de bits reçus correspond à la taille prévue par le RTS.

Tout message reçu doit être acquitté immédiatement par le récepteur. L'envoi de nouveaux messages se fait qu'après un délai afin de garantir un transport sans pertes d'informations. Le non retour de l'accusé de réception au bout d'un intervalle de temps prédéterminé permet de détecter s'il y a eu collision, donc elle ne nécessite pas un circuit de détection de collisions coûteux et qui complexifierai le réseau d'avantage, contrairement au CSMA/CD.

L'utilisation du CSMA/CA plutôt que du CSMA/CD (détection de collision), qui est adoptée pour la couche MAC d'Ethernet, est surtout justifiée par le fait que dans un réseau PLC, il se peut que certaines machines soient suffisamment loin de la machine émettrice pour que cette dernière détecte une collision par simple écoute du trafic, l'intégration d'accusés de réception est alors nécessaire. Elle est donc plus simple, plus efficace et plus économique.

La méthode développée dans Homeplug 1.01 ajoute différents mécanismes à la technique CSMA/CA permettant d'avoir :

- des classes de priorités pour les trames à envoyer ;
- un système équitable pour ne pas défavoriser certaines stations désirant émettre par rapport à d'autres ;
- des mécanismes de contrôle de la latence et donc la possibilité de fournir une bonne qualité de service.

#### III.4.6.2. Polling :

Dans un système polling, [ZUB\_03] une station fonctionne comme un maître du réseau et toutes les autres stations fonctionnent comme esclaves de ce maître. Ce dernier interroge chaque station, à tour de rôle, si elle a une donnée à transmettre. Si la réponse est oui, il lui donne le droit de transmettre ses données. Par contre si la réponse est non, le maître interroge le prochain esclave.

#### III.4.6.3. Le jeton de passage (Token Passing):

Pour accorder la permission de transmettre à travers le média, cette technique utilise un jeton ("token"), qui est un petit morceau de donnée, [ZUB\_03]. La station qui a le jeton peut

injecter les données sur le media. Lorsqu'une station est en cours de transmission, elle libère le jeton et la prochaine station qui va transmettre l'acquiert.

#### III.4.6.4. TDMA (Time division multiple access):

Dans cette technique (accès multiple à répartition dans le temps ou AMRT dans le jargon français), le temps est découpé en tranches, [PUJ\_00] et à chaque utilisateur est attribué un intervalle de temps (*Time Slot*) pendant lequel il est le seul à pouvoir échanger des données. Cette technique est plutôt adoptée pour les PLC Indoor.

#### III.4.7. Les Mécanismes De Correction D'Erreur :

Le système de transmission PLC est établi de sorte que l'énergie du signal soit au dessous d'un seuil limité, défini par des organisations de régulation. D'un autre coté, le niveau du signal doit être suffisamment élevé pour garder les données de transmission sur le réseau PLC le plus possible, en supportant les atténuations et les bruits. Ceci signifie que le *SNR* (Signal Noise Ratio) dans le réseau doit être suffisamment élevé pour permettre une communication fiable, en évitant les perturbations, notamment l'influence du bruit de fond. Si c'est le cas, alors l'application d'autres méthodes spéciales contre les perturbations n'est pas nécessaire.

Même à supposer que le rapport signal sur bruit soit assez important pour pouvoir résister à l'influence d'un bruit de fond dans un réseau PLC, la présence du bruit impulsif rend difficile une communication libre en présence d'erreurs à travers le média.

Les perturbations présentes à long terme, rendent une partie de la capacité du réseau invalide. Cette dernière est déconnectée par l'intermédiaire d'un control d'allocation de ressources, et n'est alors plus utilisé pour aucune transmission. La couche MAC doit réagir aux perturbations à long terme qui rendent un ou plus de canaux de transmission non disponibles, pour une longue durée. Dans ce cas, le canal perturbé ne sera pas utilisé jusqu'à la disparition de la perturbation, cela veut dire qu'une sorte de réaffectation doit être faite pour rendre possible une transmission supplémentaire des connexions affectées, maintenant, en utilisant d'autres canaux de transmission.

Face aux différents bruits intervenant lors de l'échange de données entre deux stations, les trames reçues par le destinataire peuvent contenir de nombreuses erreurs. Afin de résoudre ces problèmes et assurer un moyen de transmission robuste pour les couches supérieures du modèle OSI, différents mécanismes de réduction d'erreurs connus en communication numérique, ont été introduits. Les plus utilisées en PLC sont ARQ et FEC, le choix d'utiliser l'une ou l'autre, dépend de l'application.

Pour remédier ou minimiser les effets des perturbations ou des bruit impulsifs, il existe en plus des mécanismes FEC et ARQ, la possibilité de mettre au point une durée suffisante du symbole transmis (exp. Durée d'un symbole OFDM). En effet si la durée d'une perturbation



impulsive est suffisamment petite relativement à celle du symbole, alors l'influence de cette perturbation serait évitée. La plus grande difficulté pour les systèmes de transmission PLC sont les bruits impulsifs qui ont une énergie plus importante que les bruits de fond. Dans ce cas le  $SNR$  n'est pas assez pour éviter les perturbations. Mais si la durée de la perturbation est courte, ce qui veut dire qu'elle est plus courte que la durée du symbole transmis par la couche physique de la PLC, il n'y a pas d'influence de la perturbation sur la transmission. Eg : la durée typique d'un symbole OFDM est souvent  $500\mu s$  et un bruit impulsif de durée plus courte que  $500\mu s$  ne détruit pas la transmission de données.

L'ensemble des procédures de manipulation d'erreur : la mise au point de la durée du signal et les mécanismes FEC, sont des caractéristiques de la couche physique du réseau. La couche MAC contrôle l'accès au média en considérant uniquement les ressources (la capacité) du réseau disponibles, tant dire que les corrections d'erreur faites par la couche physique ne lui sont pas apparentes. D'autre part, les mécanismes ARQ réagissent aux erreurs survenues dans la donnée, qui ne peuvent pas être corrigées par la couche physique, et nécessitent la retransmission des unités de données erronées, qui est faite dans la couche liaison logique de données (LLC, couche supérieur de la couche 2 : la couche liaison), cependant le média d'accès de la donnée retransmise est contrôlé par la couche MAC. Donc, il y a une interaction entre la couche MAC et les mécanismes ARQ qui influencent les performances du réseau.

#### III.4.7.1. ARQ (Automatic Repeat Request):

La donnée transmise par la couche MAC est délivrée à la couche suivante du réseau LLC. A ce niveau, elle peut être reconnue si le contenu de la donnée ne contient pas d'erreurs. Dans le cas d'erreurs, la donnée détruite doit être retransmise de nouveau. Il y a quelques méthodes de retransmission de donnée dont ARQ (Automatic Repeat Request). L'insertion de mécanismes ARQ peut réduire la probabilité d'erreur à une valeur très basse, [HRA\_02] le mécanisme ARQ à faire avec une courte durée relative qui se produit sur une ou plusieurs unités de données.

Les mécanismes ARQ (demande de répétition automatique), fournissent une procédure de signalisation entre un émetteur et un récepteur. Afin de protéger le flux des données contre les perturbations; lorsqu'une erreur survient dans le bloc de données, et qu'elle est détectée par le circuit récepteur, il est demandé à l'émetteur de retransmettre le bloc de données.

ARQ est souvent utilisé dans des systèmes de communication d'ordinateur, car c'est relativement pas cher à implémenter, et souvent le canal y est full- duplex, de sorte à recevoir et transmettre une reconnaissance positive ou négative de données.

La procédure de signalisation ARQ se fait dans les étapes suivantes [HRA\_02]:

- Si une unité de donnée est reçue sans erreurs, le récepteur confirme par une reconnaissance positive (ACK).

- Une demande pour la retransmission de l'unité de donnée est alors faite, par le récepteur lors d'une reconnaissance négative (NAK), qui a lieu dans le cas où l'unité de donnée est perdue ou n'est pas correctement reçue.
- La correction de l'unité de donnée est reconnue selon un code, qui est rajouté à la charge utile (contenu) de l'unité de donnée.

#### III.4.7.1.a. Les Mécanismes ARQ existants:

On cite ci-dessous les trois principales variantes du mécanisme ARQ [HRA\_02]:

*Emettre et Attendre (Send-and-wait) :*

Chaque unité de donnée doit être confirmée par un ACK avant que la prochaine unité de donnée ne soit transmise.

*Rejet sélectif :*

Après avoir reçu un NAK, l'émetteur retransmet uniquement l'unité de donnée perturbée.

*Go- Back- N (Retour à N) :*

Après que le récepteur ait signalé que l'unité de donnée est perturbée, l'émetteur doit retransmettre toutes les unités de donnée qui succèdent l'unité de donnée perturbée.

Selon le mécanisme « Retour à N », [HRA\_02] l'émetteur transmet continuellement ses unités de donnée qui sont marquées par un nombre de séquence jusqu'à la réception d'un signal NAK (exp. Unité de donnée d'un nombre de séquence =4). Après ça, l'émetteur envoie de nouveau l'unité de donnée demandée n°4, et continue à transmettre les unités de donnée lui succédant (5, 6,7...). Le récepteur ignore toutes les unités de donnée ayant un nombre de séquence supérieur à celui indiqué dans le signal NAK (5,6) jusqu'à ce que l'unité de donnée (4) soit de nouveau reçue. C'est alors que le récepteur accepte toutes les unités de donnée la succédant (5,6,..). Si le récepteur envoie un (ACK), il confirme finalement à l'émetteur, la réception correcte de l'unité de donnée (exp. unité de donnée 2, *figure 10*), et des unités de donnée avec un nombre de séquence inférieur (unité de donnée 1 et 2).

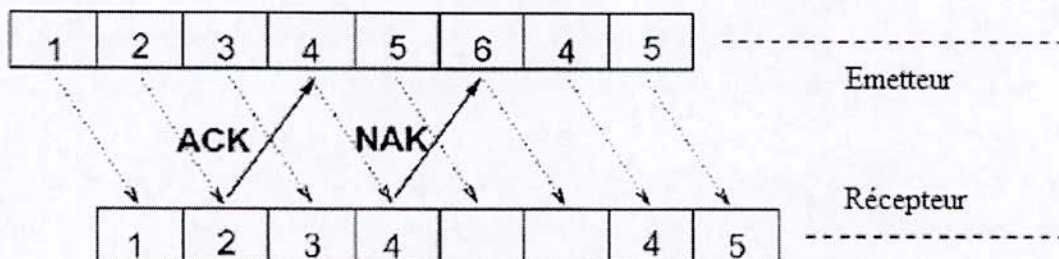


Figure.III.11. Le mécanisme Go- Back- N.

### III.4.7.1.b. Comparaison entre les mécanismes ARQ :

« Emettre et Attendre » n'est pas un mécanisme efficace, à cause des temps de transmission très longs, causés par la procédure de confirmation, qui doit être faite pour chaque unité de donnée transmise avant que la prochaine ne soit transmise. D'autre part, la procédure du « rejet sélectif », est la plus performante, car seulement les unités de donnée endommagées sont à retransmettre, ce qui améliore l'exploitation du réseau et l'arrivage des données, aussi bien qu'il réduit les retards de transmission. Cependant la réalisation d'un mécanisme ARQ « rejet sélectif », nécessite une plus grande capacité mémoire et un control de mémoire plus complexe du coté du récepteur. Le mécanisme « Go- back- N » montre de meilleures performances que le ARQ « Emettre et Quitter », mais d'autre part il se conduit plus mal que le ARQ « rejet sélectif », cependant il reste plus simple et plus économique à implémenter. Le mécanisme « Go- Back- N » paraît alors comme une solution optimale.

### III.4.7.2. FEC (Forward Error Correction):

C'est la correction d'erreur anticipée. Dans un système FEC, la donnée transmise est codée de sorte à ce que le récepteur détecte aussi bien l'erreur correctement [ZUB\_03]. Les techniques FEC sont adoptées pour la correction des erreurs dans des canaux simplex, ou le retour d'un indicateur de reconnaissance positive (ACK), et négative (NAK) n'est pas possible. la couche MAC doit inclure une fonctionnalité à communiquer avec la couche physique selon le mécanisme FEC appliqué et les formats des données.

Il est préférable d'utiliser FEC dans des systèmes avec des délais de transmission importants, car si ARQ y est utilisé le débit effectif serait faible et le transmetteur aura une longue période vide d'attente de l'indicateur ACK/NAK.

## III.5. La Sécurité :

Un problème de sécurité inhérent pèse sur les réseaux PLC Indoor (accès intérieur), est du au fait que les données informatiques ne s'arrêtent pas au niveau du compteur électrique d'une habitation, et peuvent donc circuler au delà et être captées par un voisin. En effet, le compteur établit une rupture d'impédance qui affaiblit et déforme le signal émit, mais ne le bloque pas. Donc, il n'est pas impossible de récupérer tout de même ce signal, en se branchant sur la ligne.

Pour palier à ce problème, la spécification Homeplug 1.01 utilise au niveau MAC l'algorithme de cryptage AES (Advanced Encryption Standard, avant c'était DES :Data Encryption Standard) avec une clé de 56 bits. Cette clé est partagée par l'ensemble des stations du même réseau indoor. Le mécanisme de sécurité crée un réseau logique dans lequel les stations partagent une clé de cryptage commune. Chaque trame est codée par l'algorithme DES 56bits. Ainsi en utilisant plusieurs clés différentes, on peut réaliser plusieurs réseaux logiques sécurisés par cryptage, et indépendants les uns des autres. Donc, si une station sur un

second réseau PLC indoor écoute les communications d'un autre réseau, elle ne pourra pas décrypter les données.

Les données transmises dans un réseau PLC Outdoor circulent dans tout le réseau électrique, et peuvent par conséquent être captées par n'importe qui branché sur ce réseau électrique, c'est pour cette raison là qu'un système de sécurisation des données se doit d'être efficace pour une utilisation PLC Outdoor. Comme il a déjà été mentionné, dans une modulation Spread Spectrum en affectant un code de modulation à chaque utilisateur il est possible de garder la confidentialité des données, en plus de la clés de cryptage DES.

### III.6. Le Modem PLC :

Un modem ou un onduleur, joue le rôle d'un adaptateur entre le système de traitement de données et le support de transmission. Il reçoit en entrée la suite de données binaires (en forme BDB) et fournit en sortie un signal (sinusoïdal) dont les caractéristiques sont adaptées au support de transmission. Il effectue également l'opération inverse : recevant le signal qui s'est propagé dans le support, il en extrait une suite de données binaires.

#### III.6.1. Les modems dans une installation :

Dans une installation PLC on trouve différents types de modems [KRA\_03] :

- Le modem "MASTER Outdoor", est implanté dans le local du transformateur MT/BT du quartier. Il est en charge de la gestion du réseau d'accès.
- Le modem "Outdoor Adapter" qui en tant que terminal du réseau d'accès, relie directement l'abonné sans passer par le réseau domestique.
- Le modem "Outdoor Access Point", qui fait l'interface entre le réseau d'accès et le réseau domestique.
- Le modem "Indoor Adapter" qui est un simple terminal du réseau domestique sur lequel peut être branché l'ordinateur.

D'autres composants tel que les modems "Indoor/Outdoor Repeater" et "Indoor/Outdoor Foreman" permettent d'augmenter la distance de propagation du signal ou d'éviter les interférences entre 2 systèmes PLC très proches l'un de l'autre.

Les modems PLC peuvent aussi bien recevoir les données que les envoyer. Les modems destinés au réseau d'accès sont raccordés sur les trois phases, mais l'injection ne se fait que sur 2 des 3 phases. Le choix des conducteurs d'injection est fait en vue d'obtenir la meilleure qualité du signal. Les modems destinés au réseau domestique sont raccordés entre la phase et le neutre et injectent le signal sur ces 2 conducteurs. Notons qu'un découplage à l'entrée des habitations empêche les fréquences présentes sur le réseau d'Accès de se propager sur le réseau domestique et vice et versa.

### III.6.2. Management fréquence- puissance :

Dans le but de limiter au maximum le rayonnement perturbateur du réseau, les modems régulent en permanence leur puissance de façon à injecter le minimum nécessaire à assurer la transmission. Ils choisissent en outre la/les fréquences porteuses ou se trouve le moins d'interférence sur la ligne. Cette gestion fréquence- puissance opère donc selon trois modes d'exploitation prédéfinis [KRA\_03], soit:

- La puissance des porteuses peut être fixée manuellement par un pas jusqu'au niveau maximum.
- Le niveau maximum d'injection par porteuse est limité. Il n'est autorisé que si elles ne sont pas toutes activées
- Si toutes les porteuses sont activées, seules une un nombre limité d'elles est injectée au niveau maximum, le niveau maximum des autres est alors minimisés.

Lors d'une transmission de données, le modem active tout d'abord la porteuse bénéficiant de la liaison de meilleure qualité, puis adapte la puissance. S'il voit que la capacité de transmission devient insuffisante, il augmente alors la puissance, puis le nombre de porteuses actives jusqu'à atteindre le maximum autorisé.

### III.7. Accès Intérieur & Extérieur :

Pour répondre aux différents objectifs, la technologie PLC s'est basée sur deux segments, selon la partie du réseau électrique exploitée. Relativement à l'emplacement du compteur électrique, on y distingue l'accès intérieur ou PLC Indoor, correspondant au réseau local électrique : RLE et l'accès extérieur ou PLC Outdoor, correspondant à la boucle locale électrique : BLE.

#### III.7.1. Les PLC en INDOOR :

Pour les courants porteurs en ligne, un réseau **Indoor** fait allusion à un réseau local, par exemple à l'intérieur d'une habitation, d'un hôpital, plus généralement, il regroupe l'ensemble du matériel situé en aval du compteur électrique. On parle fréquemment de LAN indoor pour un réseau PLC. Un réseau PLC Indoor utilise comme infrastructure d'installation le Réseau local Electrique : RLE, qui n'est autre que les lignes basses tensions domestiques, qui permettent de relier toutes les prises de courant d'un local. Il peut alors servir de passerelle vis-à-vis d'un réseau local filaire classique pour desservir les étages d'un bâtiment ou relier deux sites co-localisés, ou encore, permettre le partage d'un accès Internet à l'intérieur d'un site.

Il existe plusieurs techniques pour la mise en place des réseaux locaux, chacune d'elles étant basée sur une infrastructure différente en terme de média physique :

- Exploitation de modems qui utilisent le réseau téléphonique comme canal de communication.

- Les réseaux câblés (fibre optique, câble coaxial, paire torsadée) ; ils nécessitent la mise en place de câbles de communication pour relier les noeuds du réseau.
- Les réseaux sans fils plus connus sous la Wi-fi dans lesquels, la communication est assurée par les ondes radio.
- Les PLC dont le support de communication, est le réseau électrique existant.

### III.7.2. Les PLC En Outdoor :

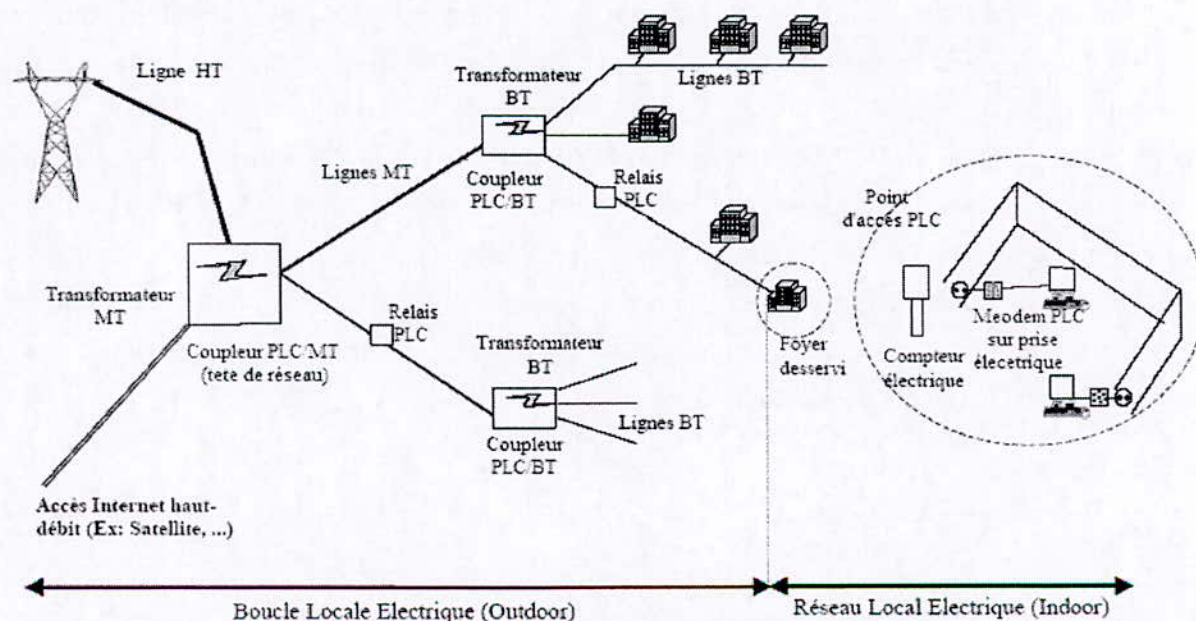
#### III.7.2.1. Définition :

Les réseaux PLC **Outdoor** constituent la logique dite « *Accès au dernier kilomètre* » pour une desserte Internet à Haut Débit d'une zone résidentielle ou industrielle, par exemple à partir du transformateur général d'un quartier jusqu'au compteur électrique du domicile, tous les abonnés de ce même transformateur électrique partagent alors l'accès Internet offert.

Donc un réseau Outdoor utilise comme infrastructure d'installation les lignes moyennes et basses tensions, qui forment une boucle locale électrique BLE (ou bien dernier kilomètre : last mile). Cette boucle relie les différentes habitations ou lieux où l'on prévoit de mettre en place une solution PLC.

Il s'agit donc ici d'un couplage à réaliser au niveau du transformateur MT/BT (resp. HT/MT) : couplage accès Internet Haut Débit (fibre optique, réception satellite ou ligne spécialisée) avec le réseau de distribution BT (resp. MT).

Ainsi toute la zone desservie par le transformateur (habitations ou entreprises) peut bénéficier de cet accès distribué via le réseau électrique ; ce système est aussi appelé système by-pass. On peut voir sur la *figure III.12* que le couplage est réalisé au niveau des transformateurs :



**Figure.III.12.** Différents niveaux de couplage.

### III.7.2.2. Adaptation des PLC au réseau électrique :

L'adaptation de la PLC sur les différentes lignes du réseau électrique est la suivante :

#### *Lignes Haute Tension + de 60 kV (60kV -120kV -220kV -400kV):*

Elles sont inadaptée au Haut Débit, mais l'on utilise tout de même pour les PLC bas débit, à basse fréquence (les environs de 155 kbit/s pour 148.5 kHz). Ils servent exclusivement aux compagnies d'électricité tel que EDF en France pour contrôler leurs équipements.

#### *Lignes Moyenne tension 10 kV – 60 kV (Outdoor) :*

C'est un réseau de collecte possible qui est utilisé dans la bande fréquentielle [1MHz,30MHz]. Cette partie souffre moins des perturbations et de densité de branchement, donc moins de réflexion. La distance moyenne entre les transformateurs HT/MT et MT/BT est d'environ 5 et 10 Kms, et entre deux transformateurs MT/BT elle est de 700m. Des répéteurs sont alors nécessaires, pour la régénération des signaux.

#### *Basse tension 220 V-1000V (Outdoor) :*

La distance moyenne entre le transformateur Basse Tension et le compteur du domicile est d'environ 200 m en ville, et peut être au maximum de 800 m en campagne, dans ce dernier cas des répéteurs sont nécessaires. Le débit est de 25 Mb/s en moyenne partagé entre une grappe de 100 à 200 foyers environ en ville. Cette partie est utilisée dans la bande fréquentielle [1MHz, 30MHz]

### III.8. Conclusion :

On a vu dans ce chapitre que le principe de la technologie PLC consiste en un couplage des signaux HF avec la tension du secteur. L'architecture d'un réseau PLC se spécifie dans les deux premières couches du système OSI par des techniques de modulation avancées au niveau de la couche physique: l'OFDM qui est multi porteuses et SS à étalement de spectre, et par l'utilisation des protocoles de l'organisation d'accès : TDMA, CSMA/CA, Polling et Token Ring, ainsi que quelques méthodes de correction d'erreur : ARQ et FEC, au niveau de la couche MAC. On a vu aussi qu'il existe deux segments des réseaux PLC Indoor et Outdoor, le premier répondant à une utilisation dans le réseau local électrique, et le deuxième à une utilisation dans la boucle locale électrique.

# *Chapitre VI*

---

## *Installation d'un réseau PLC de ville*



## IV.1. Introduction :

L'objectif de ce chapitre est de proposer une installation d'un réseau de communication de ville (MAN), établi sur le réseau Sonelgaz MT de Bouzaréah. Lors de la conception de ce réseau on devra prendre en considération les phénomènes présentés dans le *chapitre II*, qui sont omniprésents dans le réseau électrique en HF, et qui contraignent l'établissement d'une transmission de données à travers un tel support. Pour ce faire on a scindé ce chapitre en quatre parties.

Premièrement on a étudié le comportement d'une ligne électrique MT en HF, qui sera représentée par un modèle à paramètres distribués, duquel on simulera les paramètres secondaires de la ligne ainsi que l'effet des atténuations sur les signaux transmis.

La deuxième partie est consacrée à la modélisation d'une transmission HF sur une liaison de communication comportant une seule dérivation, en faisant intervenir les résultats de la première partie de ce chapitre, ceci dans le but d'étudier le phénomène multi trajet qui intervient dans la propagation des signaux électriques HF.

Dans la troisième partie du chapitre, on propose une installation sur le site choisi, qui fait appel à la modélisation des canaux de transmission des différentes stations, en faisant l'extension du modèle multi trajet étudié dans la deuxième partie de ce chapitre, à un réseau complexe comportant plusieurs branches et nœuds. Les résultats obtenus par cette modélisation nous permettront de proposer des solutions techniques dans l'installation, pour minimiser les effets d'atténuation et de la propagation multi trajet.

Dans la quatrième partie de ce chapitre on propose un aspect logiciel de l'installation qui comporte un protocole de la couche MAC basé sur un système OFDM présenté dans le *chapitre III*. L'organisation de la couche MAC a comme base de données les canaux OFDM.

## IV.2. étude des câbles MT en communication:

Avant d'entamer notre étude sur un réseau PLC en moyenne tension, il faut étudier la structure et le comportement en HF des câbles MT.

### IV.2.1. Description des câbles MT :

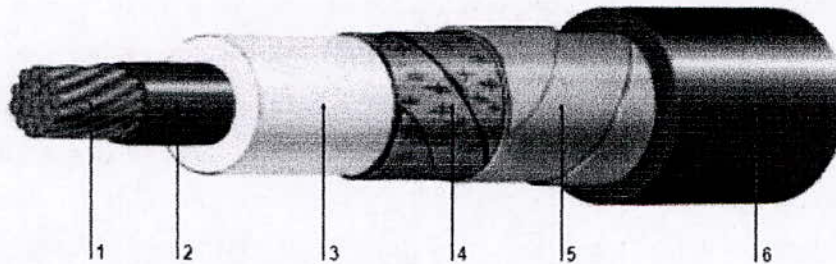
Le câble utilisé pour cette étude est standard [ABB\_05], c'est ce qui est utilisé fréquemment dans les câblages des réseaux moyenne tension sous terrains. Il faut noter que contrairement à un réseau PLC installé sur un réseau MT aérien, celui installé sur un réseau sous terrain le pouvoir de rayonnement est quasiment nul. Point de vue structure on distingue deux types de câbles MT : unipolaire et tripolaire.

#### IV.2.1.1. Câble MT unipolaire :

Un câble MT unipolaire transporte une seule phase, donc pour transporter les trois phases, on utilise trois câbles unipolaires, qui sont séparés par une distance de 1m entre eux. On peut assimiler un câble MT unipolaire à un câble coaxial composé de trois types de matériaux enveloppés à l'intérieur d'un isolant, comme le montre la *figure IV.1*.

Au niveau du câble on distingue les différentes parties numérotées sur la *figure IV.1* :

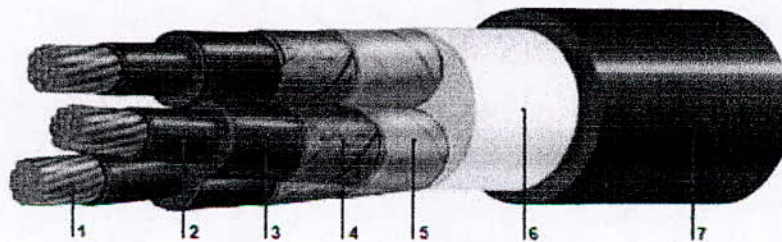
1. L'âme conductrice, qui est un alliage de Cuivre et d'Aluminium. Environ 77% de l'alliage est du cuivre.
2. Semi-conducteur : qui est un mélange extrudé, ou ruban disposé en hélice.
3. Enveloppe isolante : qui peut être du polychlorure de vinyle (PVC) ou du polyéthylène réticulé (PR).
4. Semi-conducteur ruban disposé en hélice ou mélange extrudé.
5. Ecran ruban en cuivre nu disposé en hélice.
6. Une gaine de protection en polychlorure de vinyle (PVC) est disposée sur le conducteur ainsi constitué.



**Figure .IV.1.** Découpe sur un câble MT unipolaire [ABB\_05].

#### IV.2.1.2. Câble MT tripolaire :

Un câble tripolaire est multiconducteur, c'est-à-dire qu'il est composé de trois conducteurs chacun transportant une phase. On peut assimiler ce type de câble à un ensemble de trois câbles MT unipolaires disposés à l'intérieur d'une gaine de protection commune, et chacun a son propre écran.



**Figure .IV.2.** Découpe sur un câble MT tripolaire [ABB\_05].

Les éléments numérotés de 1 jusqu'à 5 sont les mêmes que ceux du câble unipolaire (voir *figure IV.1.*) Sur les conducteurs câblés entre eux, autour d'un bourrage central en matière hydrofuge (voir *figure IV.2.*), sont disposés :

6. Un bourrage qui peut être soit une gaine en matière plastique ou élastique, d'épaisseur pratiquement nulle, soit un ruban hydrofuge disposé sur l'assemblage avec interposition de joncs plastiques ou élastiques
7. Une gaine de protection en polychlorure de vinyle (PVC).

#### IV.2.2. Comportement des lignes MT en HF:

Selon la théorie électromagnétique, pour réaliser une transmission point à point de l'énergie et de l'information, la source d'énergie doit être orientée. Lorsque les lignes électriques sont utilisées pour transmettre les signaux de commande ou de n'importe quelle information en hautes fréquences, elles sont vues comme [HIL\_56] des lignes guidant à travers elles les ondes électromagnétiques transversales (TEM).

##### IV.2.2.1. Modélisation :

Pour la modélisation, on approxime un câble MT tripolaire à trois câbles MT unipolaires indépendants, cette supposition est assurée par le fait que l'écran en cuivre de chaque phase soit suffisant pour empêcher les interférences entre les signaux transmis sur chaque phase.

Selon [HIL\_56] la propagation d'un signal transmis sur les lignes électriques est décrite par un système à paramètres répartis. Si on opère en mode commun (resp. différentiel) ce qui correspond à une injection entre la phase et la terre (resp. entre deux phases), alors cette paire de conducteur d'énergie est vue comme un système à paramètres répartis, où la tension et le courant peuvent varier en amplitude et en phase en fonction de sa longueur, donc le système peut être décrit par des paramètres de circuit qui sont distribués par sa longueur.

Dans les *figures IV.3*, les quantités  $v(z,t)$  et  $v(z+\Delta z,t)$  (resp.  $i(z,t)$  et  $i(z+\Delta z,t)$ ) déterminent les tensions instantanées (resp. les courants instantanées) dans les emplacements  $z$  et  $z+\Delta z$  respectivement.  $R$  détermine la résistance par unité de longueur pour les deux conducteurs ( $\Omega/m$ );  $L$  détermine l'inductance par unité de longueur pour les deux conducteurs ( $H/m$ ),  $G$  est l'admittance par unité de longueur ( $S/m$ ), elle intervient dans les pertes due à l'isolant,  $C$  est la capacité générée par les deux conducteurs par unité de longueur ( $F/m$ ) et elle intervient dans les pertes diélectriques.  $G+j\omega C$  : représente l'admittance diélectrique générée par les deux conducteurs en tenant compte des pertes diélectriques et de l'isolant. On notera  $\omega$  la pulsation du signal.

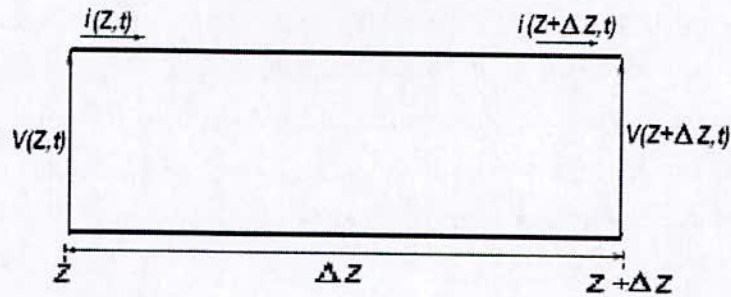


Figure .IV.3a. Définition de la tension et du courant d'une ligne de transmission.

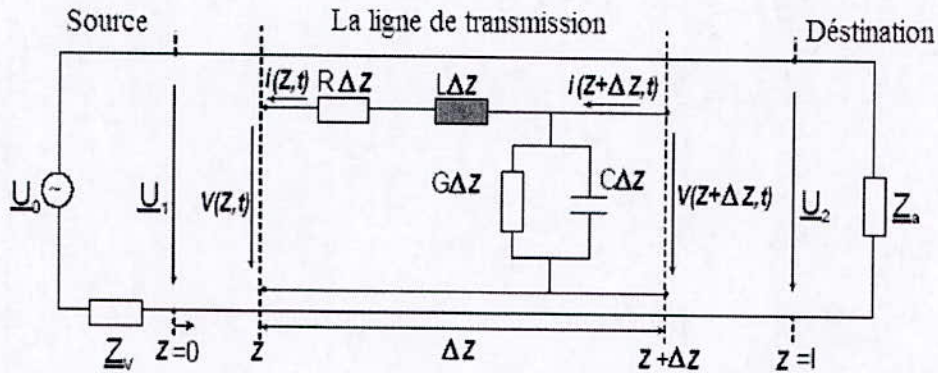


Figure .IV.3b. Le circuit équivalent à la ligne de transmission.

En appliquant les lois de Kirchhoff, on obtient les équations suivantes:

$$v(z,t) - R\Delta z i(z,t) - L\Delta z \frac{\partial i(z,t)}{\partial t} - v(z + \Delta z,t) = 0 \tag{IV.1}$$

$$i(z,t) - G\Delta z v(z + \Delta z,t) - C\Delta z \frac{\partial v(z + \Delta z,t)}{\partial t} - i(z + \Delta z,t) = 0$$

Soit  $Re$  la partie réelle. On peut exprimer  $i$  et  $v$  comme suit :

$$v(z,t) = Re[V(z)e^{j\omega t}] \tag{IV.2}$$

$$i(z,t) = Re[I(z)e^{j\omega t}]$$

Quand  $\Delta z \rightarrow 0$ , les équations harmoniques peuvent être tirées des équations (IV.1) par :

$$\begin{aligned} -\frac{dV(z)}{dz} &= (R + j\omega L)I(z) \\ -\frac{dI(z)}{dz} &= (G + j\omega C)V(z) \end{aligned} \tag{IV.3}$$

En combinant les deux équations (IV.3) on obtient :

$$\begin{aligned} \frac{d^2V(z)}{dz^2} &= \gamma^2 V(z) \\ \frac{d^2I(z)}{dz^2} &= \gamma^2 I(z) \end{aligned} \tag{IV.4}$$

$$\text{avec } \gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$$

Le paramètre  $\gamma$  représente la constante de propagation, sa partie réelle  $\alpha$  désigne la constante d'atténuation (en dB/m) et sa partie imaginaire  $\beta$  désigne la constante de phase (en rad/m). On exprime le durée de propagation sur la distance d'un mètre par le groupe retard  $\tau$  donné par la relation :  $\tau = d\beta/d\omega$  (s), ( tel que  $d$  exprime l'opérateur de la dérivée).

La résolution des équations différentielles (IV.4), exprime  $V(z)$  et  $I(z)$  sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} V(z) &= V^+(z) + V^-(z) = V_0^+ e^{-\gamma z} + V_0^- e^{\gamma z} \\ I(z) &= I^+(z) + I^-(z) = I_0^+ e^{-\gamma z} + I_0^- e^{\gamma z} \end{aligned} \quad (IV.5)$$

Avec les indicateurs + et - désignant les ondes se propageant dans les directions  $+z$  et  $-z$  respectivement.

Les amplitudes des ondes ( $V_0^+, I_0^+$ ) et ( $V_0^-, I_0^-$ ) sont reliées par la relation :

$$\frac{V_0^+}{I_0^+} = -\frac{V_0^-}{I_0^-} = \frac{R + j\omega L}{\gamma} \quad (IV.6)$$

Pour une ligne semi - infinie la propagation se fait dans un seul sens, le terme  $e^{\gamma z}$  disparaît alors.

Donc le rapport de tension sur courant à  $z$  quelconque pour une ligne semi infinie est donné par:

$$\frac{V(z)}{I(z)} = \frac{V^+(z)}{I^+(z)} = \frac{V_0^+}{I_0^+} \quad (IV.7)$$

Ce rapport est indépendant de  $z$ , il représente l'impédance caractéristique  $Z_0$  de la ligne qui est tirée de l'équation (IV.6) par l'expression :

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (IV.8)$$

On déduit à partir de l'équation (IV.5) que la fonction de transfert d'une ligne de transmission semi infinie, sans dérivation ni nœuds est donnée par le rapport :

$$\frac{V(z)}{V_0^+} = \frac{I(z)}{I_0^+} = e^{-\gamma z} \quad (IV.9)$$

A noter que la constante de propagation  $\gamma$  et l'impédance caractéristique  $Z_0$  sont des propriétés caractéristiques de la ligne de transmission qu'elle soit finie ou pas, et qu'ils déterminent le comportement de l'onde au long de la ligne, ce sont les paramètres secondaires. Ces paramètres dépendent des paramètres primaires  $R$ ,  $L$ ,  $G$  et  $C$  ainsi que de  $\omega$  mais pas de la longueur, donc la FT dépend des pertes dues aux conducteurs et aux diélectriques.

Pour une transmission en mode commun (l'injection du signal entre une phase et la terre), à travers un câble dont la section est schématisée sur la figure IV.4, les paramètres secondaires sont donnés selon [HIL\_56] par la partie qui suit :

La résistance linéique  $R$  dans un conducteur, qui a une surface de section transversale uniforme  $A$ , est donné par la relation :  $R = \frac{\rho}{A}$  Tel que  $A = \pi a^2$

Cependant pour n'importe quel changement rapide de courant, la résistance effective du conducteur est augmentée par l'effet de peau. La résistance réelle ou « ohmique » précédemment définie, d'un conducteur, est par définition applicable lorsque le courant est uniformément distribué sur la section transversale du conducteur, ceci a lieu si la densité du courant est partout la même. Pour un courant alternatif, ce n'est pas le cas, en effet il y a plus de densité de courant à proximité de la surface extérieure du conducteur, ce phénomène est appelé : effet de peau, qui est si extrême en très haute fréquence que la majorité du courant circule sur une mince couche de la surface du conducteur. Pour la transmission des signaux en HF à travers un câble électrique, il est donc nécessaire de prendre en considération l'effet de peau, qui intervient selon l'équation (IV.4) à travers la résistance  $R$  sur la constante de propagation  $\gamma$  et donc sur l'atténuation affectée au signal transmis.

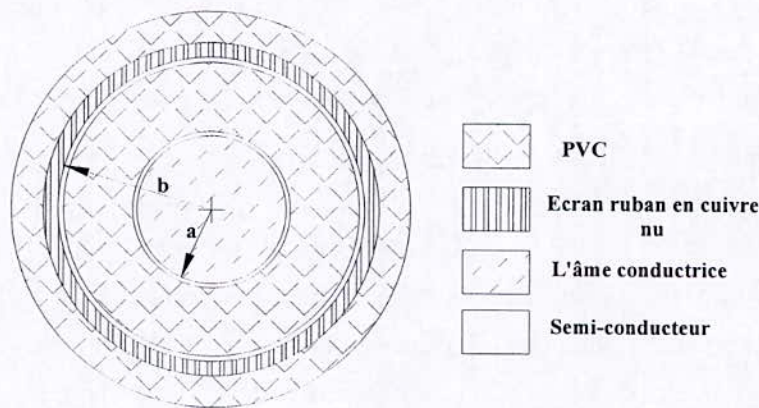


Figure IV.4. Section sur un câble MT.

L'effet de peau est exprimé par une distance  $\delta$  tel que :  $\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}}$  (m)

Ainsi la résistance effective est obtenue par la relation :  $R = \frac{\rho / A}{2 \frac{\delta}{a} - \left(\frac{\delta}{a}\right)^2}$  ( $\Omega / m$ )

Le reste des paramètres primaires est donné par les relations suivantes :

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) + \frac{\mu}{8\pi} \quad (H / m)$$

$$C = \frac{\pi \epsilon}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (F / m) \quad (IV.10)$$

$$G = 2\pi f C \tan(\delta) \quad (S / m)$$

Tel que :

$a$  : le rayon de l'âme conductrice en (m).

$b$  : la distance entre le centre de l'âme conductrice et l'écran en (m).

$f$  : La fréquence d'onde en (Hz).

$\mu$  : la perméabilité magnétique du matériel conducteur exprimée en ( $m.kg^{-2}.C$ ).

$\varepsilon$  : la permittivité absolue du matériel isolant entre l'âme et l'écran exprimée en ( $m^{-3}kg^{-1}s^2C^2$ ).

$\rho$  : la résistivité du conducteur en ( $\Omega m$ ).

#### IV.2.2.2. Simulation d'une transmission à travers un câble MT :

Dans le cas où l'âme conductrice est en cuivre donc de perméabilité magnétique relative  $\mu_r \cong 1 m.kg^{-2}.C$ , et où l'isolant est en PVC de permittivité relative  $\varepsilon_r = 3.3$ , et sachant que la perméabilité magnétique du vide est de  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} m.kg^{-2}.C$ , et que sa permittivité est de  $\varepsilon_0 = 1/(36\pi) \times 10^{-9} m^{-3}kg^{-1}s^2C^2$ . On a alors les constantes suivantes :  $\mu = \mu_r \mu_0$ , donc  $\mu = 4\pi \times 10^{-7} m.kg^{-2}.C$ . Et  $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$   $\varepsilon = 2.919 \times 10^{-7} m^{-3}kg^{-1}s^2C^2$ . Et  $\rho = 1.7241 \times 10^{-8} (\Omega m)$ .

On trouve dans le réseau étudié des câbles de section  $180 mm^2$  et ceux de section  $120 mm^2$ . Pour les câbles de section  $A = 180 mm^2$ , [ABB\_05] le rayon du conducteur est de  $a = 7.6 mm$  et la distance  $b = 22.5 mm$ . Pour une section  $A = 120 mm^2$ ,  $a = 6.2 mm$  et  $b = 18.5 mm$ .

Ainsi on aura identifié toutes les constantes intervenant dans les paramètres primaires de la ligne de transmission  $R$ ,  $L$ ,  $C$  et  $G$ . Une fois ces derniers identifiés il sera possible d'identifier les paramètres secondaires qui sont représentés par  $\gamma$  et  $Z_0$  ainsi que  $\alpha$  et  $\beta$ .

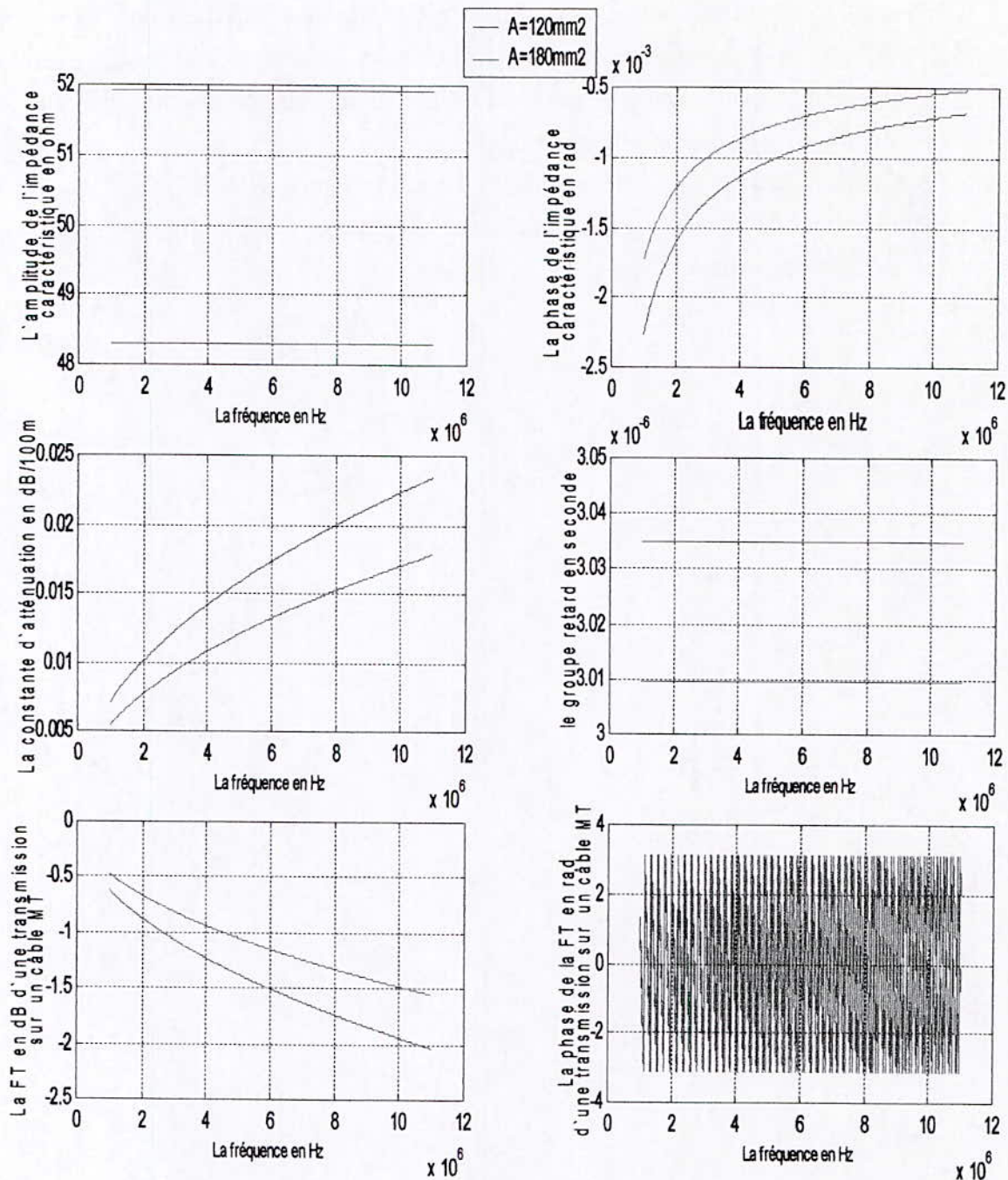
La simulation des constantes d'atténuation, de phase et de retard en fonction de la fréquence, ainsi que celle de la fonction de transfert et de la l'impédance caractéristique d'une ligne de transmission, faite pour les deux sections de  $180 mm^2$  et  $120 mm^2$  sont représentées sur les figures IV.5, à partir desquelles on constate :

- Que l'amplitude de l'impédance caractéristique d'un câble MT est constante en haute fréquence et qu'elle varie d'une section à l'autre, elle vaut  $48.3\Omega$  pour une section de  $120 mm^2$  et  $51.8\Omega$  pour une section de  $180 mm^2$ .
- Que la phase de l'impédance caractéristique est environ nulle en haute fréquence, pour les deux sections considérées. On conclut que l'impédance caractéristique d'un câble MT est presque constante dans les hautes fréquences.
- Dans la plage de fréquence considérée, la constante d'atténuation  $\alpha$  varie de façon proportionnelle en fonction de la fréquence, ce qui montre que l'atténuation est d'autant plus importante en augmentant la fréquence de transmission, et elle est meilleure pour un câble de section plus importante.
- Dans les fréquences considérées, le groupe retard  $\tau$  exprimant le temps mis par un signal pour une propagation sur une distance d'un mètre, est de l'ordre de  $3\mu s$ . La différence dans le groupe retard, entre les deux câbles de sections différentes est négligeable, elle est de l'ordre de  $34 ns$ . Le signal se propage un peu plus rapidement

sur le câble de section plus importante, en effet le groupe retard est de  $3.035\mu s$  pour  $A=120mm^2$ , et de  $3.01\mu s$  pour  $A=180mm^2$ . On peut conclure que le groupe retard est inversement proportionnel à la section du câble, et donc un meilleur groupe retard est obtenu pour une plus grande section.

- La fonction de transfert du canal de transmission pour un câble MT, a une forme exponentielle décroissante en fonction de la fréquence, et elle est meilleure pour une section plus importante.





**Figure .IV.5.** Caractéristiques d'une ligne MT en HF.

### IV.3. étude d'un réseau PLC à une seule branche:

Comme il a déjà été vu dans le 2<sup>ème</sup> chapitre, on dénombre 3 types d'atténuation qui interviennent lors de la transmission d'une onde qui se propage dans la direction directe de la transmission. Le premier type est l'atténuation due à la ligne qui est provoquée par les pertes dues aux conducteurs et les diélectriques (atténuation de la puissance du signal), et les effets de rayonnements ; cette atténuation est toujours présente et dépend de la longueur du trajet et

de la fréquence de l'onde. Le deuxième type d'atténuation est provoqué par les réflexions au niveau des points de discontinuité de l'impédance dans le canal. L'onde réfléchie au niveau des points de discontinuité amoindrit l'onde originale et la déforme, ce type de distorsion est destructif. Le dernier type d'atténuation est causé par les ondes retardées qui se superposent avec le signal d'origine.

Les réflexions dues aux discontinuités de l'impédance et des dérivations de branches dans le canal PLC génèrent des échos du signal transmis. Donc, le canal du réseau peut être vu comme un environnement multi trajet, c'est à dire que chaque signal transmis alimente le récepteur non seulement en passant par le trajet direct le reliant à l'émetteur, mais aussi par des portions atténuées et retardées passant par des trajets plus longs, et le tout sera présent dans le récepteur, ceci a mené à développer un modèle écho [ZIM\_98] pour représenter les caractéristiques physiques du réseau.

La figure IV.6 illustre le modèle écho à  $N$  trajets, qui montre que le signal à la réception est la superposition de plusieurs signaux qui sont les versions retardées et pondérées par leurs trajets de passage, du signal transmis, on déduit que la réponse impulsionnelle du canal ainsi décrit est donnée par la relation :

$$h(t) = \sum_{i=1}^N g_i \delta(t - \tau_i) \quad (IV.11)$$

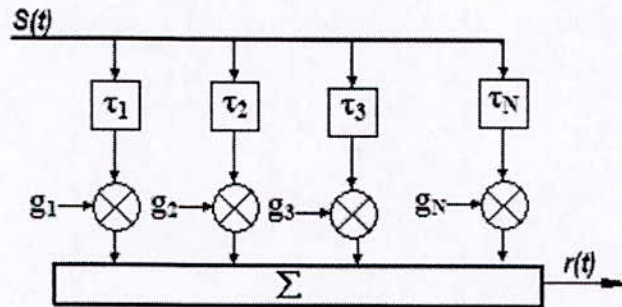


Figure IV.6. Structure basique d'un modèle écho.

En appliquant la transformée de Laplace à l'équation (IV.12) on obtient la fonction de transfert suivante :

$$H(s) = \sum_{i=1}^N g_i e^{-\tau_i s} \quad (IV.12)$$

Avec  $g_i$  : le facteur d'atténuation complexe pour le trajet  $i$ , écrit sous la forme:

$$g_i = |g_i| e^{j\phi_i} \quad (IV.13)$$

On étudie un canal de transmission à une seule branche schématisé sur la figure IV.7, tel qu'on effectue la transmission du point terminal : 1 vers le point terminal : 3.

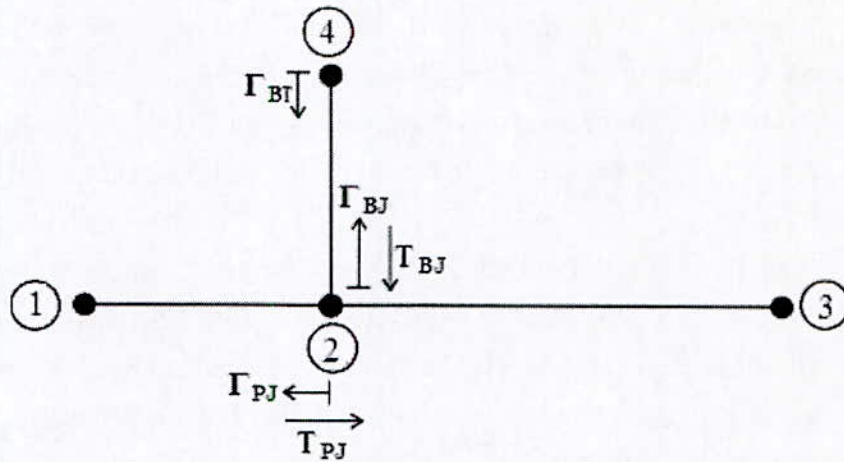


Figure .IV.7. Propagation multi trajets avec une seule branche.

Ce réseau est défini pour les terminaux 1, 3, 4 et la jonction de dérivation 2, par les segments de longueurs  $l_{12}$ ,  $l_{23}$ ,  $l_{24}$  et leurs impédances caractéristiques respectives :  $Z_{12}$ ,  $Z_{23}$  et  $Z_{24}$ . On considère que le segment (2,4) est un câble de dérivation, et les segments (1,2) et (2,4) sont des câbles de distribution. Soit  $\Gamma_{BT}$  le coefficient de réflexion du point terminale 4 de la branche,  $\Gamma_{PJ}$  et  $\Gamma_{BJ}$  (resp.  $T_{PJ}$  et  $T_{BJ}$ ) les coefficients de réflexion (resp. de transmission) respectivement dans les câbles de distribution et de dérivation.

Soit  $Z_4$  l'impédance de charge dans le terminal 4. Les coefficients de transmission et de réflexion peuvent être obtenus par les équations (IV.14) suivantes [ZIM\_98]:

$$\begin{aligned} \Gamma_{BT} &= \frac{Z_4 - Z_{24}}{Z_4 + Z_{24}} \\ \Gamma_{PJ} &= \frac{Z_{23} // Z_{24} - Z_{12}}{Z_{23} // Z_{24} + Z_{12}} \\ \Gamma_{BJ} &= \frac{Z_{12} // Z_{23} - Z_{24}}{Z_{12} // Z_{23} + Z_{24}} \\ T_{BJ}^2 + \Gamma_{BJ}^2 &= 1 \\ T_{BJ}^2 + \Gamma_{PJ}^2 + T_{BJ}^2 &= 1 \end{aligned} \tag{IV.14}$$

Ainsi les trajets parcourus par le signal lors de sa propagation ainsi que leurs pondérations en fonction des facteurs de réflexion et de transmission, sont résumés dans le tableau (IV.1) [ZIM\_98].

| Le N° du trajet | Le trajet du signal | Le facteur d'atténuation                | La longueur du trajet   |
|-----------------|---------------------|---|-------------------------|
| 1               | 1→2→3               | $T_{PJ}$                                | $L_{12}+l_{23}$         |
| 2               | 1→2→4→2→3           | $T_{PJ} \cdot \Gamma_{BT} \cdot T_{BJ}$ | $L_{12}+2l_{24}+l_{23}$ |
| ⋮               | ⋮                   | ⋮                                       | ⋮                       |

|       |   |   |                                  |
|-------|---|---|----------------------------------|
| ..... | .....   | .....   | .....                            |
| N     | $1 \rightarrow 2 \rightarrow (4 \rightarrow 2)^{N-1} \rightarrow 3$ | $T_{PJ} \cdot \Gamma_{BT} \cdot (\Gamma_{BT} \cdot \Gamma_{BJ})^{N-2} \cdot T_{BJ}$ | $L_{12} + 2(N-1)L_{24} + l_{23}$ |

**Tableau IV.1.** Calcul des facteurs d'atténuation et longueurs des trajets.

Dans le cas où le câble de distribution c'est-à-dire le tronçon reliant les deux terminaux (1) et (3) de longueur  $l_{13}$ , est uniforme d'impédance caractéristique  $Z_{c1}$  on a alors  $Z_{12} = l_{23} = Z_{c1}$ , et le câble de dérivation d'impédance  $Z_{24} = Z_{c2}$ , et soit le rapport  $\rho_{zc} = Z_{c2}/Z_{c1}$ . De plus, en considérant que l'extrémité (4) ait une impédance  $Z_4$  négligeable devant l'impédance du câble on a alors les résultats suivants :

$$\begin{aligned}
 \Gamma_{BT} &= -1 \\
 \Gamma_{PJ} &= \frac{-1}{1 + 2\rho_{zc}} \\
 \Gamma_{BJ} &= \frac{1 - 2\rho_{zc}}{1 + 2\rho_{zc}} \\
 T_{BJ} &= \frac{2\sqrt{\rho_{zc}}}{2\rho_{zc} + 1} \\
 T_{PJ} &= \frac{2\rho_{zc}}{2\rho_{zc} + 1}
 \end{aligned} \tag{IV.15}$$

Soit la vitesse de phase  $v_p = \beta/\omega$ . On a alors le retard  $\tau_i$  qui représente la durée que met le signal pour parcourir un trajet de longueur  $d_i$  :

$$\tau_i = \frac{d_i}{v_p} \tag{IV.16}$$

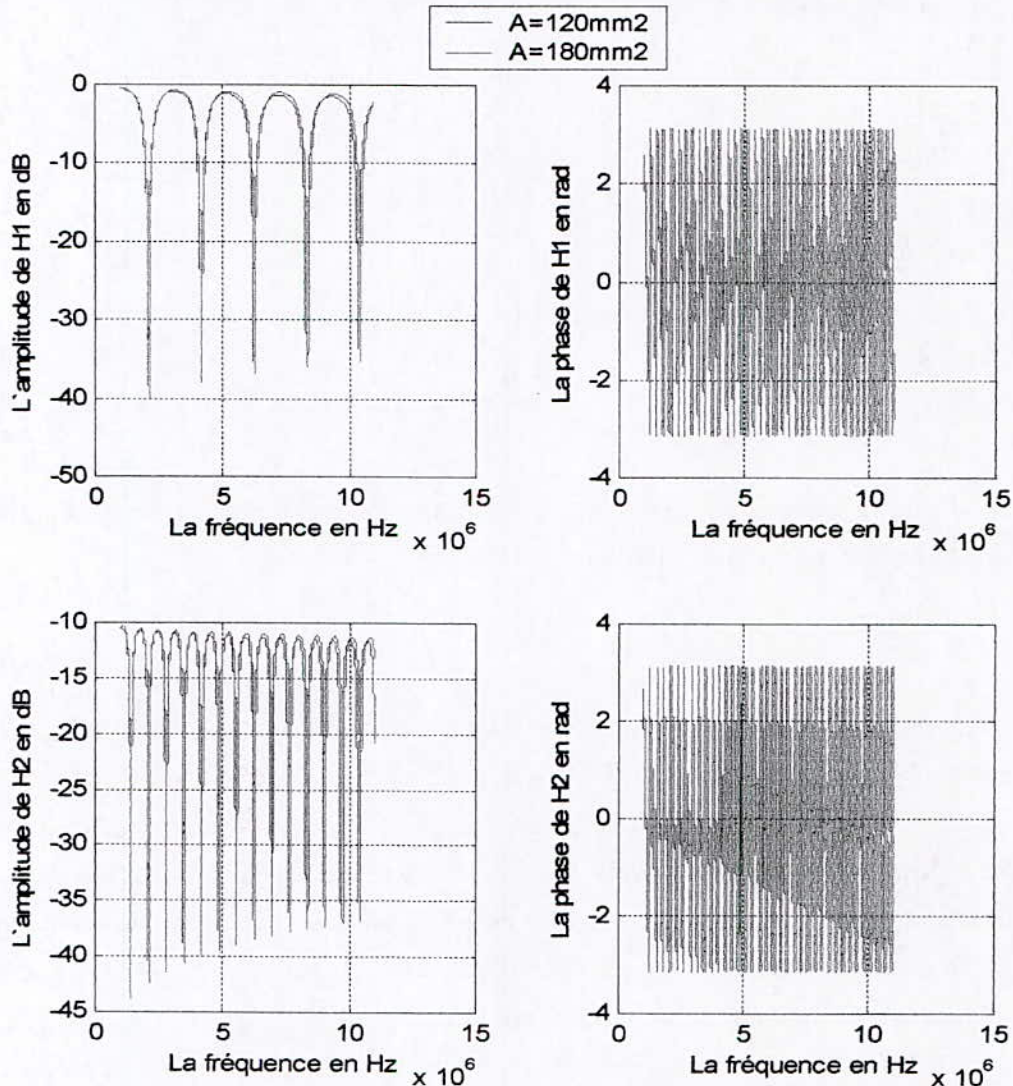
Ainsi on aura définie tous les paramètres intervenant dans la réponse fréquentielle d'un canal multi trajets définie par l'équation IV.12. En supposant que le câble de la dérivation soit de même nature que celui de la distribution, et en tenant compte des résultats obtenues précédemment pour des câbles de sections  $A=120\text{mm}^2$  et  $A=180\text{mm}^2$ , en faisant la simulation de la fonction de transfert de la transmission du point (1) au point (3), comme schématisé sur la figure IV.7, pour un réseau défini par les longueurs des tronçons  $l_{12}=400\text{m}$ ,  $l_{23}=50\text{m}$ ,  $l_{24}=350\text{m}$ , on obtient la fonction de transfert  $H1(f)$  simulée sur la figure IV.8, et pour un autre réseau défini par les mêmes longueurs des tronçons de distribution que le réseau précédent, et une longueur de la branche de dérivation  $l_{23}=150\text{m}$ , et de fonction de transfert  $H2(f)$ , simulé sur la figure IV.8.

On constate à partir des simulations obtenues dans la figure IV.8 :

- On remarque aussi qu'en augmentant la longueur des dérivation le nombre d'encoches augmente, c'est-à-dire que le phénomène de distorsion s'est amplifié. En effet  $H2(f)$  est moins stable que  $H1(f)$ , ceci provoque le rétrécissement de la

plage de fréquence entre chaque deux encoches, ce qui signifie que la bande passante diminue en augmentant la longueur de la dérivation.

- La présence de la dérivation génère des distorsions dans la réponse fréquentielle du canal. Et que la FT est presque la même pour les deux sections des câbles utilisés.
- Le phénomène d'atténuation est plus important en  $H2(f)$  car les longueurs des trajets sont plus grandes, pour les mêmes pondérations que ceux de  $H1(f)$ . Donc la présence d'une dérivation est plus néfaste si sa longueur est plus importante.



**Figure IV.8.** Les FT des canaux de transmission  $H1(f)$  &  $H2(f)$ .

#### IV.4. étude d'un réseau PLC MT de ville :

##### IV.4.1. Description du site de l'installation:

Le réseau faisant l'objet d'étude de la faisabilité de l'installation d'un réseau de communication, est le réseau électrique MT sous terrain de Bouzaréah. Le choix de cette commune revient au fait qu'un réseau PLC Outdoor basse tension a déjà été installé, il est utilisé pour faire la collecte à distance de la consommation électrique du quartier qui est relié au poste transformateur n°381, dans lequel sont collectées les informations de la consommation électrique des habitants.

Le but principal de cette étude est d'étendre cette application (la télé relève : AMR automatic meter reading, cependant on peut implémenter Internet ou PSTN par la même technique d'installation) à toute la commune, qui est reliée et interconnectée totalement par le réseau MT sous terrain, ce dernier est schématisé sur les figures IV.9a et IV.9b. Sur ce schéma on voit que la topologie du réseau est arborescente, donc on y trouve plusieurs nœuds ou chacun dérive sur plusieurs branches, et que les sections des câbles varient d'un tronçon à l'autre, ainsi que leurs longueurs. Chaque tronçon est défini par les deux postes transformateurs le délimitant et par sa longueur. Et chaque poste transformateur est défini par son numéro de poste.

Pour simplifier l'étude, on subdivise le réseau en neuf principaux segments chacun étant délimité par deux postes transformateurs, dont l'un d'eux constitue un nœud dans le réseau. Sur figures IV.9a et IV.9b, on schématise les nœuds par les symboles BS1, BS2, BS3 et BS. Le poste nœud BS se spécifie par le fait qu'il soit relié à tous les autres nœuds directement par des segments définis du réseau, sans passer par des nœuds intermédiaires. Le tableau IV.2 illustre notre organisation du réseau, tel que  $L_i$  est le pas élémentaire des longueurs, il est utilisé pour ramener les longueurs des tronçons à une même référence dans le segment auquel ils appartiennent, ce pas sera utilisé dans l'algorithme de modélisation dans la section IV.4.2.3a).

| Segment      | 1   | 2    | 3   | 4   | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |
|--------------|-----|------|-----|-----|------|------|------|------|------|
| N°poste      | EM  | 2045 | 71  | 663 | 1445 | 1427 | 674  | 1558 | 2003 |
| N°poste Nœud | 71  | 71   | 317 | 317 | 317  | 1445 | 1445 | 663  | 663  |
| Pas $L_i$    | 200 | 45   | 300 | 200 | 700  | 200  | 150  | 135  | 96   |

**Tableau .IV.2.** Organisation du réseau.

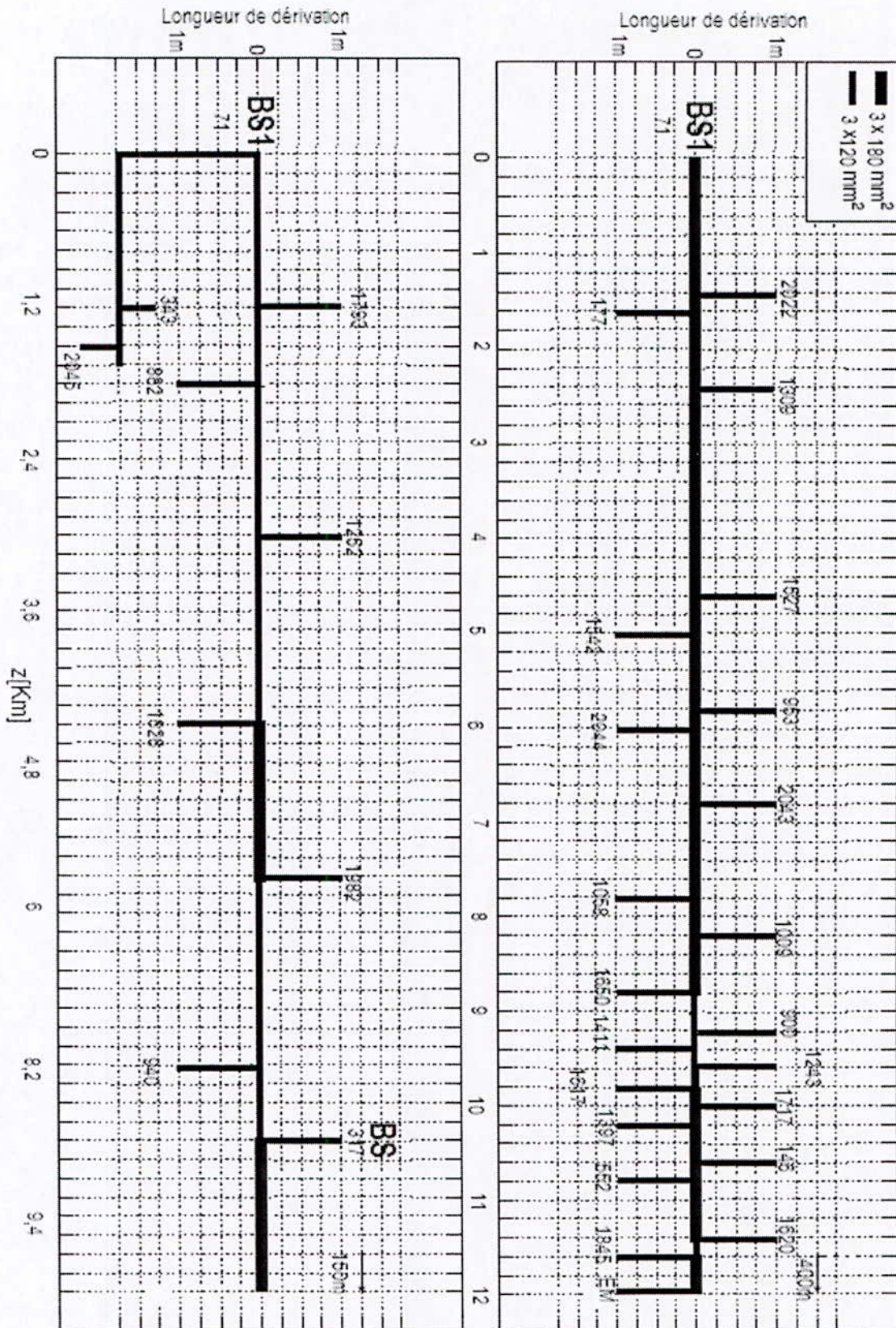


Figure .IV.9a. Interconnexion des postes transformateurs du site.





## IV.4.2. Installation et solutions proposées:

### IV.4.2.1. La station de base :

La réalisation d'une transmission de données à partir d'une station de base vers tous les postes transformateurs qui sont considérés comme unités d'accès (AU), est optimale par un choix de l'emplacement de la station de base minimisant les effets d'atténuation par l'optimisation des distances entre la station de base et les AU et la minimisation du nombre de réflexions et de dérivations. Ainsi la station de base la plus optimale est à installer dans le post transformateur situé dans un nœud qui est au centre du site, ce choix minimise aussi le nombre de répéteur. Dans le site étudié et selon les *figures VI.9.a* et *VI.9.b*, on a choisi d'installer la station de base principale dans le poste transformateur numéro : 317 qui correspond au noeud BS, c'est cette station qui sera directement connectée au réseau fédérateur (Internet, PSTN ou centre de collecte AMR), par l'intermédiaire d'un couplage PLC/SAT ou PLC/fibre optique...etc. Cette station a aussi le rôle d'organiser l'accès au support parmi toutes les AU, et elle est la seule à pouvoir transmettre et recevoir directement les données de toutes les AU. Elle a aussi le rôle de gérer les canaux fréquentiels et la bande passante disponible.

### IV.4.2.2. Branchement des coupleurs :

On propose de faire le couplage à l'intérieur du poste transformateur, ce dernier est constitué d'un tableau (une armoire) BT quadripolaire : un neutre et 3 phases, d'une loge transformateur et de cinq cellules : n°1 une cellule arrivée MT, n°2 et n°3 deux cellules départ MT, n°4 une cellule de protection et comptage consommation transformateur, n°5 cellule transformateur, cette dernière donne directement l'accès au transformateur donc à la partie BT comme le montre les *figures IV.10.a, VI.10.b., VI.10.c., et VI.10.d.*, on choisi d'installer le circuit de couplage à l'intérieur de cette cellule. On branche le coupleur avec le circuit MT (les trois phases) au niveau de la cellule transformateur n°5, et on branche le côté BT du coupleur sur le jeu de barre du tableau de distribution, sinon dans le cas ou il n'y a pas de jeu de barre, on le branche après le disjoncteur de tête.

Comme le montre la *figure IV.10a*, le circuit de couplage PLC/câbles multi paires téléphoniques (ou satellite, wifi), sera installé au niveau de la BS dans le poste transformateur n°317, la partie MT PLC du coupleur est branché sur la cellule transformateur n°5, et l'autre côté avec le support du réseau fédérateur (fibre optique, wifi, câbles multi paires téléphoniques...etc.).

Le signal arrive au poste transformateur par la cellule arrivé (ou départ), il se propage vers la cellule départ (ou arrivée) tout en passant par la cellule n°5, d'où le coupleur extrait le signal (de la MT), et l'injecte dans l'armoire de distribution (dans la BT), ainsi le signal

numérique aura été acheminé à la BT, le signal passe de la BT vers la MT en faisant le chemin inverse. Mais aussi le signal venant de l'arrivée MT continue de se propager dans le reste du réseau électrique MT, le signal se propage d'une AU vers la BS en faisant le chemin inverse.

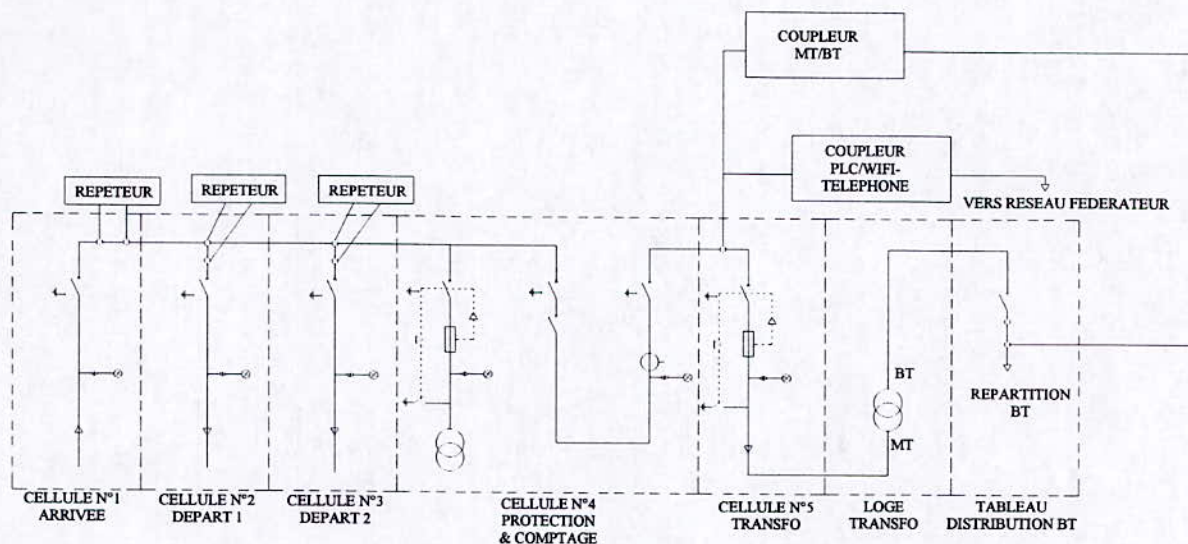


Figure .IV.10a. Coupleur et répéteurs dans le poste transformateur n°317(BS).

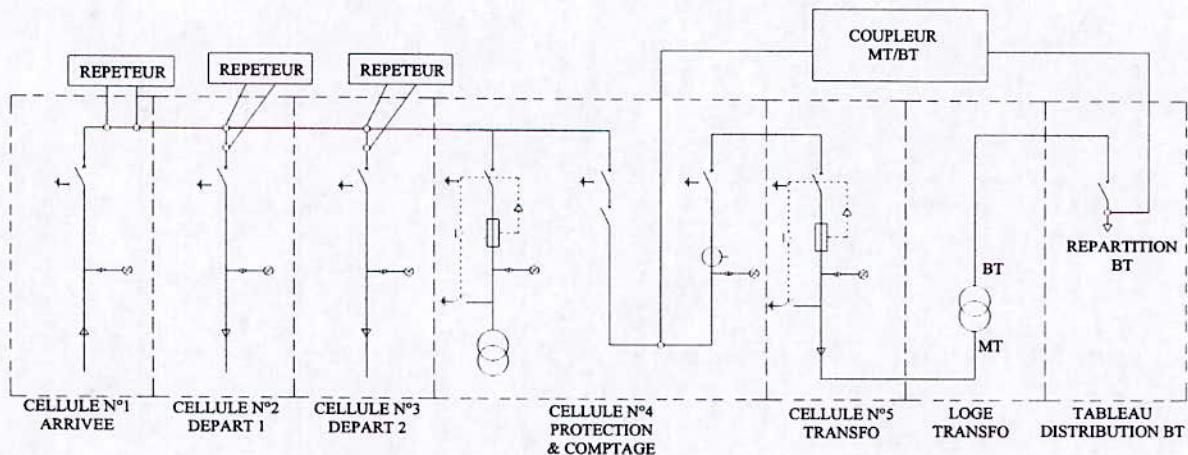


Figure .IV.10b. Coupleur et répéteurs dans les nœuds (BS1, BS2 & BS3)

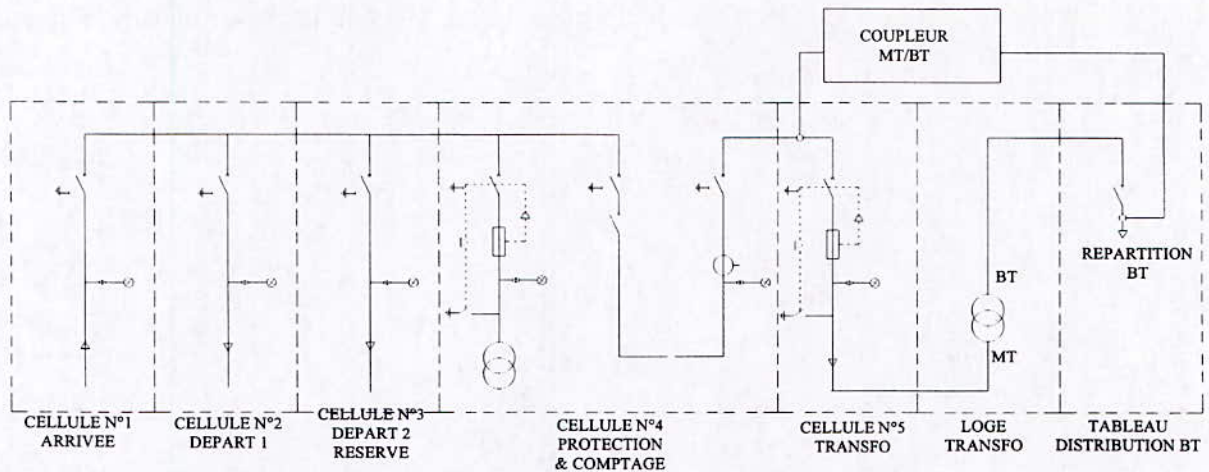


Figure .IV.10c. Le couplage dans tous les postes transformateurs.

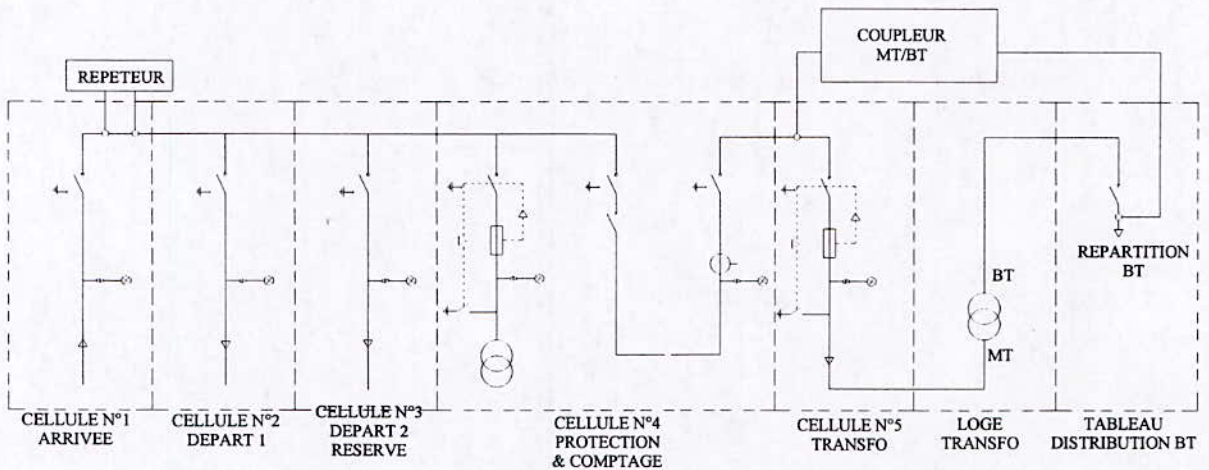


Figure .IV.10d. Coupleur et répéteur dans les postes transformateurs renouvelant le signal.

#### IV.4.2.3. Les répéteurs :

##### IV.4.2.3.a. Comportement du réseau en HF :

On définit un nœud par un poste transformateur dont les deux départs MT sont utilisés pour alimenter d'autres branches du réseau. La transmission directe des signaux de la BS vers les autres AU et vice versa, n'est possible que pour les AU se trouvant en amont des autres

nœuds, car lorsque le signal arrive à un nœud son énergie sera partagée par les différentes branches qui dérivent de ce nœud, il est donc nécessaire d'utiliser des intermédiaires en installant un amplificateur de tension nommé répéteur à chaque nœud.

A l'intérieur de la cellule n°1 de l'arrivée MT, on extrait le signal de la ligne MT et on l'amplifie en tension, jusqu'à un seuil limite (12V en général), et on l'injecte directement dans les deux cellules départ tension, comme l'illustre la *figure IV.10.b*. Dans le site étudié, le dispositif décrit précédemment sera installé dans les nœuds BS1, BS2 et BS3, représentés par les postes transformateurs numéro : 663, 1445 et 71. Au niveau de la BS, les répéteurs sont installés dans les cellules d'arrivée et de départ MT.

Compte tenu des atténuations des conducteurs et des diélectriques engendrées au signal lors de sa propagation dans le réseau électrique, il sera nécessaire de le renouveler, en plaçant des répéteurs. Afin de trouver les différents emplacements et le nombre des répéteurs restant nécessaires à installer, il faut étudier les atténuations affectées au signal lors de sa propagation de la BS vers les AU et vice versa. Pour ce faire il faudra modéliser les 64 réponses fréquentielles des canaux de transmission qui relient les 64 postes transformateurs (AU) à la BS. En utilisant les résultats obtenus lors de l'étude du comportement du câble et d'un réseau à une seule branche en HF, et en développant un algorithme de calcul qui prendra en compte les réflexions et les chemins qu'ils génèrent et la pondération de chaque chemin. En étendant la modélisation multi trajets présentée précédemment, pour l'appliquer à un réseau complexe à plusieurs branches et dérivations et avec une diversité de câbles en sections du conducteur et de l'isolant, et en type unipolaire ou tripolaire, qui varient d'un tronçon à l'autre.

Pour déterminer les étapes qui mènent à la modélisation du réseau on fait les suppositions suivantes :

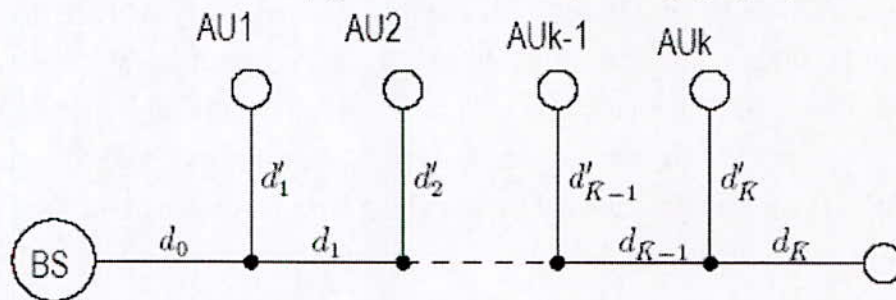
- L'injection est identique dans tout le réseau, on choisie de faire une injection en mode commun (entre la terre et les phases).
- Les points de transmission et de dérivation sont modélisés par des coefficients de réflexion et de transmission  $T_{PJ}(k)$ ,  $\Gamma_{PJ}(k)$ ,  $T_{BJ}(k)$  et  $\Gamma_{BJ}(k)$ , [SAR\_04] et ils agissent indépendamment de la fréquence, ce qui permet d'éviter les interférences. C'est-à-dire que les facteurs de réflexion et de dérivation ne varient pas en fonction de la fréquence dans la plage de fréquence considérée. Selon les équations (IV.15), cette supposition est vérifiée dans le cas où le rapport des impédances caractéristiques des câbles de dérivation et de distribution est constant. Dans notre cas selon les simulations de la *figure IV.5*, les impédances sont constantes dans la plage de fréquence considérée, donc la supposition est validée.
- Les points terminaux agissent indépendamment de la fréquence, et sont modélisés par des coefficients de réflexion  $\Gamma_{BT}(k)$  fixes dans la plage de fréquence considérée [SAR\_04]. Cette hypothèse est satisfaite si le rapport des impédances

caractéristiques reste constant dans la plage de fréquence considérée, cela reste aussi valide pour des câbles d'impédances caractéristiques identiques.

- Le changement de la section du câble est pris en compte, donc les paramètres : constante d'atténuation  $\alpha$  et la vitesse de phase  $v_p$ , sont calibrés pour chaque tronçon selon la section du conducteur du câble parcouru.

*Algorithme de calcul :*

La modélisation du réseau complexe s'est basée sur le modèle multi trajet, en tenant compte des chemins les plus fortement pondérés, c'est-à-dire qui ont les facteurs d'atténuation  $g$  les plus importants. Pour simplifier la modélisation on définit les distances  $\{d_i\}$  respectivement  $\{d'_i\}$ , longueurs des tronçons de câble de distribution respectivement de dérivation, comme schématisé sur la *figure VI.11*. Tel on peut négliger  $\{d'_i\}$  devant  $\{d_i\}$ .



**Figure .VI.11.** Schéma de l'interconnexion des AU et la BS.

Selon [SAR\_04], la fonction de transfert de la transmission bout à bout accepte un développement de Taylor donnée par :

$$T_k(D) = \sum_{j=0}^{\infty} \lambda_{jk} D^j \approx \sum_{l=1}^{N_p} g_{lk} D^{L_l} \quad (IV.16)$$

Tel que  $L_{lk}$  est la longueur du  $l^{\text{ème}}$  chemin d'un  $k^{\text{ème}}$  canal de transmission, et  $N_p$  est le nombre de chemins pris en considération.  $\{\lambda_{jk}\}$  sont les pondérations des chemins dont le nombre est infini.  $D$  représente la propagation dans un câble de longueur correspondant au pas  $L_i$  du segment et ayant une constante de propagation  $\gamma$ , ainsi l'expression de  $D$  varie d'un tronçon à l'autre selon la section du câble, et il est alors donné par l'équation (IV.9) établie lors de l'étude du comportement des câbles en HF :  $D = e^{-\gamma L_i}$ .

Les pondérations  $\{g_{lk}\}$  du  $l^{\text{ème}}$  chemin d'un  $k^{\text{ème}}$  canal de transmission sont obtenues par l'identification avec les premiers  $N_p^{\text{ème}}$  termes non nuls du développement de Taylor. Cependant on les calcule comme suit : on met les longueurs des tronçons sous forme de multiples entiers d'un pas  $L_i$  donné par le tableau IV.2.

La longueur du premier chemin qui relie directement la BS au  $k^{\text{ème}}$  AU d'un segment,

est donnée par la relation :

$$L_{1k} = \sum_{j=0}^{k-1} d_j + d'_k \quad (IV.17)$$

A partir de l'équation (IV.17), on compte :  $k-1$  transmissions au niveau des points de dérivation dans le câble de distribution, et une transmission au niveau de la dérivation qui mène à l'AU qui communique avec la BS, ainsi on trouve la pondération du premier chemin :

$$g_{1k} = T_{PJ}^{k-1} T_{BJ} \quad (IV.18)$$

Par exemple, dans le cas où les câbles de dérivation et de distribution ont chacun une section  $A=180\text{mm}^2$ , donc  $\rho_{zc}=1$ , et sachant que deux chemins successifs sont séparés par la distance  $2L_i$ . En tenant compte que des chemins parcourus par le signal appartenant au câble de distribution, et que de la dérivation qui existe dans la partie transformateur du poste de l'AU adressée, on a alors les coefficients suivants :  $\Gamma_{BJ}(k)=-1/3$ ,  $\Gamma_{PJ}(k)=-1/3$ ,  $T_{BJ}(k)=2/3$  et  $T_{PJ}(k)=2/3$ . Les valeurs des coefficients ainsi obtenues signifient que dans chaque point de dérivation : 1/9 de l'énergie qui arrive est réfléchi, 4/9 est dévié et 4/9 est transmis au long du câble de distribution. On conclut de cette interprétation et à partir des équations (I.V.15) qu'une meilleure transmission à travers le câble de distribution est assurée pour un rapport d'impédances :  $\rho_{zc}$ , supérieur à 1 ( $T_{PJ}$  plus grand et  $|\Gamma_{BJ}|$ ,  $|\Gamma_{PJ}|$  et  $T_{BJ}$  plus faibles).

Et faisant les calculs relativement à la pondération du premier chemin  $g_{1k}$ , dans ce scénario les effets multi trajets peuvent être exclusivement attribués aux réflexions dues aux points des dérivation.

Par exemple : le canal reliant la BS à l'AU n°6 ( $k=6$ ) du segment n°4, voir la figure IV.9.b, (poste transformateur n° 337), dont la longueur est celle du chemin directe qui est égale à  $L_{1,6}=2400\text{m}$  et de pondération selon l'équation (IV.18):

$$g_{16} = T_{PJ}^5 T_{BJ} = \frac{4}{9}$$

Le deuxième chemin prend en compte les réflexions entre deux points de dérivation distants d'une longueur égale au pas  $L_i$  dans le tronçon, dans cet exemple ;  $L_i=200\text{m}$  et la longueur du chemin est de  $L_{2,6}$  tel que :

$$L_{2,6} = (\text{nombre de réflexions produites dans une longueur } L_i) \times L_i + L_{1,6} \Rightarrow L_{2,6} = 5 \times 200 + 2400 \text{ (m)}.$$

En effet selon la figure IV.9.b le nombre de réflexions possibles sur une longueur égale au pas dans le tronçon BS/poste 337 est bien égales à 5, elles correspondent, selon la figure IV.9b, aux réflexions successives dans les tronçons limités par les numéros de postes : {317,1353}, {1353,190}, {190,2024}, {2024,1972}, {1777, 337}, chacun de ces tronçons a une longueur de 200m, la distance 3400m est alors obtenue par :  $5 \times 200 + 2400 \text{ (m)}$ .

On déduit à partir des interprétations précédentes, que la pondération du deuxième chemin est de :

$$g_{2,6} = 5 \Gamma_{PJ}^2 g_{1,6} = \frac{20}{81}$$

En étendant l'algorithme décrit précédemment aux trajets d'ordres supérieurs jusqu'au 6<sup>ème</sup>, tel que les trajets d'ordre supérieur ont des pondérations négligeables. Cet algorithme est appliqué à toutes les unités d'accès, on peut voir les simulations des fonctions de transfert

données par la relation (IV.16) de tous les canaux, qui sont présentées pour les 9 segments déjà définis dans le tableau VI.2. Sur les figures IV.12 jusqu'à IV.17, les simulations sont faites pour chaque canal reliant une AU représentée par son numéro de poste d'un segment, au nœud principal correspondant. A partir des résultats obtenus et on peut constater :

- Dû au fait qu'il existe plusieurs points de dérivation dans les segments et au comportement multi trajet du support, le nombre d'encoches est plus important pour les AU les plus éloignées du nœud. Ainsi, le phénomène de distorsion s'amplifie en s'éloignant du point de transmission. On remarque aussi que ce phénomène ne dépend pas des longueurs mais de l'ordre de l'AU.
- La bande passante à choisir est très étroite. En effet la FT est très instables pour les AU, pour lesquelles le signal passe par plusieurs dérivations, avant d'attendre le récepteur. Ceci est du essentiellement au phénomène de distorsion.
- Le signal transmis est d'autant plus atténué, pour les AU plus distantes du nœud correspondant à son segment.

A partir des résultats obtenus, on conclue que l'introduction des répéteurs s'avère alors nécessaire, afin de combattre les effets d'atténuation et le phénomène multi trajet, dans le but permettre l'établissement d'une transmission de données.

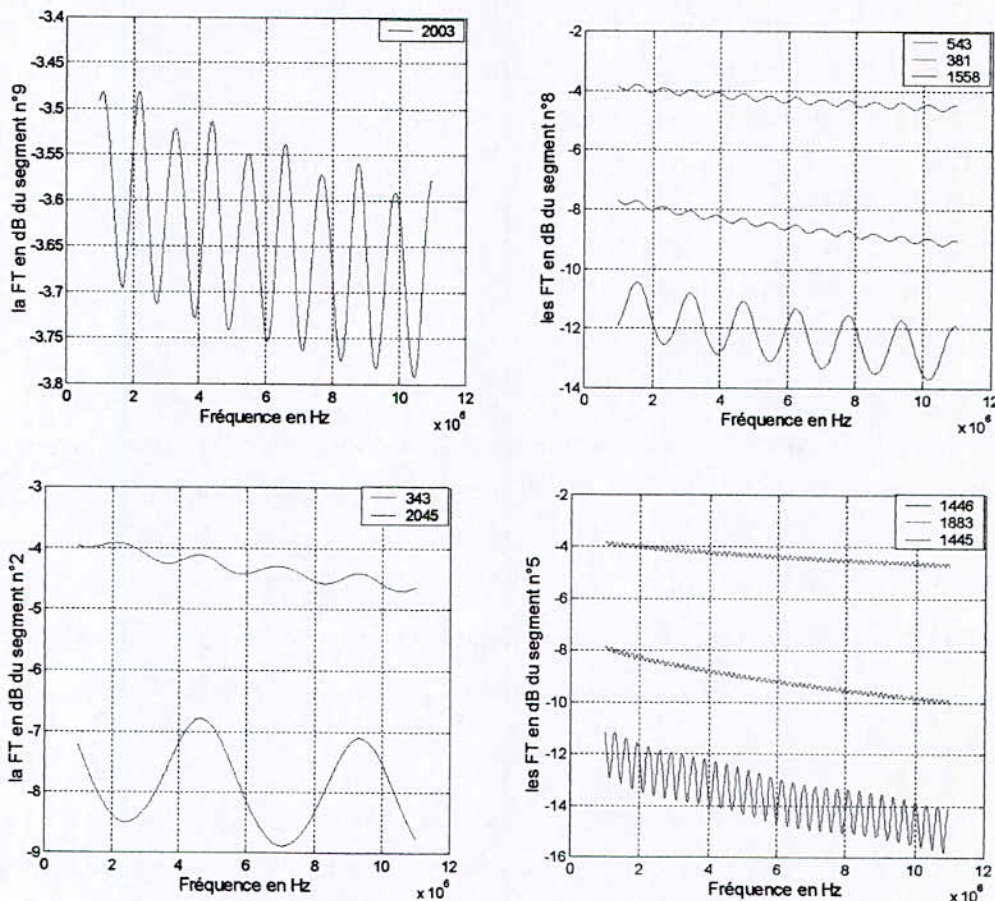


Figure IV.12. Les FT des canaux des segments n°2/BS1 ,5/BS, 8&9/BS2.

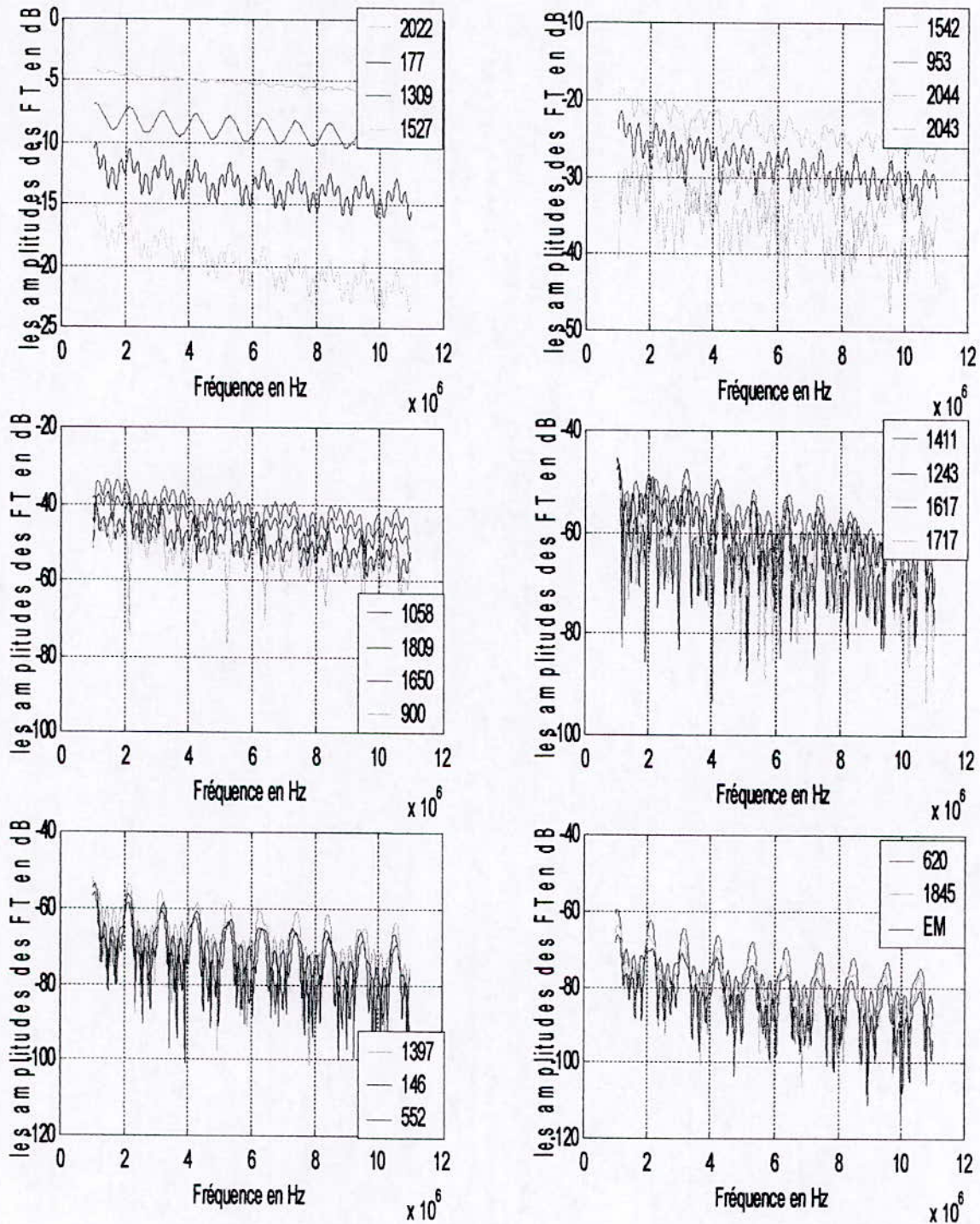


Figure .IV.13. Les FT des canaux du segment n°1/BS1.



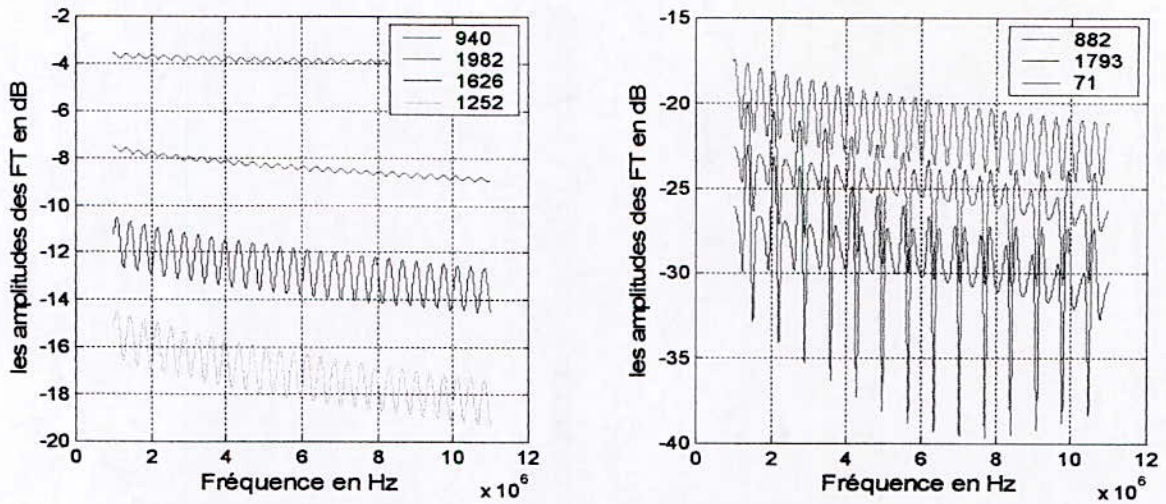


Figure .IV.14. : Les FT des canaux du segment n°3/BS.

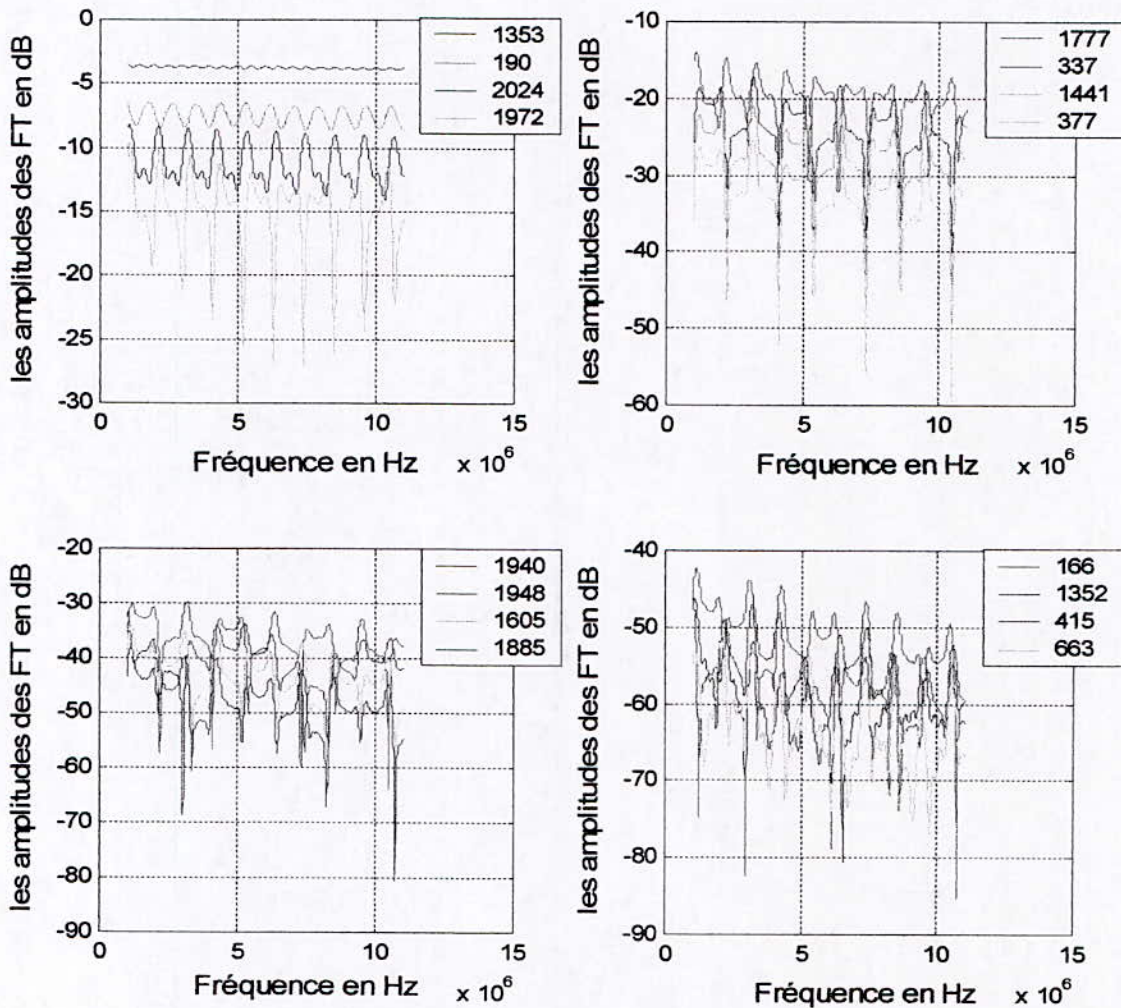


Figure .IV.15. Les FT des canaux du segment n°4/BS.

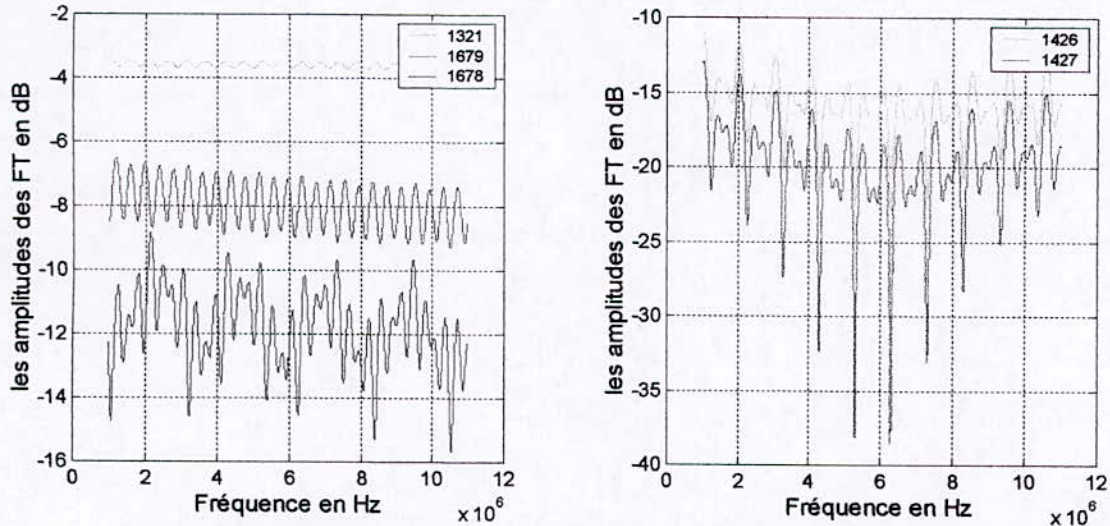


Figure .IV.16. : Les FT des canaux du segment n°6/BS.

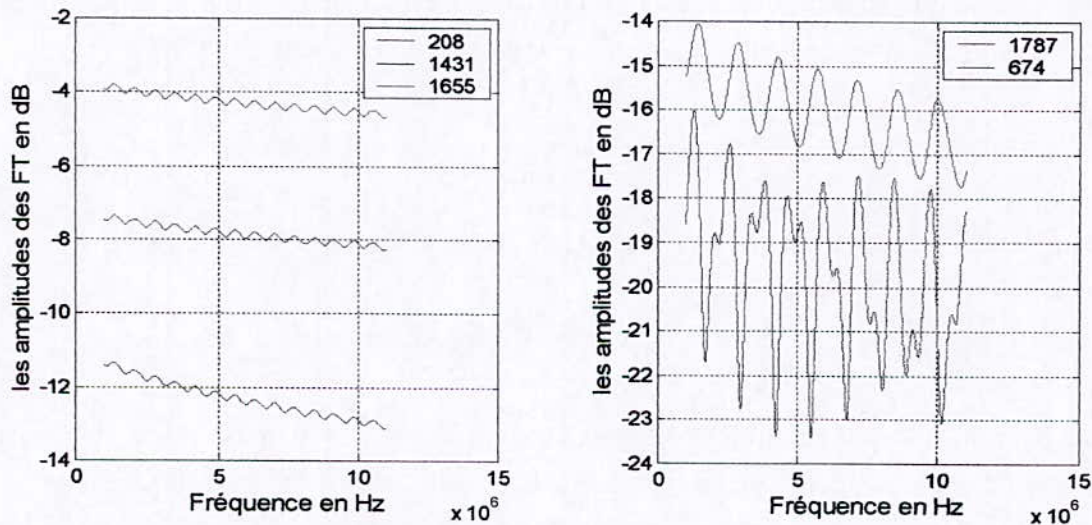


Figure .IV.17. Les FT des canaux du segment n°7/BS3.

**IV.4.2.3.b. Emplacements des répéteurs :**

La difficulté de l'installation de la PLC sur la commune de Bouzareah consiste donc à gérer l'atténuation du signal au long des canaux de transmission, par conséquent, l'utilisation des répéteurs semble être nécessaire pour établir une communication performante sur le site étudié.

*i. La bande de fréquence utilisée :*

Le choix de la bande de fréquence d'injection des signaux de données prend en compte les simulations trouvées dans la section précédente, la bande de fréquence est choisie dans la bande la moins instable, selon les figures IV.12 jusqu'à IV.17, elle correspond à la plage de fréquence [3.5Mhz, 5.5Mhz]. Le rapport signal/bruit est supposé égale à:  $SNR= 40dB$ . La

capacité de transmission théorique du canal est donnée par la relation de Shannon:  $C=B*\log_2(1+SNR)$ . Pour notre système la capacité de transmission du canal :  $C=10\text{Mbits/s}$ .

Une atténuation admissible du signal de données de  $10\text{dB}$  a été envisagée ; chaque répéteur est placé dans la station qui se trouve juste avant la station qui reçoit un signal atténué de plus de  $-10\text{dB}$ , en partant de ces conditions, et en utilisant les résultats des simulations précédentes, on trouve l'algorithme donnant les emplacements des répéteurs, comme décrit sur l'organigramme qui suit.

ii. *L'organigramme de placement des répéteurs :*

Le programme principal fait appel à deux fonctions *Repl* et *Impul* :

a- *Repl* :

Cette fonction calcule et retourne le vecteur fonction de transfert en fonction des différentes distances entre les AU et le nœud correspondant au segment auquel elles appartiennent, programmée comme dans la section précédente mais à une fréquence fixe, ayant comme arguments : le segment, la fréquence, le pas.

1- *Le segment* :

Vecteur distance entre les postes et le nœud correspondant au segment à étudier.

2- *La fréquence* :

La fréquence d'injection des signaux, déduite des figures VI.12 jusqu'à VI.17.

3- *Le pas* :

C'est le pas de calcul des différents trajets possibles du signal, correspondant à  $L_i$ .

b- *Impul* :

Cette fonction calcule et retourne le vecteur fonction de transfert à une certaine plage de fréquence, ayant comme argument : le segment, le numéro du poste transformateur, le pas.

1- *Le numéro de la station* :

C'est l'ordre de la station de laquelle on veut voir l'état du signal, et qu'on tire du vecteur segment. L'organigramme du programme principal utilise les variables suivantes:

*tr1* : le segment qu'on veut étudier.

*L0* : le pas de calcul des trajets.

*v* : la fréquence pour laquelle on implémente des répéteurs.

*Nu* : La taille du segment.

*h* : le vecteur FT des différentes stations après placement des répéteurs à la fréquence *v*.

*n*, *h2* et *m* : variables internes.

*nbrep* : nombre des répéteurs.

*t* : Le numéro de la station dans le segment.

*freq* : le vecteur des fréquences utilisé pour simuler les différentes fonctions de transfert après placement des répéteurs.

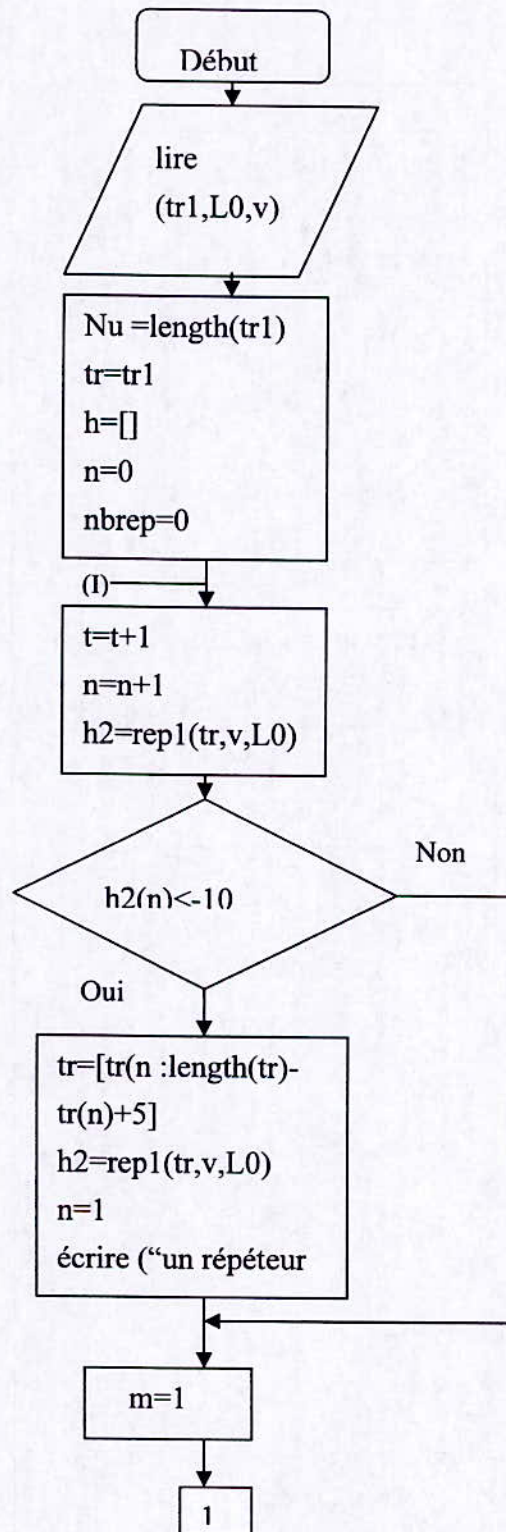
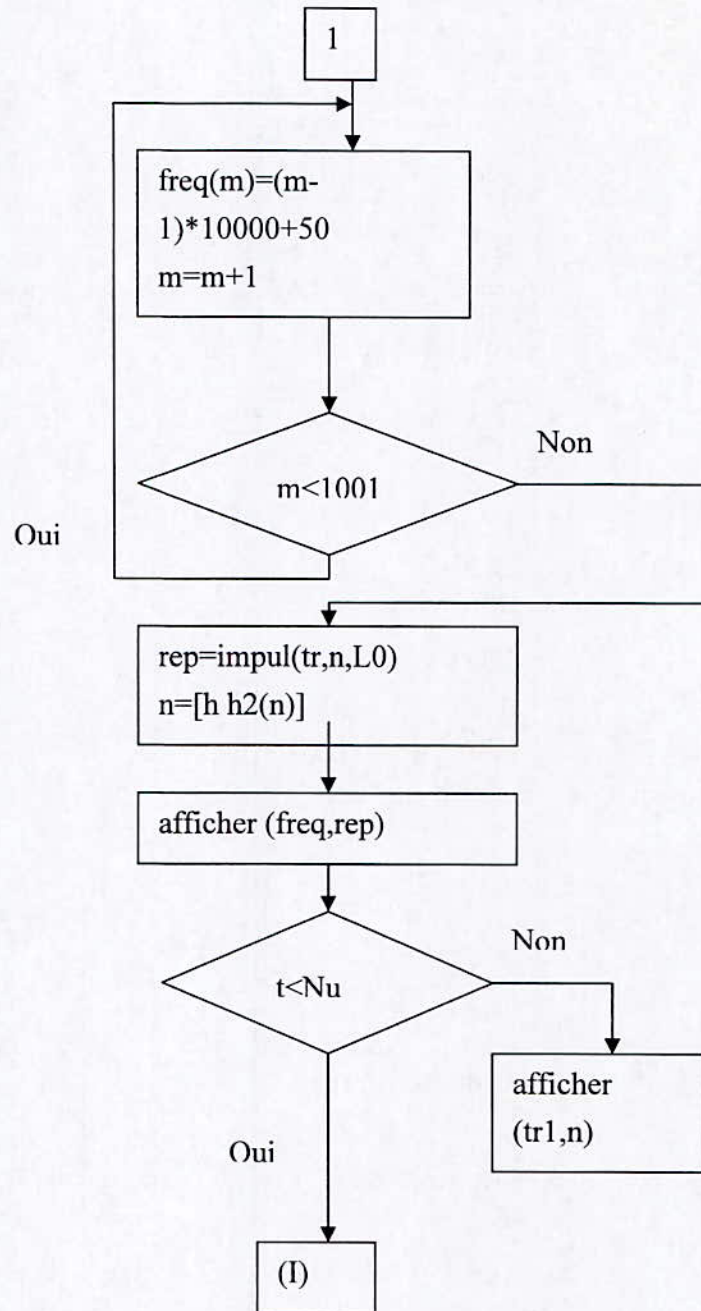


Figure .IV.18. L'organigramme de placement des répéteurs (1<sup>ère</sup> partie).



**Figure .IV.18.** L'organigramme de placement des répéteurs (2<sup>ème</sup> partie).

iii. Résultats de la simulation :

Les simulations des fonctions de transfert après avoir placé les répéteurs, sont présentées pour les 9 segments déjà définis dans le tableau VI.2. Les simulations sont faites pour chaque canal qui relie une AU d'un segment au nœud correspondant exécutant le programme de l'organigramme précédent.

A partir des simulations présentées sur les figures VI.19. & VI.20 on constate :

- Après l'installation des répéteurs dans les postes transformateurs déterminés par l'algorithme précédent, l'atténuation des signaux aura été maximisée à 10dB.
- Le placement des répéteurs dans l'installation permet le renouvellement efficace du signal contre l'atténuation présente dans les canaux de transmission.
- Après avoir placé les répéteurs, on remarque que la densité des distorsions dans la fonction de transfert a diminué relativement aux résultats des figures VI.12 jusqu'à VI.17, ceci s'explique par le fait que le signal une fois arrivé au répéteur sera entièrement renouvelé, de sorte que même les effets multi trajet est minimisé.
- Le signal est plus stabilisé, ceci permet d'augmenter la bande passante de la transmission.
- En tenant compte des répéteurs installés dans les nœuds (voir figure IV.10), dont le nombre est égale à 12, plus le nombre de répéteurs trouvés lors des simulations des segments qui est égale à 26, le nombre total de répéteurs nécessaires est alors égale à 38. Leurs différents emplacements sont donnés par le tableau IV.3.

| Segment                         | 1  | 2 | 3             | 4  | 5             | 6             | 7             | 8   | 9 |
|---------------------------------|--|---|---------------|--|---------------|---------------|---------------|-----|---|
| N° poste<br>transfo<br>répéteur | 2022,<br>1309,<br>1527,<br>953,<br>2043,<br>1058,<br>1717,<br>552,<br>1845 |   | 1252,<br>1982 | 1972,<br>1777,<br>1441,<br>377,<br>1605,<br>1885,<br>166 | 1446,<br>1883 | 1679,<br>1426 | 1431,<br>1787 | 381 |   |
| Nombre<br>de<br>répéteurs       | 10   | 0 | 2             | 7  | 2             | 2             | 2             | 1   | 0 |

**Tableau .IV.3.** Emplacements des répéteurs dans le réseau.

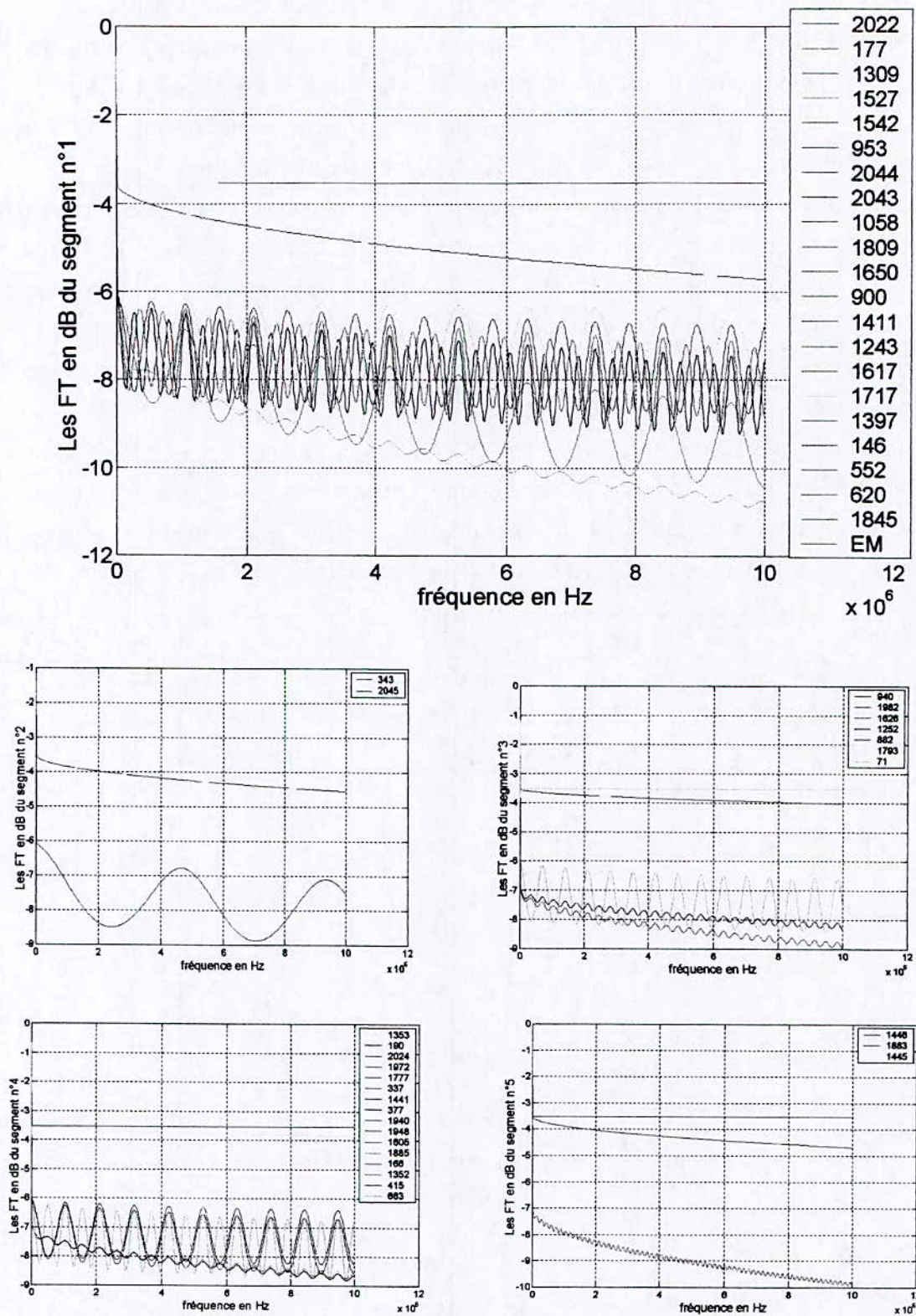
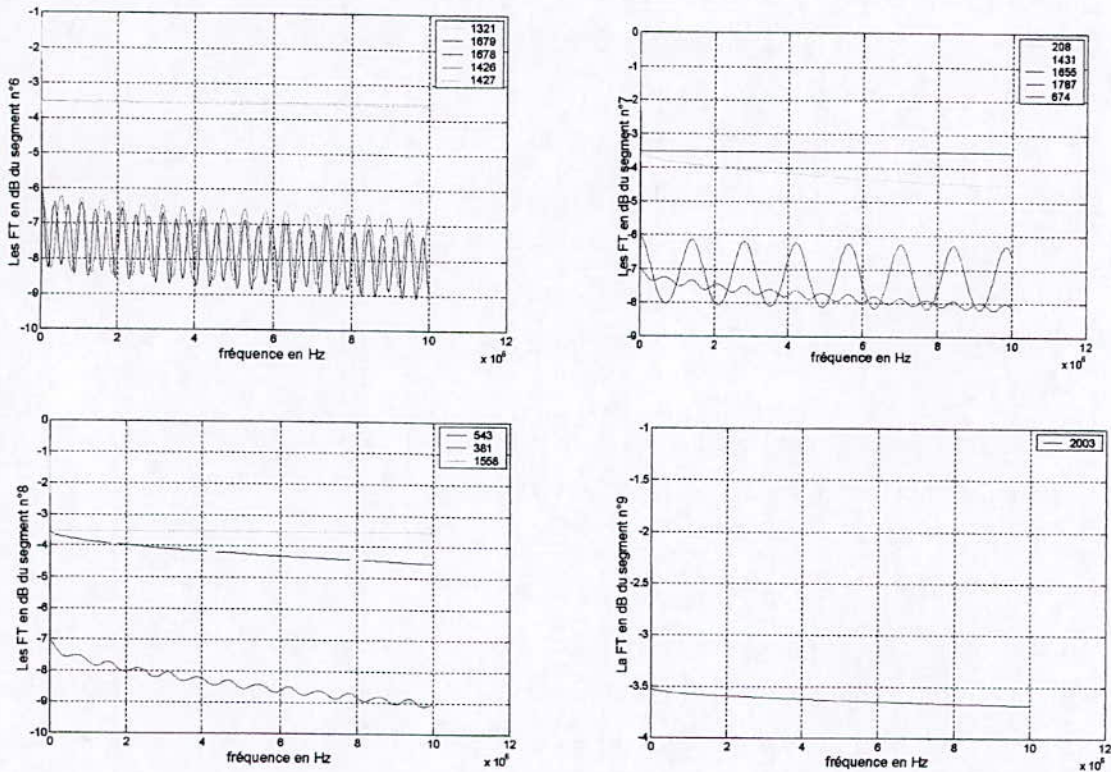


Figure .IV.19. Les FT des segments n°1,2,3,4 & 5 après placement des répéteurs.



**Figure IV.20.** Les FT des segments n°6, 7, 8 & 9 après placement des répéteurs.

#### IV.4.3. L'aspect logiciel de l'installation:

##### IV.4.3.1. La structure du réseau :

Le système a une structure logique en bus avec 65 unités d'accès (AU), on lui assigne 20 canaux fréquentiels avec une capacité de transmission de 64Kbits/s par direction. La station de base BS fournit l'accès au réseau fédérateur, tel que le système est à accès centralisé, ceci signifie que la gestion de la bande passante ainsi que l'organisation et le contrôle d'accès au support physique sont faits au niveau de la BS. Les AU peuvent émettre et réceptionner à travers toutes les sous porteuses en parallèle, un nombre de canaux peut être alloué à une AU particulière, dans ce cas, l'AU est capable d'émettre et de recevoir sur les canaux alloués. Les autres canaux sont alloués pour les autres AU.

##### IV.4.3.2. Le système OFDM :

Un système OFDM permet l'exploitation de la bande passante avec une efficacité élevée, le spectre disponible est divisé en plusieurs porteuses chacune étant à bande étroite (voir *chapitre III*). Pour notre système, on fait les suppositions suivantes :

- L'injection des signaux se fait dans la bande de fréquence avec un compromis d'être la plus large possible, et dans laquelle les atténuations affectées au signal sont les plus faibles possibles, et procurant le plus de stabilité au signal. Compte tenu des



simulations réalisées dans la section précédente, selon les figures VI.19 et VI.20 la bande satisfaisant les conditions précédentes est l'intervalle : [3.5MHz, 5.5MHz]. On déduit que la largeur de bande est alors :  $B = (5.5 - 3.5) \text{ MHz} = 2 \text{ MHz}$ .

- On choisit une longueur d'une trame OFDM  $T_u = 15.6 \mu\text{s}$ , et un préfixe cyclique supérieur au plus grand retard de la propagation du signal, trouvé dans les simulations de la figure VI.5,  $T_g = 3.05 \mu\text{s}$ . L'espacement entre deux sous porteuses est donnée par [STA\_00] :  $\Delta f = 1/(T_u - T_g)$ , dans notre cas  $\Delta f = 80 \text{ kHz}$ .
- Le nombre de sous porteuses est donné par le rapport :  $B/\Delta f$ , donc égale à 25 sous porteuses.
- Le débit net des données par sous porteuse OFDM, avec une modulation QPSK, et un taux de codage 0.5, est donné par [STA\_00]  $\Gamma_b = 2 \times 0.5 / T_u \Rightarrow \Gamma_b = 64 \text{ kbit/s}$ .

#### IV.4.3.3. La structure logique du canal :

Nous supposons qu'une paire de canaux (direction montante : MO et descendante DE) est utilisée pour la signalisation. Le canal de signalisation montant est utilisé pour une demande par l'AU pour une transmission de données ou une attribution de canaux. Le canal de signalisation descendant transmet des paramètres de contrôle et des reconnaissances positives ou négatives de la réception des demandes des AU, à partir de la BS aux AU.

Chaque canal unidirectionnel peut être utilisé comme un canal de signalisation (sig) ou de données (données). Quelques canaux sont assignés en tant que canaux réservés (RES), qui sont utilisés comme substituts à des canaux en état d'effacement. Dans le cas où un canal portant des données est erroné, un canal de réservation libre s'en charge de la transmission. Les différentes transitions d'état des canaux sont schématisées dans la figure IV.21.

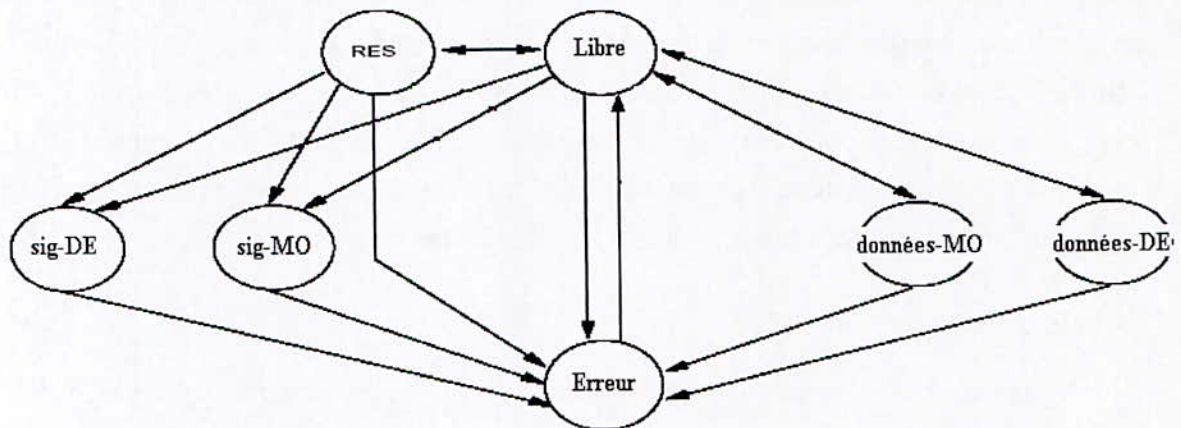


Figure .IV.21. Diagramme des états des canaux

Dans un état libre, le canal n'est utilisé pour aucune transmission. A partir de cet état il peut être assigné à l'un des états possibles de transmission ou à un état réservé. Les canaux peuvent transiter de n'importe quel état de transmission ou d'un état libre ou réservé vers un état d'erreur. Dans ce cas-ci, le canal ne peut être utilisé pour aucune transmission et si le canal est prêt à être réemployé, il transite vers un état libre et peut être assigné pour la transmission, ou bien devenir réservé.

La couche physique du système doit pouvoir mesurer la qualité des canaux de transmission dans tous les états. La BS est au courant à chaque moment au sujet de la disponibilité des sous canaux OFDM. Elle commande la largeur de bande disponible aux AU.

#### IV.4.3.4. Le protocole de la couche MAC :

Dans cette section nous décrivons un protocole MAC [STA\_00] fondé sur les hypothèses suivantes, faites sur le système:

- Seulement les canaux de transmission de type paire d'un canal unidirectionnel montant et descendant, peuvent être assignés comme canal bidirectionnel d'une capacité de  $64\text{kbits/s}$  par direction de transmission. La direction de transmission d'un canal unidirectionnel ne peut pas être changée, ainsi nous avons un nombre ferme de canaux montants et descendants.
- Les AU peuvent transmettre seulement à travers des canaux unidirectionnels montants et elles ne peuvent pas les écouter. En outre, elles peuvent écouter les canaux descendants mais ne peuvent pas transmettre à travers eux. D'autre part, la station de base reçoit l'information sur les canaux montants et la transmet sur les canaux descendants.

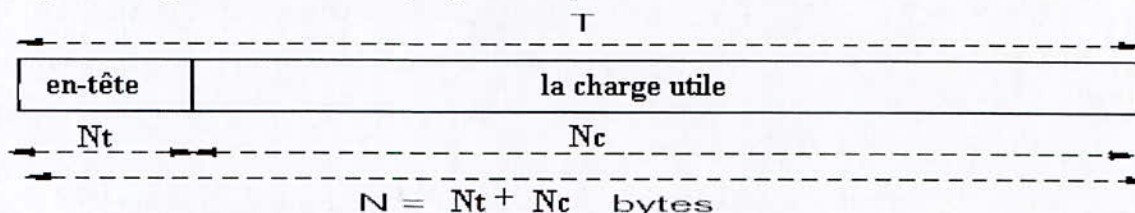
Une des tâches du protocole MAC est d'organiser l'allocation du canal entre les AU et la BS. Nous supposons que la transmission de données dans la direction descendante n'est pas compliquée, parce qu'il y a toujours une circulation de l'information de la BS vers une AU et une collision n'est pas possible. On distingue deux tâches principales du protocole MAC :

- Il est important d'organiser la transmission des données dans la direction montante sans qu'il y ait collision entre les paquets de données des différentes AU. Donc, il doit y avoir un mécanisme d'arbitrage qui peut contrôler la transmission à libre collision de données dans la direction montante. Pour la réalisation de ce mécanisme, un type de protocole de signalisation doit être réalisé. La signalisation doit inclure des demandes d'attribution du canal ou de transmission de la part des AU et également [STA\_00] des réservations des capacités de transmission de données et des attributions de canaux.
- En second lieu, l'attribution et la réattribution des canaux de transmission en cas d'erreur doivent être organisées par la couche MAC. Par conséquent, une gestion des canaux libres et réservés doit être réalisée par la couche MAC.

#### VI.4.3.4.a. Les canaux de signalisation et de données :

La transmission à travers les canaux de données et de signalisation est organisée dans les trames de la couche 2, qui se composent d'un champ d'en-tête et de charge utile (*la figure IV.21*). La charge utile est employée pour la transmission de l'information par l'utilisateur, dans les canaux de données et pour la transmission des messages de commande dans les canaux de signalisation. Les trames de la couche 2 sont transmises en parallèle sur les deux canaux de données et de signalisation, elles se caractérisent par leur durée constante ( $T$ ). Selon cette durée, il y a un certain nombre de bytes qui peut être transmis dans la trame ( $N$ ) selon la capacité de transmission du canal ( $64\text{kbits/s}$ ).

L'en-tête de la trame contient une information qui peut être identifiée par l'AU et assigne un début d'une nouvelle trame (nouvelle durée). Dans la direction descendante l'en-tête contient également une indication pour un canal de données ou de signalisation. Ainsi, l'AU connaît lesquels des canaux sont assignés pour la transmission de données et quel canal est utilisé pour la signalisation dans la plage de temps en cour.



*Figure IV.21 : La trame de la couche 2.*

#### *Le format des données :*

Les paquets de l'utilisateur (paquets IP ou paquets AMR) sont rassemblés dans des segments PLC. La longueur d'un segment PLC est choisie selon la longueur de la charge utile de la trame de la couche 2 ( $N_c$ , *la figure IV.21*). Ceci rend possible la transmission d'un segment PLC pendant le slot (la plage de temps) à travers un canal de transmission ( $K$  segments sur  $K$  canaux pendant un slot). Nous définissons quatre types [STA\_00] de segments de PLC.

- BOM (Begining Of Message) le premier segment du paquet, contenant le ID du récepteur.
- EOM (End Of Message) le dernier segment du paquet.
- COM (Continuing Of Message) le segment entre les segments BOM et EOM.
- SSM (Simple Segment of Message) segment individuel contenant l'identification du récepteur.

Chaque AU écoute dans la direction descendante tous les canaux de données et peut reconnaître quand le segment BOM ou SSM est arrivé, l'identification du récepteur dans le segment, l'AU décide de recevoir (ou ne pas recevoir si l'ID est erroné) aussi les segments COM jusqu'à ce que le segment EOM arrive. Dans le cas du segment SSM avec un ID correspondant, seulement ce segment est reçu par l'AU.

#### *Le canal de signalisation :*

La partie montante du canal de signalisation est utilisée pour les demandes de transmission des AU, on peut utiliser la méthode d'accès aléatoire :

les demandes des AU peuvent être envoyées seulement dans des slots définis donc, l'AU peut faire une demande durant une plage de temps, le message de demande comporte une information sur l'AU (ID), le type de service demandé ...etc. Dans la plage de temps qui suit, la confirmation de la demande est supposée dans la partie descendante du canal de signalisation. S'il y a une collision, l'AU répète la demande après un temps aléatoire. Autrement dit, l'AU commence à transmettre les segments à un temps permis.

#### **VI.4.3.4.b. L'organisation de l'accès :**

En général on peut réaliser une organisation d'accès centralisé ou distribué, dans le premier cas uniquement la BS connaît les droits d'accès de toutes les AU donc la station de base doit envoyer un message à une AU chaque fois que celle ci est permise d'envoyer quelques données, ce qui provoque une augmentation de la charge dans la direction descendante du canal de signalisation, pour y remédier, la méthode suivante est proposée.

Le message d'acceptation d'une demande de transmission de données peut aussi contenir le nombre de segments qui sont demandés par l'AU ; Cette information est aussi valable pour toutes les AU, donc elles connaissent le nombre de segments qui sont demandés à transmettre par d'autres AU dans le réseau. D'un autre côté, les AU ont une information sur le nombre de canaux de données valables pour la transmission de données dans chaque slot et donc combien de segments PLC peuvent être transmis.

Donc les AU ont toujours une information complète sur les segments restants à transmettre par les autres AU.

Si la demande de l'AU est acceptée (pas de collision), l'AU attendra le temps nécessaire pour la transmission des segments restants par les autres AU. Après cette durée, l'AU peut commencer à transmettre ses segments.

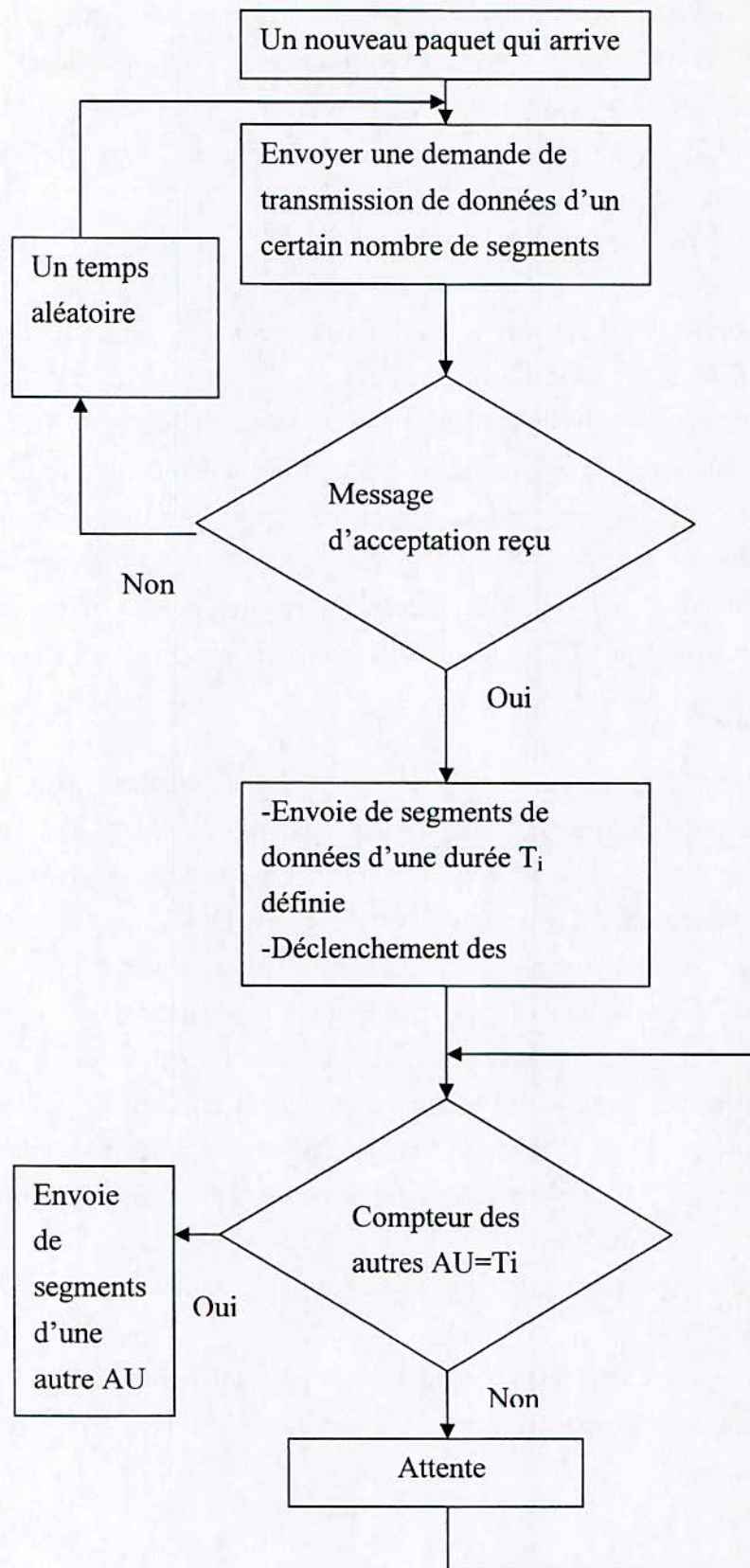


Figure IV.22 : Principe du protocole proposé.

#### VI.4.3.4.c. La correction des erreurs :

Si une erreur survient dans le canal d'une transmission de données, les AU sont informées par cette erreur au début de la plage de temps (slot) qui suit l'interférence concernée, (pas de trame couche 2 dans le canal) ce qui signifie que la transmission de données dans le slot précédent a échoué, et les AU doivent retourner dans l'état du début du slot de l'interférence :

- Si l'AU n'est pas active, elle compte un nombre possible de segments PLC qui peuvent être transmis dans une plage de temps (un slot), le nombre des segments transmis durant la plage de temps d'interférence précédente n'est plus valide et le compteur devrait redémarrer avec l'ancienne valeur.
- L'AU recevant les segments, elle laisse ceux reçus dans le slot précédent.
- L'AU transmettant le segment répète la transmission de faite dans le slot précédent, selon la capacité disponible pour la transmission de données dans le slot en cour.
- La BS répète la transmission des segments à partir du slot précédent et laisse tous les segments reçus durant la plage d'interférence.

Si le canal de signalisation était en état d'erreur dans le slot précédent, l'information de commande reçue n'est pas valide, ce cas peut être reconnu par les AU après l'absence d'un en-tête de trame spécifique [STA\_00] dans le canal qui était utilisé pour la signalisation. Les AU ignorent l'information de signalisation reçue pendant le slot précédent et ne prennent en considération que la signalisation du slot précédent le temps d'interférence. Dans le cas d'un échec dans l'ensemble des canaux de signalisation et de données, les deux procédures de répétitions précédentes doivent être faites.

#### IV.5. Conclusion :

Après avoir modélisé les lignes MT en HF, on a constaté que l'atténuation est d'autant plus importante en montant en fréquence et en distance, et qu'elle dépend de la section du câble. Les simulations obtenues pour une liaison de transmission à une seule dérivation ont montré, que l'effet multi trajet rétréci la bande passante en créant des instabilités dans la FT (distorsion).

Les simulations faites pour le réseau réel choisi, a permis d'avoir la fonction de transfert de chaque poste transformateur. Ce qui nous a mené à constater l'existence d'importantes atténuations et distorsions, rendant ainsi la transmission impossible, d'ou la nécessité de placer des répéteurs qui régénèrent les signaux. Ces derniers ont été placés en considérant une atténuation admissible de -10dB, l'étude a montré que le réseau nécessite 38 répéteurs.

La modélisation du réseau nous a aussi permis de choisir la bande fréquentielle, qui a été exploitée pour proposer un système OFDM. L'organisation de l'accès aux canaux du système OFDM, est faite dans la couche MAC, dont le développement proposé concerne l'allocation des canaux de données et de signalisation, ainsi que la correction des erreurs.

# *Conclusion Générale*

---

Ce travail a été consacré à l'étude et l'élaboration d'un réseau PLC de ville, pour la transmission des paquets IP et AMR, pour ce faire il nous a fallu acquérir des connaissances sur l'architecture en couches des réseaux informatiques, et sur les éléments d'une transmission de données notamment la modulation et le codage.

Lors de la conception du réseau PLC, on a pris en compte la présence de nombreux défis techniques dans le support physique, notamment l'atténuation dépendant de la fréquence et des longueurs ainsi que l'effet multi trajet qui affecte la propagation des signaux HF. L'hostilité d'un environnement d'un tel support requiert l'adoption de techniques de communication sophistiquées et convenables à un support partagé par plusieurs unités d'accès.

A partir de la description du site et de la structure du poste transformateur, on a proposé une technique d'installation des différents équipements : coupleur MT/BT, coupleur MT/réseau fédérateur et répéteurs, qui permet une transmission de donnée et qui optimise le mieux le volume et les frais des équipements d'installation.

Lors de l'étude de faisabilité de l'installation d'un réseau PLC sur le site choisi, on a commencé par la modélisation des câbles MT, en prenant en compte les pertes dans les conducteurs et les diélectriques, pour déduire leurs caractéristiques en HF (constante de propagation, l'impédance caractéristique...etc.), qui ont été utilisées pour étendre la modélisation à un réseau à une seule dérivation, ce qui a permis de constater l'effet le multi trajet en distorsion et en atténuation. La modélisation du réseau précédent a permis de développer un algorithme de calcul extensible au réseau complexe étudié, qui prend en compte l'effet multi trajet qui affecte la propagation des signaux HF. Les résultats des simulations faites ont mené à proposer des solutions techniques consistant à choisir les emplacements des répéteurs à installer, qui permettent de renouveler les signaux réfléchis et atténués.

Compte tenu des avantages qu'offrent les lignes de la moyenne tension sous terrains, d'avoir une densité de branchement, un niveau de rayonnement et une présence des perturbations et des interférences, inférieurs à ceux de la basse tension, la technique de modulation adoptée devra permettre une montée en débit tout en résistant à un niveau moyen de bruit et d'interférence, ce qui justifie le choix de l'OFDM au lieu du Spread Spectrum. On a proposé un système OFDM à 25 sous porteuses modulées en QPSK avec un débit de 64kbit/s par canal et par direction.

Afin de partager l'accès au support de transmission parmi les 65 unités d'accès, on a proposé une organisation de la couche MAC, qui consiste à définir les types des canaux selon le service à fournir (transmission des paquets IP et AMR), on a alloué un canal à la signalisation et le reste des canaux à la transmission des segments de données.



Quant aux perspectives qui peuvent donner suite à ce travail :

- Des études sont à mener pour développer l'aspect logiciel aux niveaux de la couche physique et la couche liaison de données, pour aborder l'aspect Quality Of Service et améliorer les performances de ce système de communication, en intégrant des mécanismes de correction d'erreurs robustes tel que ARQ à rejet sélectif, et des techniques d'accès dédiées tel que le CSMA/CA.
- Des mesures sur le terrain sont à entreprendre, pour les comparer aux résultats théoriques obtenus, afin de minimiser les erreurs de modélisation et valider les algorithmes de calculs.
- Le développement d'un système PLC pour une exploitation multi applications, comprenant la télégestion, la télé relève, le contrôle du réseau électrique instantanés (par exemple gérer le déséquilibre de charge, les pannes...etc.), les transmissions haut débit (Internet), la téléphonie...etc.
- Le développement d'un réseau PLC Indoor, ayant comme applications, les réseaux locaux d'entreprise et la domotique.

# *Annexes*

*[Faint, illegible text, likely bleed-through from the reverse side of the page]*

## A. REALISATION DU SIGNAL OFDM EN BANDE DE BASE :

Le principe de l'OFDM est la transmission en parallèle de  $N$  sous porteuses modulées en  $M$ -QAM (Quadrature Amplitude Modulation), donc basée sur une modulation en amplitude d'une porteuse en phase et en quadrature. Comme il est inconvenable de réaliser un système avec un nombre très grand d'oscillateurs, [DEG\_02] une solution élégante consiste à utiliser les propriétés de la transformée de Fourier discrète.

### A.1. Analyse théorique du procédé de modulation/démodulation utilisant l'algorithme de la FFT :

Chaque sous porteuse  $\hat{s}_k(t)$ , est modulée en  $M$ -QAM pendant une durée  $T_u$ , et va donc prendre une amplitude  $A_k$  et une phase  $\varphi_k$ . Dans l'intervalle de temps  $[0, T_u]$ , la sous porteuse  $\hat{s}_k(t)$  modulée s'écrit :

$$\hat{s}_k(t) = A_k \sin(2\pi f_k t + \varphi_k)$$

On peut aussi exprimer  $\hat{s}_k(t)$  sous la forme :

$$\hat{s}_k(t) = c_k \cos(2\pi f_k t) - b_k \sin(2\pi f_k t)$$

Ou,  $x$  désigne la notation complexe associée au signal réel  $\hat{x}$  :

$$s_k(t) = D_k \cdot \exp(j2\pi f_k t)$$

$$\text{avec } D_k = A_k \exp(j\varphi_k) = c_k + jb_k$$

$D_k$  correspond donc au symbole associé à un point de la constellation  $M$ -QAM

L'ensemble des symboles  $D_k$ , pour  $k$  variant de 1 à  $N$ , est noté  $\{D\}_{1:N}$ . Toutes les  $N$  sous porteuses étant émises en parallèle, le signal OFDM complexe, noté  $s(t)$  peut s'écrire sur  $[0, T_u]$  :

$$s(t) = \sum_{k=1}^N D_k \exp(j2\pi f_k t) = \sum_{k=1}^N D_k \exp(j2\pi \frac{k}{T_u} t)$$

Envisageons maintenant un échantillonnage du signal avec une période  $T_e = T_u/N$ . A chaque instant  $t = nT_e$  avec  $n \in [1, N]$ , le signal échantillonné  $s(nT_e)$ , que l'on notera  $s(n)$  pour simplifier s'écrit :

$$s(n) = \sum_{k=1}^N D_k \exp(j2\pi \frac{k}{T_u} nT_e)$$

En tenant compte de la relation liant  $T_u$  et  $T_e$ , la relation précédente devient :

$$s(n) = \sum_{k=1}^N D_k \exp(j2\pi \frac{kn}{T_u})$$

Le terme  $s(n)$  sera appelé symbole OFDM, l'ensemble de ces symboles, pour  $n$  variant de 1 à  $N$  et noté  $\{s\}_{1:N}$ ; constituera la trame OFDM.

A ce stade de la démonstration, il est inté

essant de rappeler la définition de la transformée inverse de Fourier discrète, qui associe aux symboles  $X_k$  pour  $k[1 : N]$  les symboles  $y_n$  avec  $n \in [1 : N]$  de la façon suivante :

$$y_n = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_k \exp(j2\pi \frac{kn}{N})$$

Au facteur  $N$  près, le signal  $s(n)$  apparaît comme la transformée de Fourier inverse et discrète (TFID) des symboles  $D_k$ , l'indice  $k$  faisant référence à la  $k^{\text{ième}}$  sous porteuse. Si on introduit ainsi ces symboles  $D_k$ , associés à la démodulation  $M$ -QAM, dans un module de TFID, on obtiendra en sortie, l'ensemble des symboles complexes  $s_n$  du signal en bande de base, c'est-à-dire la trame OFDM. A la réception, il suffira d'effectuer la transformée de Fourier discrète directe (TFD) sur les symboles reçus pour restituer le message désiré.

### A.2. La modulation de chaque sous porteuse :

Si un nombre  $R$  de bits à transmettre est alloué à chaque sous porteuse, on utilisera une modulation  $M$ -QAM (Quadrature Amplitude Modulation), la taille  $M$  de la constellation étant telle que  $2^R$ . Chaque symbole est représenté par un nombre complexe, dont les parties réelles et imaginaires sont notées respectivement  $I$  et  $Q$ . La *figure III.9* montre deux exemples de codage de bits par codage de Gray : le codage de la 4-QAM, identique à celui de la QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), qui code 2 bits par symbole, et le codage 16-QAM, qui code 4 bits par symbole.

Chaque constellation est bâtie sur le même modèle, à savoir que les parties réelles et imaginaires des symboles prennent leurs valeurs dans  $\{+/-v, +/-3v, +/-5v, \dots\}$ . La valeur de  $v$  est ensuite normalisée pour que la puissance moyenne des symboles  $D_k$ , appartenant à une constellation, soit égale à 1 watt, la normalisation étant basée sur une valeur d'impédance de charge de  $1\Omega$ . Cette condition de normalisation s'écrit mathématiquement sous la forme suivante :

$$\frac{1}{M} \sum_{k=1}^M |D_k|^2 = 1$$

A la réception, la *FFT* restituera les symboles  $M$ -QAM, mais entachés de bruit. Le décodage s'effectuera donc grâce à un module de décision qui estimera le symbole le plus probable compte tenu de la constellation choisie.

### A.3. L'égalisation fréquentielle :

Si on note  $s'(t)$  le signal OFDM émis avec le préfixe cyclique,  $r'(t)$  le signal reçu,  $h(t)$  la réponse impulsionnelle du canal et  $n(t)$  le bruit du canal, on peut alors écrire, si  $\otimes$  désigne la convolution :

$$r'(t) = h(t) \otimes s'(t) + n(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} s'(\tau) h(t - \tau) d\tau + n(t)$$

Si  $R'(f), H(f), S'(f)$  et  $N(f)$  sont respectivement les transformées de Fourier de  $r'(t), h(t), s'(t)$  et  $n(t)$ , alors l'expression précédente devient dans le domaine fréquentiel:

$$R'(f) = H(f) \cdot S'(f) + N(f)$$

Ces équations appliquées aux signaux continus restent valables pour des signaux discrets si d'une part, le nombre de symboles sur lesquels s'effectue la transformée de Fourier discrète est suffisamment important et si, d'autre part, un des deux signaux convolués est périodique pour que la convolution temporelle des signaux soit circulaire, cette dernière condition est vérifiée grâce à l'introduction du préfixe cyclique,

Comme on suppose que les interférences ont été parfaitement annulées grâce à l'insertion du préfixe cyclique, le symbole OFDM reçu après l'opération de FFT,  $Y_{t,k}$ , correspondant au symbole émis  $D_{t,k}$  de la sous porteuse  $k$  et de la trame  $t$ , est donné par la relation suivante :

$$Y_{t,k} = H_k D_{t,k} + N_{t,k}$$

$H_k$  est la réponse fréquentielle de la  $k^{\text{ième}}$  sous bande et  $N_{t,k}$  un échantillon de bruit, Pour corriger les déformations du signal introduites par le canal, et donc pour retrouver  $D_{t,k}$ , on introduit derrière le module FFT, un égaliseur formé par  $N$  multiplieurs dont les coefficients peuvent être obtenus lors d'une séquence d'entraînement.

La solution la plus simple, pour estimer  $H_k$ , est d'émettre une séquence d'initialisation constituée de  $N_T$  trames OFDM connues du récepteur, Le module d'estimation calcule pour chaque sous porteuse  $k$ , une valeur moyenne de  $H_k$ , notée  $\hat{H}_k$  estimée sur  $N_T$  trames afin de réduire l'influence du bruit et tel que :

$$\hat{H}_k = \frac{1}{N_T} \sum_{t=1}^{N_T} \frac{Y_{t,k}}{D_{t,k}}$$

Si l'égaliseur est celui basé sur le critère naturel de forçage à zéro ; il se réduit à un filtre inverse de la fonction de transfert, dont les coefficients  $C_k$  sont donnés par la relation :

$$C_k = \frac{1}{\hat{H}_k} \text{ avec } 1 \leq k \leq N$$

#### A.4. La chaîne de transmission :

Le synoptique de la *figure A.13* illustre les différents traitements numériques qui ont été exposés précédemment et présente donc les modules de la chaîne de transmission OFDM. Le codeur  $M$ -QAM transforme les données binaires  $\{e\}_{1..R}$  de durée  $T_b$ , donc au débit  $\Gamma_b = 1/T_b$ , en un symbole complexe  $D_k$  au débit  $\Gamma_b/R$ , on rappelle que  $M=2^R$ .

Un convertisseur série parallèle dispose ces symboles  $D_k$  en trame noté  $\{D\}_{1..N}$ , une trame supportant un débit  $\Gamma_b/(RN)$ , En appliquant ensuite une transformée de Fourier inverse, on obtient la trame parallèle OFDM de  $N$  symboles  $s_n$ , notée  $\{s\}_{1..N}$ , un préfixe cyclique copie des  $L$  derniers symboles, est ensuite ajouté au début de la trame, après conversion parallèle série on obtient enfin la trame OFDM, qui comprendra  $N+L$  symboles au débit :  $(N+L)/(T_b RN)$ .

A la réception, les opérations inverses sont réalisées. On notera  $\{r'\}$  l'ensemble des symboles à l'entrée du récepteur,  $\{r\}$  celui des  $N$  symboles  $r_n$  après suppression du préfixe cyclique, de plus :  $Y_k, X_k, \bar{X}_k$  et  $e'_m$  sont les symboles issus des modules respectivement de la

FFT, de l'égalisation, de la décision et du décodage QAM. On supposera que la synchronisation est idéale.

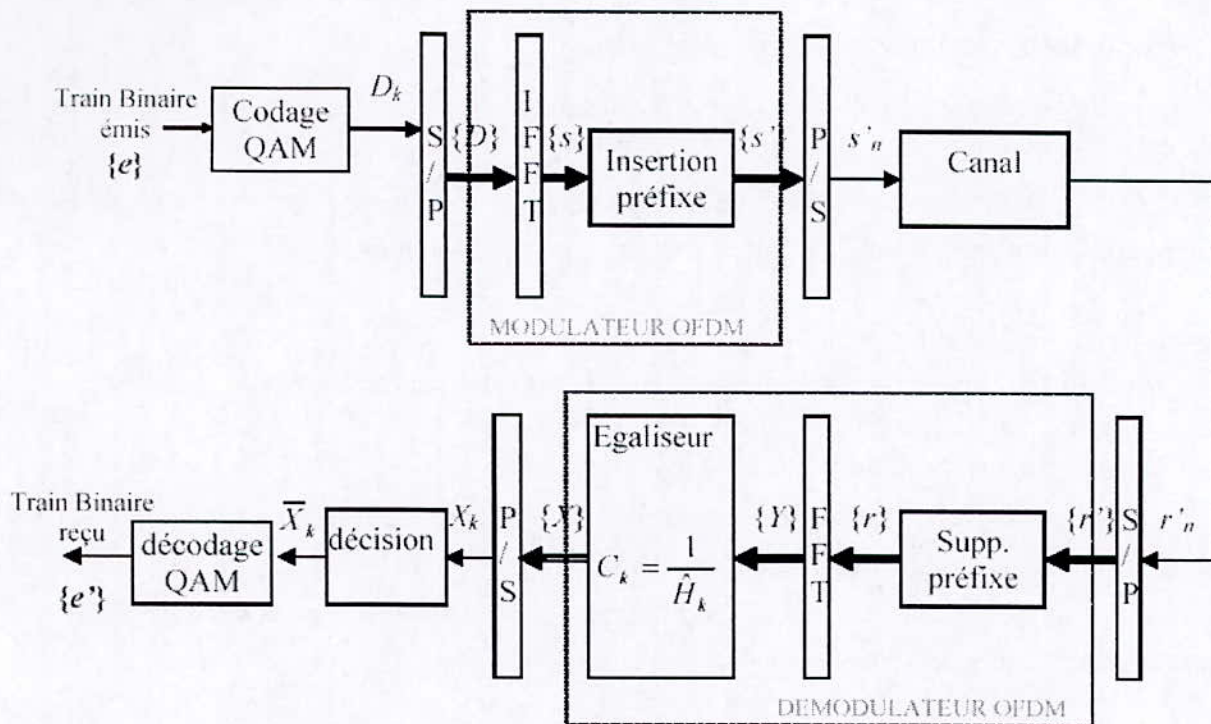


Figure A.1 Modules de la chaîne de transmission OFDM.

## B. Principaux composants d'un adaptateur :

Dans un adaptateur, on distingue 7 différentes parties:

### *Le transcepteur :*

Décide quand le PC peut émettre, il crypte les informations et les encode dans une forme adaptée à leur transmission et définit ce qui sera émis sur chaque porteuse.

### *Le convertisseur de signaux :*

Il déforme chaque porteuse en fonction des commandes du transcepteur.

### *Les circuits d'interface (coupleur):*

Ils injectent les signaux modulés sur la ligne électrique. En réception, ils extraient les signaux de la ligne dont les fréquences sont comprises entre 9 kHz et 30 MHz. C'est le convertisseur qui transforme les signaux d'une forme sinusoïdale en une forme BDB qui seront décodées et décryptées par le transcepteur.

### *Le quartz :*

Il rythme la modulation haute fréquence. Une mémoire EPROM contient les paramètres de configuration.

### *Circuit d'interface USB 79 ou Ethernet*

### *Transformateur électrique :*

Pour le cas où on a une interface Ethernet ce qui permet d'alimenter l'adaptateur en énergie.

### C. Exemple d'un réseau PLC OUTDOOR :

L'organisation AMBIENTCORP a proposé en 2003 un système bypass qui résout la majorité des problèmes rencontrés au niveau du passage moyenne basse tension , pour cela on aura besoin des équipements suivants :

- Nœud-S de la sous station Il est utilisé pour relier le réseau PLC aux réseaux fournisseurs de service, tels que Internet, le réseau téléphonique public commuté (PSTN) ...etc. Dans le cas typique, il est installé dans la sous-station de la MT. Cependant, il peut également être installé ailleurs sur le réseau électrique où la connexion au fournisseur de service est exigée ou souhaitable.
- Les répéteurs nœud-R ;
- Au transformateur MT/BT nœud-X Il transfère les données entre la ligne MT et les lignes BT, et/ou sert de répéteur sur la ligne MT. Il a une conception modulaire et loge dans une clôture appropriée qui peut être exposée à l'environnement externe et à ses éléments.
- Dans la maison du client par un équipement de passage nœud GW, Il sert de raccordement entre le réseau PLC et le client. Ce nœud contient une interface PLC, qui est d'une part reliée à la ligne BT, et d'autre part par l'intermédiaire d'une prise électrique standard, à une sortie à l'intérieur de la maison.

#### ***Le transformateur bypass :***

Les transformateurs de distribution atténuent de manière significative la majorité du spectre des signaux. La conception d'un chemin qui dévie le transformateur MT/BT permet de faire passer les signaux PLC à travers tout le réseau MT et BT jusqu'aux clients . Cependant, c'est impératif que ce chemin se limite seulement au signal PLC et ne fasse pas passer les 50Hz du secteur. Le chemin qui dévie le transformateur se compose d'un coupleur inductif sur la MT, d'un nœud X et d'un coupleur BT qui peut être inductif ou capacitif selon la topologie du réseau de distribution.

Le coupleur du réseau MT est semblable à un transformateur de courant à une seule spire où la ligne du réseau MT est un enroulement et le fil de signal est l'autre enroulement.. Le logement cylindrique du coupleur est dédoublé et articulé pour lui permettre d'être maintenu sur le câble MT adjacent à l'isolateur de ligne, qui est placé sur un poteau électrique. Le coupleur a été testé pour une classe de tension de 15 KV. La réponse fréquentielle est appropriée aux signaux de communication à grande vitesse dans la gamme de



2-50 MHz. La conception d'un bloc supérieur dans le coupleur lui permet également d'être installé sur une ligne en pleine conduction, simplifiant l'installation et réduisant le temps d'installation.

Le nœud X est monté dans la zone des communications sur le poteau et est alimentée par le circuit secondaire de 230 V. Une batterie de secours rechargeable opérant durant plusieurs heures est également installée. Deux câbles coaxiaux le relie aux câbles MT et BT.

Le coupleur inductif BT a également une conception de bloc supérieur et est attaché fermé. Les coupleurs capacitifs BT ont de meilleures performances.

# *Bibliographie*

[DEG\_02]

V. Dégardin, « Analyse de faisabilité d'une transmission de donnée haut débit sur un réseau basse tension »

Thèse de Doctorat. Université des Sciences et Technologie de Lille, 2002.

[HIL\_56]

McGraw. Hill « Electrical and Electronic Engineering Series : Electric Transmission Lines »  
Frederick Emmons Terman Editor, 1956.

[HIN\_00]

D.Hines, J.Dickinson, P. Nicholson, R.Lehnert, R.Hrasnica, A.Haidine, M.Stantcheva,  
M. Langhof, U.Leicht « PLC technology Inventory and Development Roadmap »  
Publication, Juin 2000.

[HRA\_02]

H. Hrasnica « performance analysis of error handling methods applied to broadband PLC access network »

Chair on Telecommunications, Dersden University of Technology D-01062 Dresden, Germany, 2002.

[KRA\_03]

P. Krähenbühl «Appréciation du pouvoir perturbateur des installations PLC à Fribourg »  
OFCOM, fribourg, 2003.

[PUJ\_00]

G. Pujol « Les Réseaux »  
Livre, 2<sup>ème</sup> Ed. Eyrolles, 2000.

[SAK\_03]

A. Sakai « Internet Service over Power Lines in Japan : Costs and Policy Implications »  
Master of Science in Technology and Policy. Massachusets Institue of Technology. Jiun 2003.

[SAR\_04]

T. Sartenaer « Multiuser communications over frequency selective wired channels and applications o the powerline access network »

Thèse de doctorat, Laboratoire de Télécommunication et Télédétection UCL, Belgique  
Septembre 2004.

[STA\_00]

M. Stancheva, K. Begain, H. Hrasnica, R. Lehnert « Suitable MAC Protocols for an OFDM Based PLC Network »

Chair for Telecommunications. Dresden University of Technology 01062 Dresden, Germany. 2002.

[ZIM\_98]

**M. Zimmermann, K. Dostert** «A Multi-path Signal Propagation Model for the power Line Channel in the High Frequency Range ».

**Institute of Industrial Information Systems. University of Karlsruhe, Germany, 1998.**

[ZUB\_03]

**K. Zuberi** « Power Carrier (PLC) Communication Systems»

**Master of Science in Internetworking- MS Thesis. Department of Microelectronics and Information Technology, IMIT Royal Institute of Technology, KTH It-Universitetet, Kista, Stockholm, Sweden. 9 Septembre 2003.**

[ABB\_05]

[www.ABB.ch](http://www.ABB.ch)

[ECH\_04]

[www.Echelon.com](http://www.Echelon.com)

[NOR\_02]

[www.NOR.WEB.com](http://www.NOR.WEB.com)

[www.amperion.com](http://www.amperion.com)

[www.ambientcorp.com](http://www.ambientcorp.com)

[www.isplc2005.com](http://www.isplc2005.com)

[www.ascom.com](http://www.ascom.com)

[www.main.net](http://www.main.net)

## RÉSUMÉ :

Ce travail est consacré à l'analyse d'un réseau de communication ayant comme support le réseau électrique en basse et moyenne tension. Ce mémoire traite en premier des généralités sur les réseaux informatiques et l'architecture OSI et cite les caractéristiques du réseau électriques en haute fréquence. La technologie PLC est présentée par les techniques de modulation OFDM et SS, les protocoles d'accès de la couche MAC et les méthodes de corrections d'erreur, ainsi que les types des réseaux PLC. On propose une installation d'un réseau de communication sur le réseau moyenne tension de Bouzaréah. L'installation comprend l'aspect physique et logiciel.

### Mots Clés :

Architecture OSI, Atténuation, Couche physique, Haute fréquence, Modulation, Multi trajet, Poste transformateur, Protocole, Réseau électrique, Réseau informatique, Réflexion, Répéteur, Transmission de donnée.

## ABSTRACT :

This work is devoted to the analysis of a communication network based on power lines, of low and medium voltage electrical network. In first, we present informatics networks and OSI structure. We discuss the power lines characteristics in high frequency range. PLC technology is presented by its modulation techniques : OFDM and SS, MAC layer access protocols and error handling methods, and PLC networks types. Finally we propose to establish a communication network on Bouzaréah medium voltage network. The installation comprises physical and software aspects.

### Key Words:

OSI Structure, Attenuation, Physical layer, High frequency, Modulation, Multi path, Transformer station, Protocol, Power line, Communication network , Reflexion, Repeater Data transmission

### ملخص:

هذا العمل يهدف لدراسة شبكة الاتصالات لها كقاعدة شبكة الرسائل الكهربائية ذات التوتر المنخفض و المتوسط ، هذه المذكرة تحتوي على أربعة فصول ، الفصل الأول يدرس فيه عموميات على الشبكات المعلوماتية و البنية OSI . في الفصل الثاني يدرس مميزات الشبكة الكهربائية في التواترات المرتفعة ، في الفصل الثالث نعرض التكنولوجيا PLC بتقنيات تشكيل الأمواج OFDM و SS و بروتوكولات حق المرور في الطبقة MAC و طرق تصحيح الأخطاء و أنواع شبكات PLC ، في الفصل الرابع نقترح تشكيل شبكة على الشبكة الكهربائية المتوسطة التوتر في بوزريعة ، الاقتراح يحوي المظهر الفيزيائي و اللوجستيكي.

### كلمات مفتاحية

البنية OSI، الانخفاض، الطبقة الفيزيائية، التواترات، لمرتفعة، تضمين الأمواج، متعدد الطرق، مركز المحول الكهربائي، بروتوكول، الشبكة لكهربائية، الشبكة المعلوماتية، الإنعكاس، المضخم، بعث المعلومات