REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI

TIZI-OUZOU

FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET DE L'INFORMATIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER ACADEMIQUE

OPTION: TELECOMMUNICATIONS ET RESEAUX

THÈME

ETUDE DE CANAL DE TRANSMISSION POUR LES LIAISONS FHN ET SATELLITAIRE EXPLOITÈES DANS LES RESEAUX MOBILES CAS : OTA (DJEZZY)

Proposé et dirigé par :

M^r^ M.TAHANOUT

Co-Promoteur A. BOUZIDI

Présenté par :

M^elle^ LEKKAM Dahbia

M^elle^ BOUARABA Meriem

Promotion : 2012/2013

REMERCIEMENTS

D'abord, nous tenons à remercier le bon dieu de nous avoir accordée la force et le courage de munir à terme ce mémoire.

Ensuite Nous remercions notre encadreur ***Mr M .TAHANOUT*** *enseignant à l'université De Tizi Ouzou, pour les efforts qu'il a déployé.*

Nous voudrions adresser nos vifs remerciements aux personnels de la transmission d'ORASCOM TELECOM ALGERIE notamment: Mr M.R.ACHIR, Mr R.ANSER, Mr A.BOUZIDI, Mr .R.BELHADJ, Mr M.L.MOUHEB, Mme N.DRIR, Mr A.Dj, Mr S.SMAIL pour leurs suivis, leurs attentions et leurs disponibilités permanentes.

Nos sincères remerciements s'adressent à ***Mr. A.ARKOUB*** *pour sa précieuse aide qu'il nous a prodiguées.*

Nos remerciement vont également au président et aux membres du jury qui nous ferons l'honneur d'évaluer notre modeste travail, ainsi qu'à tous les enseignants qui ont contribué a notre formation.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué à faciliter la tâche de notre travail, en prodiguant généralement leur aide accompagnée de sympathie et d'encouragements trouvent ici l'expression de notre sincère gratitude.

Dédicace

A la mémoire de ma mère FAHIMA.

A mon cher père et cher belle mère NACIRA pour Leur soutien durant toutes mes études j'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour.

A mes grands parents.

A chaque cousin et cousine.

A mes tantes et oncles.

A toute ma famille.

A ma chère binôme KAHINA et sa famille.

A mes amies.

A HAMZA.

A tous ceux qui m'aiment, qu'on cru en moi et m'ont nourri de leur amour et leur tendresse.

MERIEM

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à:

- *Deux âmes les plus chères au monde mon père et ma mère.*
- *Mes chers frères :*

Yousef ; Hassene ; Madjid ; Arezki

mes chères sœurs :

Sabrina ; Wiza et ces enfants : Gilasse, , Kahina , Tassaditte,

- *Mes chères cousins*
- *Toute la famille.*
- *Mes amies : Nouara .H ; Lydia .O ; Kahina .H ; zahia .K*
- *Ma cher binôme Meriem ,son père et sa belle mère.*
- *Toute la promotion 2013.*

Dahbia

Sommaire

Listes des figures

Liste des tableaux

Introduction générale 1

Chapitre I : Etude général sur les réseaux mobiles

I.1.Introduction 4

I. 2. La téléphonie 4

I. 3. Définition de la mobilité sans fil 5

I.3.1. Architecture cellulaire 5

I. 4. Définition des standards GSM (2G) et GPRS (2.5G) 6

I.4.1. Définition de standard GSM (2G) 7

I.4.1.1. Le concept cellulaire en GSM 7

I.4.1.2. Présentation de l'architecture générale du réseau GSM 8

I.4.1.2.1.Le sous-système radio BSS (base station sub-système 10

I.4.1.2.2. Le sous-système réseau NSS (Network sub-Système) 11

I.4.1.2.3. Le sous-système opérationnel OSS (Operating Sub-System) 13

I.4.1.3. Les fréquences utilisées 14

I .4.1.4.Le canal de transmission 14

I.4.1.5.La transmission de données en GSM 15

I .4 .2 .Définition de standard GPRS (2.5G) 16

I .4.2.1- Présentation de l'architecture générale du réseau GPRS 16

I.4.2.2.Les interfaces nécessaires pour interconnecter les équipements 18

I.4.2.3.Principales caractéristiques du GPRS 19

I.5. Supports courants de transmission 21

I.5.1. Liaisons filaires 21

I.5.1.1. Paires torsadées 21
I.5.1.2.Câbles coaxiaux 22
I.5.2. Liaison optique 23
I.5.3. Liaisons sans fil 24
I.5.3.1. Faisceaux hertziens 24
I.5.3.2. Les satellites 24
I.6. Caractéristiques globales des supports de transmission 25
I.7. Conclusion 28

Chapitre II: Etude d'une liaison FHN point à point

II.1. Introduction 29
II.2. Propagation des ondes radioélectriques 29
II.2.1.Caractéristiques 30
II.2.2. La gestion du spectre électromagnétique 31
II.2.3.Les équations de Maxwell dans le vide 32
II.2.3.1.Relations constitutives dans le vide 33
II.2.4. L'onde plane 35
II.2.5. Aspect énergétique 36
II.2.6.Polarisation des ondes planes 37
II.2.6.1.Polarisation rectiligne 37
II.2.6.2. Polarisation elliptique 38
II.2.6.3. Polarisation circulaire 38
II.3.La propagation dans l'environnement terrestre 39

II.3.1.Atmosphère terrestre 40
II.3.1.1.Les différentes couches de l'atmosphère terrestre 40
II.3.2 Les types de propagation 42
II.3.2.1 La propagation troposphérique 42
II.3.2.1.1.La contrainte de la propagation troposphérique 42
II.3.2.2.Propagation par onde de surface ou de sol 44
II.4.Transmission par faisceaux hertziens 45
II.4.1.Définition 45
II.4.2.Principe d'un faisceau hertzien 45
II.4.3.Affectation des fréquences dans les faisceaux hertziens 46
II.4.4.Propagation en visibilité 49
II.4.5.Ellipsoïdes zone de Fresnel 49
II.4.6.Les facteurs pouvant affecter la propagation 52
II.4.6.1.Réfraction atmosphérique 52
II.4.6.2.Dégagement/ diffraction 53
II.4.6.3.Réflexion, trajets multiples 53
II.4.7. Atténuation des ondes dans l'atmosphère 54
II.5.Bilan de liaison des faisceaux hertziens 57
II.5.1.Disponibilité 61
II.5.2.Seuils 62
II.6. Sensibilité d'un récepteur 62
II.7.Les antennes 63
II.7.1.Définition 63
II.7.2.Antenne isotrope 63
II.7.3.Les principaux caractéristiques d'une antenne 64

II.7.4.Antenne parabolique 67
II.8.Types de modulations 71
II.8.1.La modulation d'amplitude ou ASK 71
II.8.2.La modulation de fréquence ou FSK 72
II.8. 3.La modulation de phase ou PSK 72
II.8.4.Modulation QAM 73
II.9. Multiplexages 74
II.9.1.Multiplexage PDH 74
II.9.2. Limitation de la PDH 75
II.9.2.La modulation d'impulsions codées (MIC) 75
II.9.2.1.Échantillonnage 76
II.9.2.2.Quantification 76
II.9.2.3.Compression 77
II.9.2.4.Codage 78
II.9.3.Structure de trame MIC 79
II.9.3.1.Trame primaire et l'intervalle temporel (IT) 79
II.9.4.Multiplexage SDH 81
II.10.Conclusion 82

Chapitre III: La téléphonie mobile par satellite

III.1 Introduction 83
III.2 Principes de fonctionnement des satellites 83
III 2.2. Les VSAT (Very Small Aperture Terminal) 84
III.2.2.1 Architecture des Réseaux VSATs 84
III.2.2.1.1 Architecture Maillée 84
III.2.2.1.2 Architecture en Étoile 85
III.2.2.2 Fonctionnement des VSATs 86
III.2.2.3 Les applications 86

III.2.3 les bandes de fréquences utiliser par les satellites 87
III.3.Les constellations de satellites..... 89
III.3.1. Intérêts des constellations..... 89
III.3.1.1 Constellations Basse Orbite (LEO) 90
III.3.1.2 Constellations moyenne orbite (MEO) 91
III.3.1.3 Constellation GEO..... 91
III.4 Fonction utiles des différents modules..... 93
III 4.1 La couverture par satellites..... 95
III.4. 2 La téléphonie mobile par satellite..... 96
III.4.2.1 Le réseau INMARSAT..... 96
III.4.2.2 Le réseau THURAYA..... 96
III.4.2.3 Le réseauGlobalstar..... 97
III.4.2.4 Le réseau Iridium 98
III.4.2.5 Le réseau ICO (IntermediateCircularOrbits) 99
III.4.2.6 Le réseau Ellipso..... 100
III.4.2.7 ECCO..... 100
III.4.2.8 Intelsat..... 101
III.4.2.9 Teledesic..... 101
III.5 Les techniques utilisées pour les transmissions 102
III.5.1 La technique des modes de liaisons 103
III.5.2 La technique de la transmission des signaux en bande de base..... 103
III.5.3 La technique des signaux radioélectriques 103
III.5.4 La technique de multiplexage..... 104
III.5.5 La technique de modulation..... 105
III.5.6 La technique de codage 106
III.6 La localisation par satellite..... 106
III.6.1 Le GPS..... 106
III.6.1.1 Principes de fonctionnement..... 106
III.6.1.3Les applications..... 107
III. 7. Bilan de liaison..... 108

III 7.1 Bilan de liaison montant 108
III. 7.2 Amplification satellite 109
III.7.3 Bilan de liaison descendant 110
III.7.4 Bilan global 111
III.8 Conclusion 112

Chapitre IV: Acquisition et analyse de données

IV.1.Introduction 113
IV.2. Description de la liaison FHN 114
IV .2.1. Présentation des données116
IV .2.1. 1. Caractéristiques de la liaison FHN 116
IV.2.1.2. Caractéristiques de la liaison Satellite (Eutelsat) 117
IV.2.1.2.1. Liaison montante (Dar El beida) 118
IV.2.1.2.2. Liaison descendante (bouzareah) 118
IV.2.1.2.3. Répéteur 119
IV.2.1.3. Analyse de l'affaiblissement du à la pluie 120
IV.2.1.4. Analyse de marges de liaison en ciel clair 121
IV.2.1.5. Dimensionnement préliminaire de la station d'émission VSAT dar El Baida 122
IV.2.1.6. dimensionnement préliminaire de la station de réception (HUB de Bouzareah) 122
IV.3. Interprétation des résultats pour la liaison FHN : cas de la liaison khoubna à Edaouia 123
IV.3.1. Représentation des données Tx pour les sites A et B 123
IV.3.3. Représentation Rx pour le site A et B 127

IV.3.5. Représentation de l'atténuation intermédiaire en sites A et B 132

IV.3.7. Représentation de l'atténuation totale en sites A et B 136

IV.4. Interprétation des résultats pour la liaison satellitaire: cas de la liaison (Dar El Beida à Bouzaréah) 140

IV.4. 1. Représentation Tx pour la liaison montante (VSAT vers satellite)..... 140

IV.4. 2. Représentation de Rx pour la liaison descendante (satellite vers le HUB) . 141

IV.4.3. Représentation de l'atténuation intermédiaire..... 142

IV.4.4. Représentation de l'atténuation totale..... 143

IV.5. Conclusion..... 145

Conclusion Générale..... 146

Glossaire

Annexes

Références Bibliographiques

Liste des figures :

Figure I.1. Structure hiérarchique des cellules.....6

Figure I.2.Structure cellulaire du réseau GSM.....8

Figure I.3. Architecture du réseau GSM.....9

Figure I.4.Canal de transmission GSM.....15

Figure I.5. Architecture d'un réseau GPRS.....17

Figure I.6.Câbles à paires torsadées.....18

Figure I.7. Constitution d'un câble coaxial.....19

Figure I.8. Les composants de la fibre optique.....23

Figure I.9. Antenne parabolique d'un faisceau hertzien.....24

Figure I.10. Satellite de communication.....25

Figure I.11. Notion de bande passante.....26

Figure I.12.1. Exemple d'un signal émis.....27

Figure I.12.2. Exemple d'un signal reçu.....27

Figure II.1.Propagation des ondes électromagnétiques.....30

Figure II.2.La gestion du spectre électromagnétique.....31

Figure II.3.Représentation d'une onde plane.....35

Figure II.4.Polarisation rectiligne.....38

Figure II.5. Polarisation circulaire.....39

Figure II.6.Propagation des OEM dans l'environnement terrestre.....40

Figure II.7.Couches atmosphériques.....42

Figure II.8. Portée d'une transmission troposphérique.....43

Figure II.9. Utilisation d'un seul couple de fréquences.....46

Figure II.10. Canal émission commun aux deux sens dans une station.....47

Figure II.11. Réduction des brouillages.....47

Figure II.12. Séparation des demi-bandes émission/réception.....48
Figure II.13. Alternance des polarisations verticale et horizontale.....48
Figure II.14.Dégagement de la ligne de visibilité.....49
Figure II.15.L'ellipsoïde de Fresnel.....50
Figure II.16. Indice de réfraction réduit N mesurée en basse atmosphère.....52
Figure II.17. Propagation par diffraction et trajets multiples.....54
Figure II.18. Affaiblissement linéique dû aux gaz de l'atmosphère.....55
Figure II.19 .Affaiblissement linéique dû à la pluie en fonction de la fréquence pour différents taux de précipitation (UIT-R P. 838).....56
Figure II.20. Schéma illustratif des différentes pertes.....58
Figure II.21. Antenne isotrope.....64
Figure II.22. Gain d'une antenne.....64
Figure II.23. Champ de fort gain d'une antenne.....65
Figure II.24. Le diagramme de rayonnement.....66
Figure II.25. Plan de vibration électrique.....67
Figure II.26. Antenne parabolique.....68
Figure II.27. Géométrie d'une antenne parabolique.....69
Figure II.28. Modulation d'amplitude ou ASK.....71
Figure II.29. Modulation de fréquence ou FSK.....72
Figure II.30. Modulation de phase ou PSK.....72
Figure II.31. Les combinaisons d'amplitude et de phases.....73
Figure II.32. Exemple de constellation QAM8 (3 bits par baud).....74
Figure II.33. Synoptique général de la modulation MIC.....76
Figure II.34. La loi européenne A.....77
Figure II.35. Codage HDB3.....79

Figure II .36. Structure d'une trame MIC.....80

Figure III .1. Architecture maillée.....84

Figure III .2. Architecture en étoile.....85

Figure III.3 constellation GEO.....91

Figure III.4. les différents orbites de satellites.....93

Figure III. 5. La couverture par satellite 95

Figure III .6.téléphonie mobile par l'organisation Inmarsat.....96

Figure III.7. Couverture et exemple de terminal (Thuraya XT).....97

Figure III.8. constellation des réseau iridium.....99

Figure III. 9. Multiplexage en fréquence FDM 104

Figure III. 10. Multiplexage temporel TDM.....104

Figure III .11 . la représentation de système GPS.....107

Figure III.12 . représentation d'une liaison satellite.....108

Figure VI.1. Map géographique présente la localisation de la liaison El khoubna, Edaouia.....113

Figure IV.2. Représentation de Tx en Cs en fonction du temps..... .123

Figure IV.3. Représentation de Tx en CLD en fonction du temps……..124

Figure IV.4. Représentation de Tx en R en fonction du temps……..…124

Figure IV.5. Représentation de Tx en Cs en fonction du temps……..125

Figure IV.6. Représentation de Tx en CLD en fonction du temps……..125

Figure IV.7. Représentation de Tx en R en fonction du temps……126

Figure IV.8. Représentation de Rx en Cs en fonction du temps……..128

Figure IV.9. Représentation de Rx en CLD en fonction du temps……..128

Figure IV.10. Représentation de Rx en R en fonction du temps……129

Figure IV.11. Représentation de Rx en Cs en fonction du temps……..129

Figure IV.12. Représentation de Rx en CLD en fonction du temps……..130

Figure IV.13. Représentation de Rx en Rine en fonction du temps……..130

Figure IV.14. Représentation de l'atténuation α_{int} Cs en fonction du temps…..132

Figure IV.15. Représentation de l'atténuation α_{int} CLD en fonction du temps……133

Figure IV.16. Représentation de l'atténuation α_{int} en R en fonction du temps……133

Figure IV.17. Représentation de l'atténuation α_{int} Cs en fonction du temps……134

Figure IV.18. Représente l'atténuation α_{int} CLD en fonction du temps……134

Figure IV.19. Représentation de l'atténuation α_{int} R en fonction du temps……135

Figure IV.20. Représentation de l'atténuation α_{tot} R en fonction du temps……137

Figure IV.21. Représentation de l'atténuation α_{tot} en R en fonction du temps……137

Figure IV.22. Représentation de l'atténuation α_{tot} en CLD en fonction du temps……138

Figure IV.23. Représentation de l'atténuation α_{tot} en CLD en fonction du temps……139

Figure . IV.24. Représentation de Tx en Cs, CLD, R en fonction du temps……140

Figure . IV.25. Représentation de Rx en Cs, CLD, R en fonction du temps……141

Figure IV.26. Représentation de l'atténuation α_{int} en Cs, CLD, R en fonction du temps……143

Figure . IV.27. Représentation de l'atténuation $\alpha_{tot(dB)}$ en fonction du temps….144

Tableau II .1. Atténuation due à la pluie.....56

Tableau III .1: comparaison entre les bandes C et Ku de VSAT.....87

Tableau III.2. Utilisation des bandes de satellite.....89

tableau III. 3. La comparaison entre les caractéristiques LEO,MEO,GEO.....92

Tableau III 4 : Efficacité spectrale des modulations BPSK et QPSK.....105

INTRODUCTION GENERALE:

Le progrès et les avancées technologiques réalisés ces dernières années dans le domaine de la télécommunication est une réalité qui n'est plus à démontrer. En effet, Les réseaux de télécommunication offrent un nombre de services très important aux usagers et permettent de simplifier les activités de communications, de transactions commerciales, d'accès aux services internet ou particuliers tel que les services médicaux à distance ou simplement d'information. Par ailleurs, les réseaux mobile offrent une plus grande flexibilité pour les usagers et assurent une connectivité constante dans le domaine de couverture de ces réseaux. Pour mettre à la disposition des usagers de meilleurs services, les télécommunications mobiles utilisent des équipements de plus en plus complexes et performants.

L'histoire de la téléphonie mobile (numérique) débute réellement en 1982. En 1987, le groupe GSM a fixé des choix technologiques relatifs à l'usage des télécommunications mobiles : transmission numérique, multiplexage temporel des canaux radio, chiffrement des informations ainsi qu'un nouveau codage de la parole. Aujourd'hui, le nombre de numéros attribués pour des communications GSM dépasse largement le nombre de numéros dédiés à des lignes fixes et cette tendance est en progression continue. Comme le réseau GSM ne convenait guère pour la transmission de données, les évolutions récentes ont visé à accroître la capacité des réseaux en termes de débit et élargir les fonctionnalités. Pour dépasser la borne GSM de 13 kb/s, qui est le débit nominal d'un canal téléphonique basculé en mode de transmission de données, l'ETSI a défini un nouveau service de données en mode paquet qu'est le General Packet Radio Service (GPRS) qui permet l'envoi de données à un débit de 171.2 kb/s par mise en commun de plusieurs canaux. Afin de combiner au réseau déjà existant GSM et GPRS nous introduisons un nouveau réseau qui est l'UMTS qui offre un débit de 384 Kbit /s et apporte des fonctionnalités multimédia avancées.

Avec l'évolution aussi importante de services et usagers des réseaux mobiles, le débit de données à transporter est très important. C'est pourquoi, on utilise des supports de transmission de haut débit, tels que la fibre optique, câbles coaxiaux, câble Ethernet large bande, etc. Toutefois, pour les liaisons dans les régions difficiles d'accès ou isolées, l'installation de ce type de support présente des contraintes techniques et financières supplémentaires. Aussi, on utilise les liaisons Faisceau Hertzien (FH) adaptées au transport de données haut débit. Ce type de liaisons offre de grandes capacités de débit, allant de 2Mb/s à 2 Gb/s et s'adapte aux besoins de chacun. Une liaison FH exploite le support d'ondes radioélectriques, par des fréquences porteuses allant de 1 GHz à 40 GHz, focalisées et concentrées grâce à des antennes directives. Néanmoins la liaison FH, étant considérée une liaison point à point, est limitée par la ligne de l'horizon à 40 km. Dans ce cas, on préfère utiliser une liaison satellitaire qui assure une plus grande portée et un débit allant jusqu'à 64Mb/s. Ces deux types de liaisons utilisent l'atmosphère comme canal de transmission. Généralement, lorsqu'un phénomène météorologique se produit ce canal est sévèrement perturbé.

Notre travail consiste à l'étude du canal de transmission des liaisons FH et satellitaires et évaluer par mesure de signal les perturbations qui agissent sur son bon fonctionnement. Pour ce faire, une partie de notre travail a été effectuée au sein de l'entreprise ORASCOM Telecom pour l'acquisition des données relatives aux liaisons FH et satellitaires. Une deuxième étape est l'analyse de ces données afin de déterminer les paramètres et marges du canal pour assurer une bonne liaison FH ou satellitaire pour le réseau de télécommunications mobile.

Pour une meilleure présentation de ce travail nous avons décomposé le présent mémoire en quatre chapitres. Dans le premier chapitre, nous présentons la téléphonie mobile par le réseau GSM et GPRS. Puis, des bases fondamentales liées aux supports de transmission sont abordées. Le deuxième chapitre est consacré à l'étude d'une liaison FH numérique et ses caractéristiques tels que les bandes de fréquence utilisées, l'étude de la visibilité directe ainsi que le bilan de liaison. Le

chapitre trois est dédié pour les systèmes de satellites utilisés en téléphonie mobile. Enfin le dernier chapitre présente la partie pratique qui est réalisée sur site. Une analyse d'un ensemble de données concernant des liaisons FH et satellitaire est montrée dans ce chapitre.

I.1. Introduction

Les systèmes de communication mobile fournissent aujourd'hui en tout lieu une gamme de services très variée ainsi la mobilité dans les réseaux de communication est définie comme la capacité d'accéder, à partir de n'importe où, à l'ensemble des services disponibles normalement dans un environnement fixe et câblé. Tandis que l'informatique mobile est définie comme la possibilité pour des usagers munis de périphériques portables ou d'ordinateurs mobiles d'accéder à des services et à des applications évoluées, à travers une infrastructure partagée de réseau, indépendamment de la localisation physique ou du mouvement de ces usagers.

I. 2. La téléphonie

La téléphonie est un système de télécommunication qui a pour but de la transmission de son et en particulier la transmission de la parole. La téléphonie permet des services plus avancés tels que la messagerie vocale, la conférence téléphonique et d'autres services vocaux.

Un réseau téléphonique est constitué de trois types d'équipements principaux :

- Les terminaux (téléphone, répondeur, modem, fax, serveurs);
- Les systèmes centraux (central téléphonique ou commutateur téléphonique);
- Les liaisons entre différents équipements, tels que les câbles de téléphone (cuivre ou fibre optique) ou les antennes de téléphone mobile.

I. 3. Définition de la mobilité sans fil

Les termes mobile et sans fil sont souvent utilisés pour décrire les systèmes de communication sans fil existants, il est important de distinguer les deux catégories de réseaux.

Dans les réseaux sans fil, le support de communication utilise l'interface radio : sans cordon, GSM, GPRS, UMTS…

Un utilisateur mobile est défini théoriquement comme un utilisateur capable de communiquer à l'extérieur de son réseau d'abonnement tout en conservant une même adresse. Le système sans cordon est un système sans fil mais il n'est pas mobile.

- Certains systèmes tel que le GSM offrent la mobilité et le sans fil simultanément.

I.3.1. Architecture cellulaire

Dans un réseau cellulaire, le territoire couvert ou la zone de couverture desservie est généralement découpée en petites surfaces géographiquement limitées et communément appelées cellules.

- **Picocellule:** désigne un espace de desserte de quelques mètres de diamètres.
- **Microcellule:** réfère à une surface géographique de quelques dizaines de mètres de diamètre;
- **Cellule:** correspond à une superficie dont le diamètre varie de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres;
- **Macrocellule :** correspond à une étendue géographique de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres de diamètre;
- **Cellule parapluie :** définit une région de quelques centaines de kilomètres de diamètre.

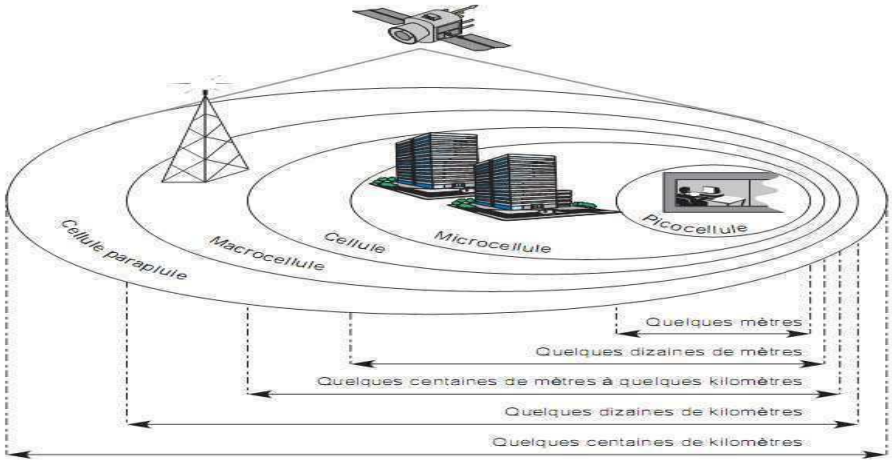


Figure I.1. Structure hiérarchique des cellules

Une cellule se caractérise par :

- Sa puissance d'émission : ce qui se traduit par une zone de couverture à l'intérieur de laquelle le niveau du champ électrique est supérieur à un seuil déterminé;
- La fréquence de porteuse utilisée pour l'émission radioélectrique;
- Le réseau auquel elle est interconnectée.

I. 4. Définition des standards GSM (2G) et GPRS (2.5G)

La norme 2G permet la transmission de la parole et des données simultanément. Elle offre la possibilité aux utilisateurs de partager un même canal de transmission, ceci est possible grâce à l'utilisation du mécanisme de division de fréquence FDMA (Frequency Division Multiple Access) et le mécanisme de division de temps TDMA (Time Division Multiple Access).

Parmi les standards de la 2G on y retrouve les standards GSM (Global Système for communication), ce standard a vite donné naissance à ce qu'on appelle la génération 2.5, c'est le réseau GPRS (General Packet Radio Service) qui permet la transmission de données par paquets.

I.4.1. Définition de standard GSM (2G)

Global System for Mobile communication (GSM) est la norme de téléphonie mobile de seconde génération développée à partir de 1990. Cette technologie représente la première technologie de téléphonie numérique sans fil.

Le débit moyen du GSM est similaire à celui du FAX, c'est-à-dire 9,6 kbits/sec. Ce standard utilise les bandes de fréquences 900 MHz et 1800 MHz en Europe.

Aux Etats-Unis par contre, la bande de fréquence utilisée est de 1900 MHz. Ainsi, nous appelons tri-bande, les téléphones portables pouvant fonctionner en Europe et

aux Etats-Unis. Il permet de transmettre la voix ainsi que des données numériques de faible volume, par exemple des messages textes SMS (Short Message Service) ou des messages multimédias MMS (Multimédia Message Service).L'opérateur doit installer des antennes fixes, toutes les antennes définissent une zone de couverture propre à l'opérateur.

I.4.1.1. le concept cellulaire en GSM

Dans un réseau GSM, le territoire est découpé en petites zones appelées cellules.

Chaque cellule est équipée d'une station de base fixe munie de ses antennes installées sur un point haut (château d'eau, cloché d'église, immeuble ...).

Les cellules sont dessinées hexagonales mais la portée réelle des stations dépend de la configuration du territoire arrosé et du diagramme de rayonnement des antennes d'émission. Dans la pratique, les cellules se recouvrent donc partiellement.

Dans une cellule GSM typique (macrocellule), les mobiles peuvent être situés jusqu'à 35 km de la station de base pour le GSM 900 et 2 km (minicellule) pour le DCS 1800 (puissance plus faible, atténuation plus importante avec la distance).

La taille limitée des cellules permet de limiter la puissance d'émission nécessaire pour la liaison et donc augmenter l'autonomie des mobiles. Pour les piétons qui évoluent moins vite qu'une voiture et au niveau du sol, on ajoute des sous-stations de petites dimensions sur un site peu élevé et sur les murs des immeubles.

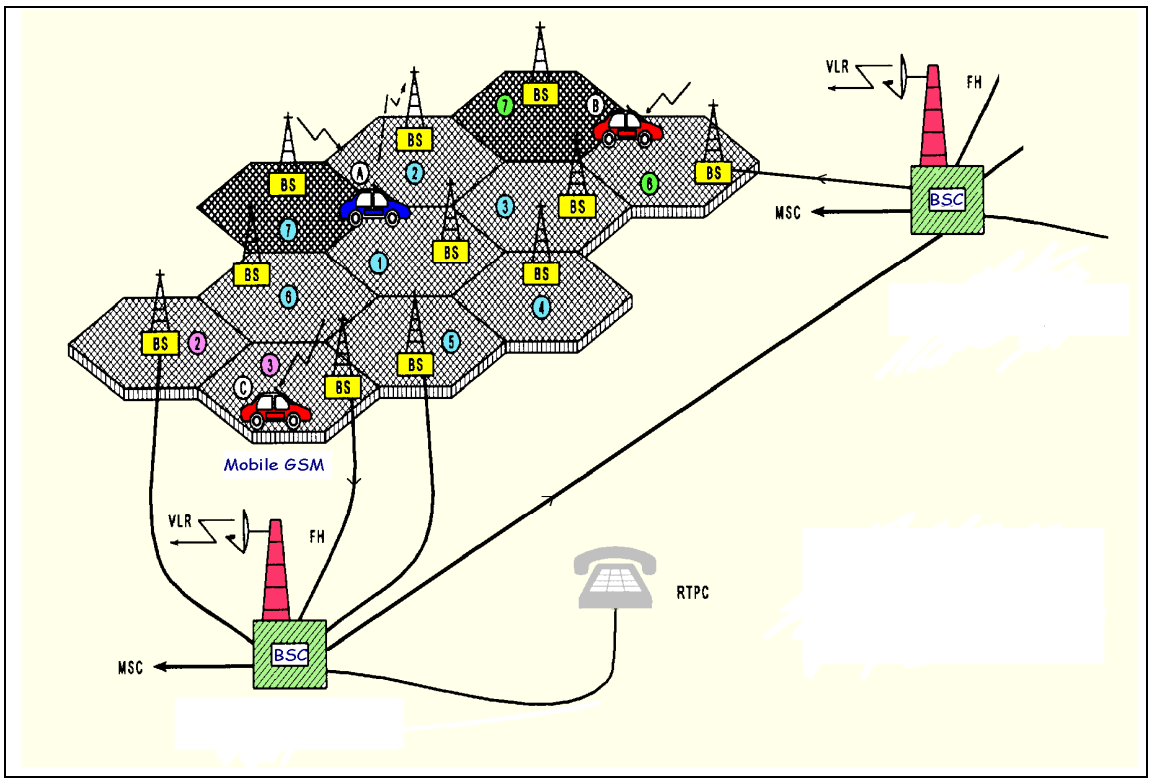


Figure I.2. Structure cellulaire du réseau GSM

I.4.1.2. Présentation de l'architecture générale du réseau GSM

Le réseau spécifié pour le GSM s'appelle PLMN (Public Land Mobile Network), chaque opérateur ayant le sien propre. Il est relié au Réseau Téléphonique Commuté Public (RTCP) tel que : La gestion du handover et de l'itinérance nécessite des équipements particuliers qui ne sont pas présents dans les réseaux téléphoniques classiques : commutateurs adaptés aux mobiles, bases de données spécifiques,…Ces équipements et les stations de base, sont organisés en un réseau particulier ou PLMN qui peut être vu comme un système qui assure un accès radio au réseau téléphonique général, le RTC. Il est bien distinct de ce dernier auquel il est rattaché par des passerelles appropriées. De par la concurrence, il y'a plusieurs PLMN déployées par des opérateurs différents.

L'architecture du réseau GSM est définit dans la norme de l'ETSI (Européen Télécommunication Standards Institute), il est composé de plusieurs entités,

lesquelles ont des fonctions et des interfaces spécifiques. On peut diviser le réseau en trois sous-systèmes:

*Le sous système radio (BSS : Base Station Sub-system).

*Le sous système réseau (NSS: Network Sub-system).

*Le sous-système opérationnel (OSS : Operating Sub-System).

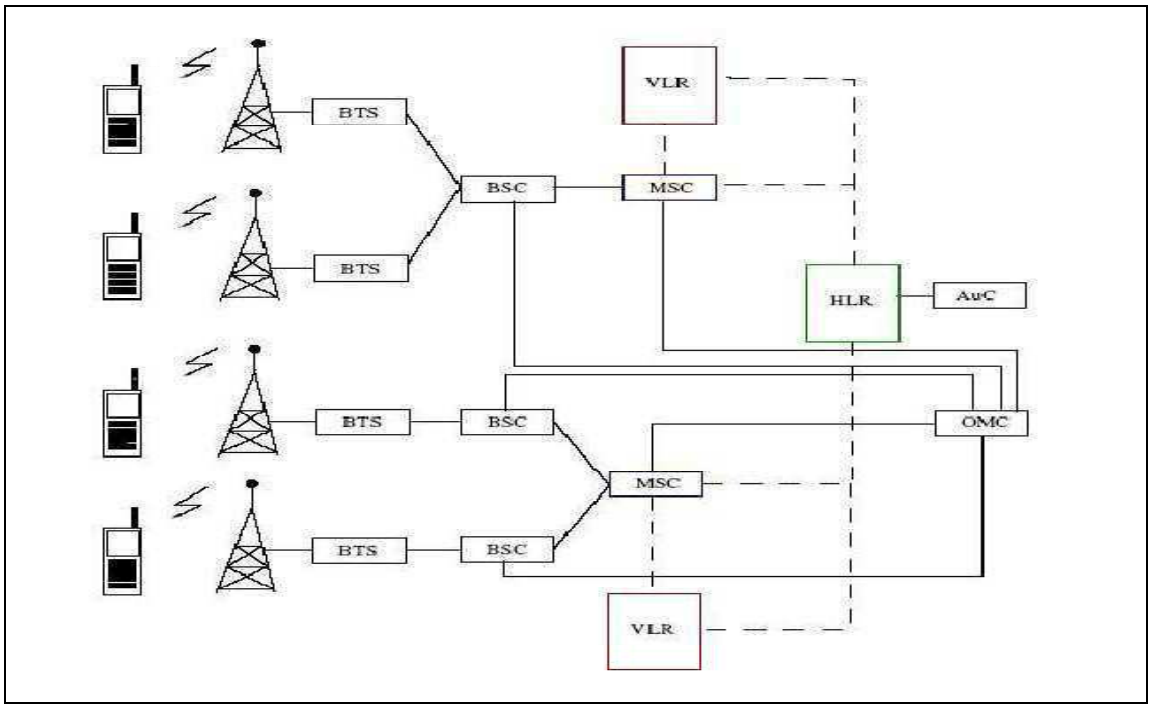


Figure I.3. Architecture du réseau GSM

I.4.1.2.1.Le sous-système radio BSS (Base Station Sub-system)

Le sous-système radio (BSS) est l'ensemble des éléments du réseau qui gère et assure les transmissions radio, et principalement il est constitué de mobile, de la station de base(BTS),et aussi d'un contrôleur de station de base (BSC).

a-Station Mobile (MS)

La station mobile est constituée de téléphone portable à proprement parler mais aussi d'une carte appelée carte SIM (Subscriber Identity Module), qui est indispensable pour accéder au réseau. Cette carte contient, sur un microprocesseur, les informations personnelles de l'abonné. Ce dernier peut donc, par insertion de la carte SIM dans n'importe quel téléphone portable, recevoir des appels, en donner et avoir accès à tous les services qu'il a souscrit : le téléphone portable et l'utilisateur sont totalement indépendants.

Le téléphone portable est identifié par le numéro IMEI (International Mobile Equipment Identity). La carte SIM, elle, contient le numéro IMSI (International Mobile Subscriber Identity), mais aussi une clé secrète

b-La station de base BTS (Base Transceiver Station)

C'est l'ensemble d'émetteurs-récepteurs appelé TRX qui assure la couverture radioélectrique d'une ou plusieurs cellules du réseau.

La BTS a pour la gestion des transmissions radio (modulation, démodulation, égalisation, codage et correcteur d'erreurs), et aussi gère la couche physique des réseaux.

L'exploitation des données recueillies par la BTS est réalisée par le BSC.

Elle prend en charge la couche liaison de données pour l'échange de signalisation entre les mobiles et l'infrastructure réseau de l'opérateur. La BTS gère ensuite la liaison de données avec le BSC.

c- Le contrôleur de station de base BSC (Bas Station Controller)

Le contrôleur de station gère les ressources radio pour une ou plusieurs BTS, à travers le monitorage de la connexion entre la BTS et les MSC (il s'agit de centrales de commutations qui offrent la liaison au réseau fixe ou à d'autres réseaux), et aussi à travers les canaux radio, le codage, le frequency hopping et les handovers.

Concrètement, il gère la gestion et la configuration du canal radio telle qu' il doit choisir pour chaque appel la cellule la mieux adaptée et doit sélectionner à l'intérieur

de celle-ci le canal et la gestion de handoverintra BSC telle qu'il décide, sur la base des relevés reçus par la BTS, le moment pour effectuer le handover, autrement dit, le changement de cellule lors des déplacements de l'utilisateur pendant une conversation, à l'intérieur de la surface de couverture de sa compétence. Comme il prend aussi en charge les fonctions de décodage des canaux radio Full Rate (16kbps) ou Half Rate (8 kbps) pour des canaux à 64 kbps. C'est véritablement l'organe intelligent du BSS.

I.4.1.2.2. Le sous-système réseau NSS (Network Sub-System)

Il assure principalement les fonctions de commutation et de routage. C'est donc lui qui permet l'accès au réseau public RTCP ou RNIS. En plus des fonctions indispensables de commutation, on y retrouve les fonctions de gestion de la mobilité, de la sécurité et de la confidentialité qui sont implantées dans la norme GSM.

L'élément central du sous système réseau est le MSC. Donc le NSS constitue les différents éléments suivant :

- commutateur de service mobile **MSC** (Mobile Switching Center);
- Registre des abonnés locaux **HLR** (Home Location Register);
- L'enregistreur de localisation des visiteurs (**VLR**);
- L'enregistreur des identités des équipements (**EIR**);
- Centre d'authentification (**AUC**).

a-Commutateur de service mobile MSC (Mobile Switching Center)

Le centre de commutation mobile est relié au sous-système radio via l'interface A. Son rôle principal est d'assurer la commutation entre les abonnés du réseau mobile et ceux du réseau commuté public (RTC) ou du réseau ISDN .D'un point de vue fonctionnel, il est semblable à un commutateur de réseau ISDN, mais à part quelques modifications nécessaire pour un réseau mobile .De plus, il participe à la fourniture des différents services supplémentaires et les services messagerie. Il permet encore de mettre à jour les différentes bases de données (HLR, VLR et AUC)

qui donnent toutes les informations concernant les abonnés et leur localisation dans le réseau .Les commutateurs MSC d'un opérateur sont reliés entre eux pour la commutation interne des informations. Les MSC servant de passerelle (GATEWAY Mobile Switching Center, GMSC) sont placées en périphérie du réseau d'un opérateur de manière à assurer une inter-opérabilité entre réseaux d'opérateurs.

b-Registre des abonnés locaux HLR (Home Location Register)

Elle contient toutes les caractéristiques d'abonnement de tous les utilisateurs du réseau GSM, leurs identités **IMSI** (International Mobile Subscriber Identity) qui est un numéro unique alloué à chaque abonné stocké dans la carte SIM et utilisé par le réseau pour la transmission des données de l'abonné et **MSISDN** (Mobile Subscriber Integrated Services Digital Network) qui est le numéro d'appel de l'abonné lié à l'IMSI dans l'HLR; les appels destinés à l'abonné sont transcrits en numéro d'IMSI ce qui permet sa recherche et l'établissement de la communication.
Il n'y a normalement qu'un seul HLR par réseau mais en pratique cette base de données est divisée. Le HLR travaille en étroite collaboration avec les différents VLR, notamment pour les handovers, et la numérotation.

c-L'enregistreur de localisation des visiteurs (VLR)

Cette base de données ne contient que des informations dynamiques et est liée à un MSC. Il y'en a donc plusieurs dans un réseau GSM. Elle contient des données dynamiques qui lui sont transmises par le HLR avec lequel elle communique lorsqu'un abonné entre dans la zone de couverture du centre de commutation mobile auquel elle est rattachée. Lorsque l'abonné quitte cette zone de couverture, ses données sont transmises à un autre VLR ; les données suivent l'abonné en quelque sorte.

d-L'enregistreur des identités des équipements (EIR)

Malgré les mécanismes introduits pour sécuriser l'accès au réseau et le contenu des communications, le téléphone mobile doit potentiellement pouvoir accueillir

n'importe quelle carte SIM de n'importe quel réseau. Il est donc imaginable qu'un terminal puisse être utilisé par un voleur sans qu'il ne puisse être repéré.

Pour combattre ce risque, chaque terminal reçoit un identifiant unique (International Mobile station Equipment Identity IMEI) qui ne peut pas être modifié sans altérer le terminal. En fonction de données au sujet d'un terminal, un opérateur peut décider de refuser l'accès au réseau. Tous les opérateurs n'implémentent pas une telle base de données. Donc on peut dire que la consultation de ce registre permet de refuser l'accès au réseau à un terminal qui a été déclaré perdu ou volé.

e-Centre d'authentification (AUC)

Le centre d'authentification mémorise pour chaque abonné une clé secrète utilisée pour authentifier les demandes de services et pour chiffrer (crypter) les communications .L'AUC de chaque abonné est associé au HLR.

I.4.1.2.3. Le sous-système opérationnel OSS (Operating Sub-System)

L'OSS comprend les centres d'exploitation de maintenance appelés OMC (Operation and Maintenance Centre). Ce sont les entités qui permettent à l'opérateur de contrôler, de gérer et d'administrer son réseau. Deux catégories d'OMC sont différenciées dans l'OSS. L'OMC radio et l'OMC Switch. Ces deux OMC assurent la même fonction mais à différents niveaux du réseau.

L'OSS assure les fonctions qui sont liées à la gestion commerciale ou administrative du réseau ,comme il gère aussi la gestion de sécurité et des performances ainsi les modifications des configurations du réseau.

I.4.1.3. Les fréquences utilisées

Le GSM est un système radiophonique à qui l'on a alloué deux bandes de fréquences qui sont :

a- La bande de fréquence de 900 MHz:

- **890 à 915 MHz :** Bande montante pour les communications du mobile vers le fixe.

- **935 à 960 MHz :** Bande descendante pour les communications du fixe vers le mobile.

b-La bande de fréquence de 1800 MHz (DCS) :

- **1710 à 1785 MHz** : Bande montante pour les communications du mobile vers le fixe.
- **1805 à 1880 MHz :** Bande descendante pour les communications du fixe vers le mobile.

I .4.1.4. Le canal de transmission

Les échanges entre le mobile et la station de base se font sur deux fréquences distinctes appelées fréquence montante (du mobile vers la base) et descendante (de la base vers le mobile) , séparées par un intervalle appelé écart duplex.
Deux bandes de fréquences sont utilisées : la bande GSM (largeur 25 MHz, parfois étendue à 35 MHz) et la bande DCS (largeur 75 MHz).
Un mobile n'ayant pas besoin de ces fréquences en permanence, il la partage avec sept autres mobiles selon une technique appelée TDMA (Time Division Multiple Access).
Le mobile en communication utilise un time-slot (durée 577µs) sur les 8 qui constituent une trame TDMA (durée 4,6 ms).
Le mobile reçoit le signal émis par la base sur la fréquence descendante durant un time slot soit 577µs, puis 3 time-slots plus tard, émet son signal vers la station de base sur la fréquence montante.

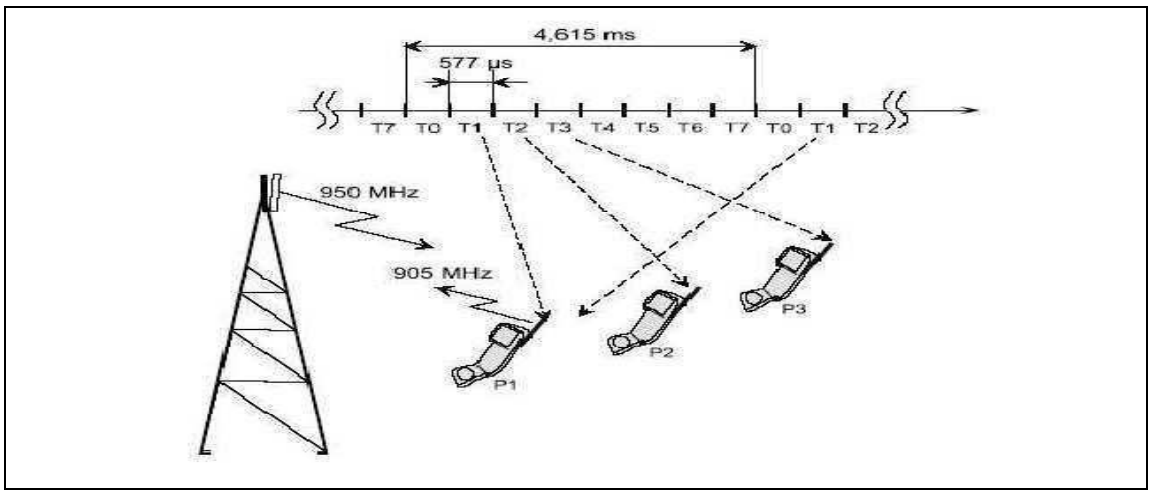


Figure I.4. Canal de transmission GSM

I.4.1.5. La transmission de données en GSM

Le réseau GSM de base ne propose qu'un débit de 9,6 Kbits/s, parfaitement satisfaisant pour la voix, mais insuffisant pour le transfert de fichiers, d'images, de vidéos, accès à Internet …

De plus, le canal de transmission GSM est souvent très mal utilisé lors du transfert de données telle que si on surf sur Internet, le canal de transmission est utilisé à 5% en moyenne ainsi, lorsqu'on répond à ses Emails en direct, le canal de transmission est utilisé à 2%, et lorsqu'on télécharge ses Emails, le canal de transmission est utilisé à 10%.

De nouvelle structure est donc nécessaire pour offrir aux utilisateurs un confort plus grand:

- Le standard **GPRS** (General Packet Radio Service) offre un débit plus élevé, qui rend plus confortable, l'accès des mobiles à internet.

I .4 .2. Définition de standard GPRS (2.5G)

Le General Packet Radio Service (GPRS) spécifie une technique de transmission de données en « commutation de paquets », permettant ainsi de ne pas mobiliser le canal de communication, et donc autorisant une tarification plus souple pour l'utilisateur.

Outre cet avantage non négligeable, GPRS permet d'atteindre un débit théorique maximal de 171,2 Kbits/s, ce qui correspond à un débit d'environ 115 Kbits/s pour l'utilisateur final dans des conditions optimales.

Cependant, il ne faut pas oublier que GPRS s'appuyant sur le réseau GSM, ils se complètent alors tous les deux. En effet, l'architecture GSM fournit les services voix, tandis que l'architecture GPRS fournit les services de données par paquets avec un débit élevé. On peut donc résumer les intérêts principaux du GPRS comme étant les temps d'accès réduits, de l'ordre d'une seconde pour commencer un transfert de données, un débit plus élevé qu'en GSM, un mode de commutation par paquets permettant d'utiliser les ressources radios.

I .4.2.1. Présentation de l'architecture générale du réseau GPRS

Le GPRS utilise une partie de l'architecture mise en place par le GSM, comme nous l'avons mentionné, GPRS est un service complément de GSM et s'intègre dans ce dernier, c'est-à-dire que GPRS utilise les mêmes équipements pour communiquer avec le terminal au niveau radio, tel que la station de base (BTS), et utilise les mêmes fréquences.

Ce réseau est composé de différentes parties que nous avons déjà expliqué en GSM, avec les différents équipements ajouté sur ce dernier tel que : PCU, SGNS et GGNS ainsi que les interfaces d'interconnexions.

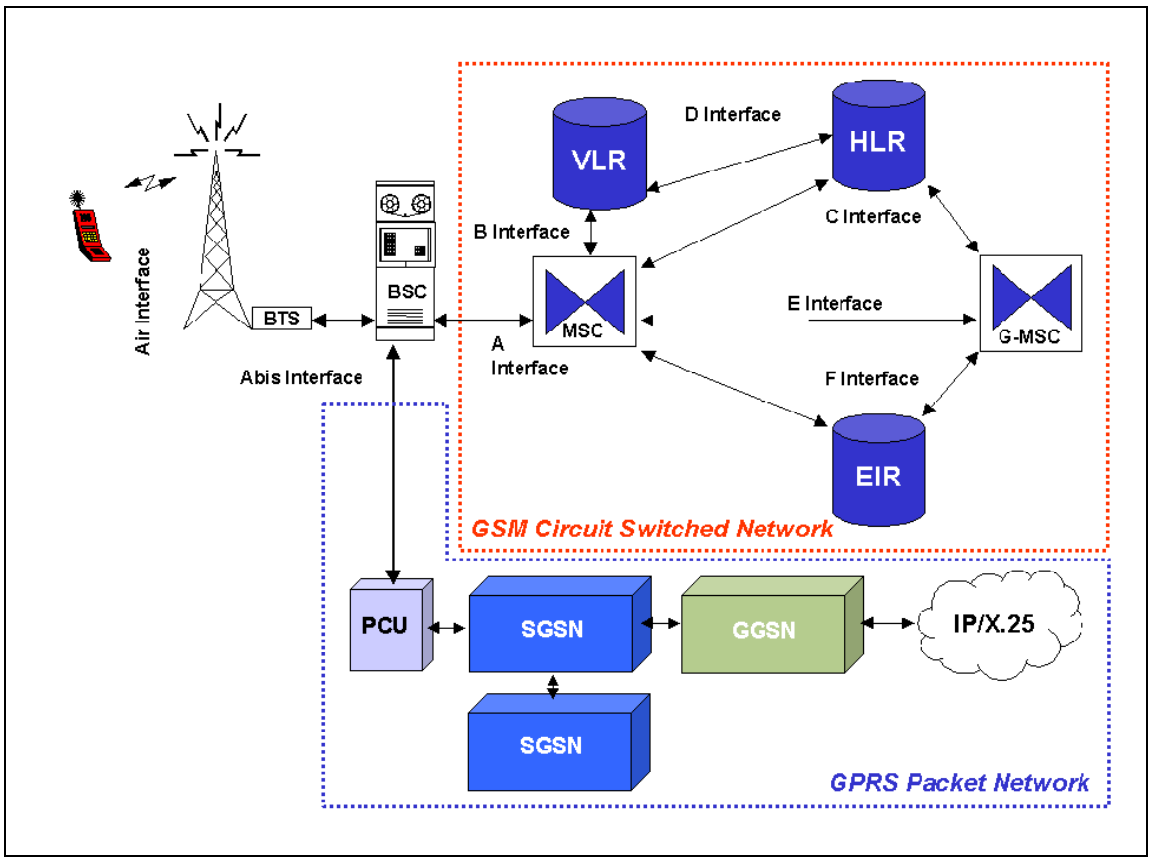


Figure I.5. Architecture d'un réseau GPRS

- **PCU (Packet Control Unit)** : cet équipement gère les fonctions de couches basses, c'est-à-dire les protocoles RLC, MAC, contrôle de puissance, adaptation des débits, … pour envoyer sur le réseau « GPRS ». Il gère les fonctions de transmissions et d'acquittements.
- **SGSN (Serving GPRS Support Node)** : serveur d'accès au service GPRS (équivalent au MSC), et qui gère les MS présentes dans une zone donnée. Son rôle est de délivrer des paquets aux MS.
- **GGSN (Gateway GPRS Support Node)** : routeur connectant le réseau GPRS et un réseau externe de commutation par paquets (IP ou X.25). Il sert de passerelle entre les SGSN du réseau GPRS et les autres réseaux de données .

I.4.2.2.Les interfaces nécessaires pour interconnecter les équipements

- **interface Um :** c'est l'interface radio entre le terminal et le sous-système radio. En réalité, cette interface est nommée interface « air ».
- **interface A bis :** cette interface relie les deux équipements du sous-système radio.
- **interface A :** cette interface relie le sous-système radio via la BSC, et le sous-système réseau GSM via le MSC/VLR.
- **interface Gb :** cette interface est définie entre le sous-système réseau GSM et le sous-système réseau GPRS.
- **interface Gn :** cette interface est définie entre deux nœuds GPRS (SGSN ou GGSN) appartenant au même réseau PLMN GPRS. Les messages IP ou X.25 sont transportés entre les nœuds GPRS, par tunnelling grâce au protocole GTP (GPRS Tunnelling Protocol).
- **interface Gs :** cette interface, définie entre le SGSN et le MSC/VLR, est optionnelle. Elle permet au SGSN d'envoyer par exemple des informations de localisation au MSC/VLR et d'éviter des échanges redondants de signalisation liés à la gestion de la mobilité entre le terminal mobile et le SGSN, puis entre le terminal mobile et le MSC.
- **interface Gd :** cette interface est définie entre les entités fonctionnelles qui permettent respectivement d'acheminer des SMS à destination d'un terminal mobile et de relayer des SMS émis par un terminal mobile (appelés SMS-GMSC et SMS-IWMSC), et le SGSN pour offrir à un terminal mobile GPRS la possibilité d'émettre et de recevoir des SMS via des canaux radio GPRS.
- **interface Gr :** cette interface est définie entre le SGSN et le HLR pour des échanges de données liés aux profils de données des abonnées et à la gestion de la mobilité.
- **interface Gc :** cette interface, définie entre le GGSN et le HLR, est optionnelle et sert au GGSN pour demander au HLR des informations de localisation concernant un terminal mobile.

- **interface Gf :** cette interface relie un SGSN et un équipement de type EIR pour les échanges liés à l'identification du terminal.
- **interface Gi :** cette interface, définie entre le GGSN et les réseaux de données par paquets externes, permet les échanges entre le réseau GPRS et le monde extérieur.
- **interface Gp :** cette interface définie entre deux PLMN différents est équivalente à l'interface Gn avec, en plus des fonctions de sécurisation entre les deux PLMN.

I.4.2.3.Principales caractéristiques du GPRS

La norme GPRS spécifie un nouveau service de support de transmission de données en mode paquets. GPRS permet notamment de transporter des données utilisateur et des données de signalisation en optimisant les ressources radios de façon dynamique.

a-Spectre des fréquences

GPRS utilise les mêmes fréquences attribuées au GSM , qui est dédié deux bandes de fréquence , l'une aux alentours des 900 MHz et l'autre autour des 1800 MHz . Ces fréquences se découpent en deux bandes, l'une pour les liaisons montantes, l'autre pour les liaisons descendantes , tel que dans la fréquence de 900 MHz nous avons les bandes de 890–915 MHz et 935-960 MHz , et pour la fréquence de 1800 MHz, nous avons 1710-1785 MHz et 1805-1880 MHz.

b-Catégories de services

- **les services Point à Point (PTP) :** ils fournissent une transmission d'un ou plusieurs paquets entre deux utilisateurs (l'expéditeur et le destinataire).
- **les services Point à Multipoints (PTM) :** ils fournissent une transmission de paquets entre un demandeur de service et un groupe d'abonnés receveurs se trouvant dans une zone définie par le demandeur de service. Un abonné peut

ainsi envoyer des données à de multiples destinations avec une seule demande de service.

c-La technique de transmission

GPRS utilise la même technique pour transmette les données que dans GSM, à savoir la technique de multiplexage temporel, dite TDMA (Time Division Multiple Access).

Etant donné qu'une bande de fréquence dans GSM peut véhiculer 8 fois le débit d'une conversation téléphonique, on va alors segmenter le temps d'émission/réception en 8 intervalles de temps répétés à l'infini que l'on appellera « slot » ou « time slot ».

Un time slot est en fait un canal capable de transporter de l'information telle que : la voix ou encore des données.

Une séquence de ces 8 slots est appelée une trame TDMA.

La différence entre GSM et GPRS est que GSM n'utilise qu'un time slot par trame TDMA, tandis que GPRS peut utiliser plusieurs time slots (jusqu'à 8, qui est le maximum) sur une seule trame pour transporter les données. GPRS utilise ces times slots de façon dynamique et peut donc justifier d'un débit beaucoup plus important que GSM.

I.5. Supports courants de transmission

La transmission désigne le transport d'information d'un endroit à un autre .Elle achemine l'information, permet le déplacement de tout signal d'un point géographique à un autre, quelle que soit la distance qui les sépare.

Les supports de transmission sont nombreux. Parmi ceux-ci, on distingue les supports métalliques, non métalliques, immatériels. Les supports métalliques, comme les paires torsadées et les câbles coaxiaux, sont les plus anciens et les plus

largement utilisés, ils transportent des courants électriques. Les supports de verre ou de plastique, comme les fibres optiques, transmettent la lumière, tandis que les supports immatériels des communications sans fil propagent des ondes électromagnétiques et sont en plein essor.

I.5.1. Liaisons filaires

I.5.1.1. Paires torsadées

Un câble à paires torsadées décrit un modèle de câblage où une ligne de transmission est formée de deux conducteurs enroulés en hélice l'un autour de l'autre, cette configuration à pour but de maintenir précisément la distance entre les fils et de diminuer la diaphonie.

La paire torsadée suffit pour les réseaux locaux d'entreprise où les distances se limitent à quelques kilomètres. Ses avantages sont nombreux : technique maîtrisée, facilité de connexion et d'ajout de nouveaux équipements, faible coût. Certains constructeurs proposent des paires torsadées blindées (STP, Shielded Twisted Pair) enrobées d'un conducteur cylindrique, elles sont mieux protégées des rayonnements électromagnétiques parasites. Une meilleure protection prévoit un blindage par paire.

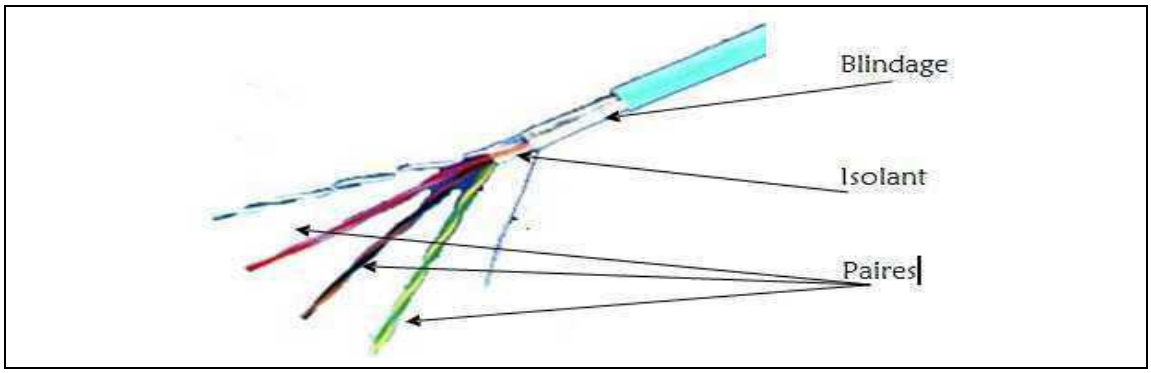


Figure I.6.Câbles à paires torsadées

I.5.1.2.Câbles coaxiaux

Pour éviter les perturbations dues aux bruits externes, on utilise deux conducteurs métalliques cylindriques de même axe séparés par un isolant. Le tout forme un câble coaxial. Ce câble présente de meilleures performances que la paire torsadée: affaiblissement moindre, transmission de signaux de fréquences plus élevées, etc. La capacité de transmission d'un câble coaxial dépend de sa longueur et des caractéristiques physiques des conducteurs et de l'isolant. Sur 1 km, un débit de plusieurs centaines de Mbit/s peut être atteint. Sur des distances supérieures à 10 km, l'atténuation des signaux réduit considérablement les débits possibles. C'est la raison pour laquelle on utilise désormais les fibres optiques sur les liaisons grandes distances.

Figure I.7. Constitution d'un câble coaxial

I.5.2. Liaison optique

Une fibre optique est constituée d'un fil de verre très fin. Elle comprend un cœur, dans lequel se propage la lumière émise par une diode électroluminescente ou une source laser et une gaine optique dont l'indice de réfraction garantit que le signal lumineux reste dans la fibre.

Les avantages de la fibre optique sont nombreux : diamètre extérieur de l'ordre de 0,1 mm, poids de quelques grammes au kilomètre. Cette réduction de taille et de poids la rend facile à utiliser. En outre, sa très grande capacité permet la transmission simultanée de nombreux canaux de télévision, de téléphone… Les points de régénération des signaux sont plus éloignés (jusqu'à 200 km), du fait de l'atténuation moindre de la lumière. Enfin, l'insensibilité des fibres aux parasites électromagnétiques est un avantage très apprécié, puisqu'une fibre supporte sans difficulté la proximité d'émetteurs radioélectriques. On peut l'utiliser dans des environnements perturbés (avec de puissants champs électromagnétiques, par exemple).

Par ailleurs, elle résiste bien aux écarts de température. La fibre optique constitue la plupart des artères des réseaux de télécommunications et des réseaux locaux à très haut débit.

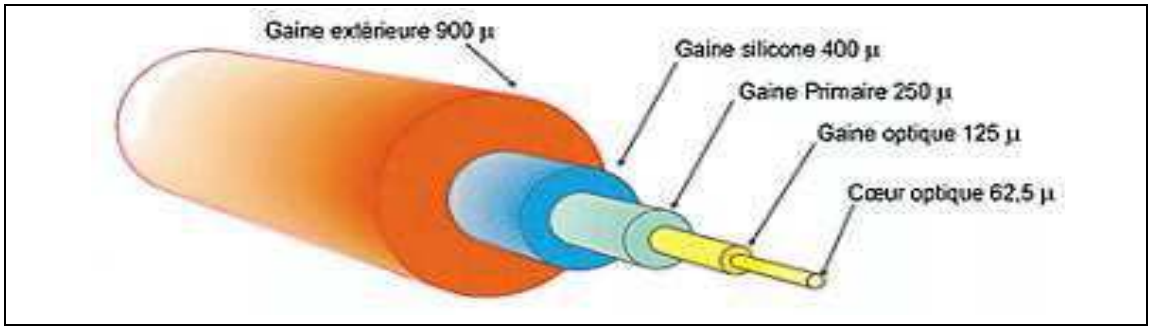


Figure I.8. Les composants de la fibre optique

I.5.3. Liaisons sans fil

I.5.3.1. Faisceaux hertziens

Les faisceaux hertziens reposent sur l'utilisation de fréquences très élevées (de 2 GHz à 15 GHz et jusqu'à 40 GHz) et de faisceaux directifs produits par des antennes directionnelles émettant dans une direction donnée. La propagation des ondes est

limitée à l'horizon optique, la transmission se fait entre des stations placées en hauteur, par exemple au sommet d'une colline, pour éviter les obstacles dus aux constructions. Les faisceaux hertziens s'utilisent pour la transmission par satellite, pour celle des chaînes de télévision ou pour constituer des artères de transmission longues distances dans les réseaux téléphoniques.

Figure I.9. Antenne parabolique d'un faisceau hertzien

I.5.3.2. Les satellites

Un satellite de télécommunications est une sorte de relais hertzien placé à 35786 km de la terre. Des fréquences de longueurs d'onde centimétriques sont utilisées pour acheminer les signaux. Le rôle du satellite est de palier à l'affaiblissement du signal qu'il reçoit, de le régénérer pour le transmettre amplifié en fréquences vers la station terrienne réceptrice. Il ne s'occupe pas de la compréhension des données qu'il reçoit et qu'il doit retransmettre. En réalité, il doit simplement les régénérer pour permettre à la station terrienne de les recevoir convenablement : c'est une sorte de miroir.

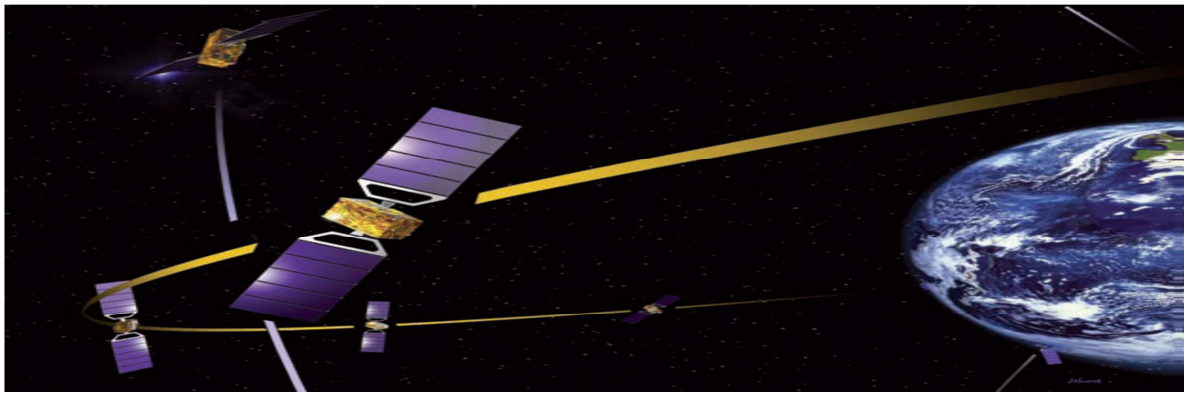


Figure I.10. Satellite de communication

I.6. Caractéristiques globales des supports de transmission

Quelle que soit la nature du support, le signal désigne le courant, la lumière ou l'onde électromagnétique transmis. Certaines caractéristiques des supports (bande passante, sensibilité aux bruits, limites des débits possibles) en perturbent la transmission. Leur connaissance est nécessaire pour fabriquer de « bons » signaux, c'est-à-dire les mieux adaptés aux supports utilisés.

- **Bande passante**

Les supports ont une bande passante limitée. Certains signaux s'y propagent correctement (ils sont affaiblis mais reconnaissables à l'autre extrémité), alors que d'autres ne les traversent pas (ils sont tellement affaiblis ou déformés qu'on ne les reconnaît plus à la sortie). Intuitivement, plus un support a une bande passante large, plus il transporte d'informations par unité de temps.

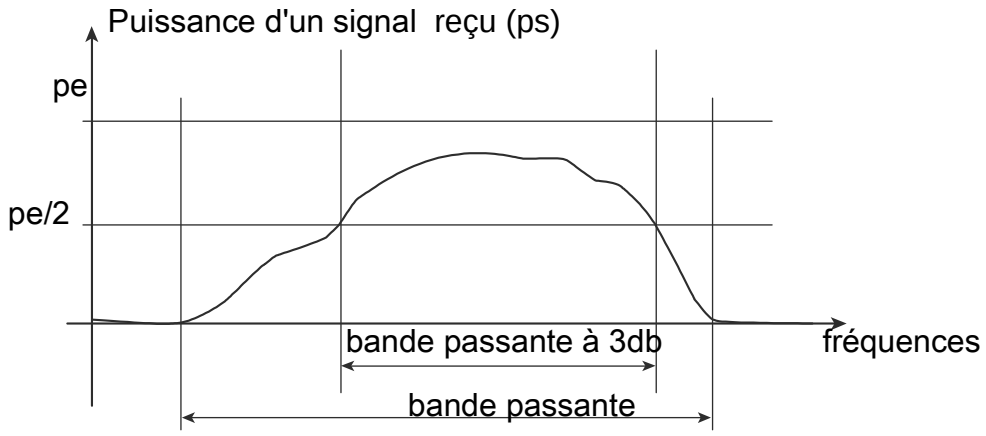


Figure I.11. Notion de bande passante

- **Bruits et distorsions**

Les supports de transmission déforment les signaux qu'ils transportent, même lorsque leurs fréquences sont adaptées. Diverses sources de bruit perturbent les signaux : parasites, phénomènes de diaphonie… Certaines perturbations de l'environnement introduisent également des bruits (foudre, orages pour le milieu aérien, champs électromagnétiques dans des ateliers…).

Par ailleurs, les supports affaiblissent et retardent les signaux. La distance est un facteur d'affaiblissement, très important pour les liaisons par satellite. Ces déformations, appelées distorsions, sont gênantes pour la bonne reconnaissance des signaux en sortie, d'autant qu'elles varient avec la fréquence et la phase des signaux émis.

Même lorsque les signaux sont adaptés aux supports, on ne peut pas garantir leur réception correcte à 100 %. Le récepteur d'un signal doit prendre une décision dans un laps de temps très court. De ce fait, cette décision peut être mauvaise. Par exemple, un symbole 1 émis donne une décision « symbole 0 reçu », ce qui constitue une erreur de transmission.

Les fibres optiques sont les meilleurs supports, car le taux d'erreur y est très faible. Les câbles et les supports métalliques présentent des taux d'erreur moyens.

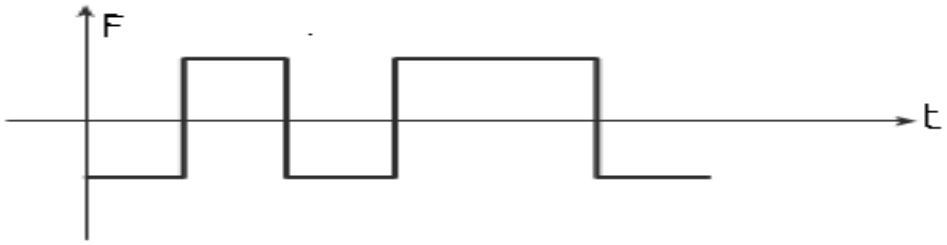


Figure I.12.1. Exemple d'un signal émis

Figure I.12.2. Exemple d'un signal reçu

➢ **Capacité limitée des supports de transmission**

La capacité d'un support de transmission mesure la quantité d'informations transportée par unité de temps. Les caractéristiques que nous venons de voir fait que la capacité d'un support est limitée. Un théorème dû à Shannon1 exprime,
en bits par seconde, la borne maximale de la capacité cap_{Max} d'un support de transmission :

$$Cap_{Max} = W \times \log_2 (1 + S/B)$$

Dans cette formule, W est la largeur de la bande passante du support exprimée en hertz, S/B représente la valeur du rapport entre la puissance du signal (notée S) et la puissance du bruit (notée B) ; la base 2 du logarithme sert à exprimer la quantité d'informations en bits.

I.7. Conclusion

Le GPRS est un service complément de GSM, ce réseau ne constitue pas à lui tout seul un réseau mobile à part entière, mais une couche supplémentaire rajoutée à un réseau GSM existant. Il peut donc être installé sans aucune licence supplémentaire. Ceci signifie que tous les opérateurs qui disposent d'une licence GSM peuvent faire évoluer leur réseau vers le GPRS, qui dégage plusieurs avantages principaux. En effet, GPRS a un débit supérieur à celui du GSM. On peu atteindre théoriquement un débit de 171,2 kbit/s, ainsi la commutation de paquets tel que cette méthode permet de ne pas monopoliser les ressources radios lors de la consultation sur Internet, consultation d'email, etc.…

De plus, un réseau GPRS fournit à ses abonnés, qu'ils soient fixes ou mobiles, un accès à divers réseaux de données ainsi, des services utiles et pratiques, de meilleurs débits comme l'accès au Web, messagerie électronique et transfert de fichier.

La liaison entre le mobile et le site cellulaire ce fait par rayonnement électromagnétique en modulation de fréquence sans oublier que la transmission entre le site cellulaire et le centrale téléphonique peut ce faire soit par câble, soit par fibre optique ou soit par faisceau hertzien.

Du fait de la complexité de la fibre optique et son couts élevé, le choix des faisceaux hertziens large bande est une meilleur solution afin de couvrir les zones à topologie difficile et lieu accidentées, de ce fait ce sont les supports les plus utilisée en téléphonie.

II.1. Introduction

Un système de communication a pour fonction d'assurer le transport de l'information entre un émetteur et un (ou plusieurs) récepteur(s) reliés par un canal de communication. Tout le problème de la transmission est de trouver une bonne transformation de l'information en signal tel que le canal soit capable de le propager correctement c'est-à-dire que le récepteur puisse trouver suffisamment d'information dans le signal reçu pour reconstituer l'information initiale.

L'infrastructure d'un réseau, la qualité de service offerte, les solutions logicielles à mettre en œuvre dépendent largement des supports de transmission utilisés.

Les supports de transmission exploitent les propriétés de conductibilité des métaux (paires torsadées, coaxial), celles des ondes électromagnétiques (faisceaux hertziens, guides d'onde, satellites) ou encore celles du spectre visible de la lumière (fibre optique). Généralement on classe les supports en deux catégories :

- les supports guidés (supports cuivre et supports optiques)
- les supports libres (faisceaux hertziens et liaisons satellites)

Ce chapitre est consacré pour l'étude des liaisons hertziennes point à point qui sont les plus répandus.

II.2. Propagation des ondes radioélectriques

Les ondes radio ou ondes hertziennes sont des ondes électromagnétiques qui se propagent de deux façons :

- dans l'espace libre (propagation rayonnée, autour de la Terre par exemple)
- dans des lignes (propagation guidée, dans un câble coaxial ou un guide d'onde)

Le domaine des fréquences des ondes radio s'étend de 9 kHz à 3 000 GHz. Il est essentiel de comprendre les principes de la propagation des ondes

électromagnétiques pour pouvoir prédire les chances et les conditions d'établissement d'une liaison radio entre deux points de la surface de la Terre ou entre la Terre et un satellite.

Une onde électromagnétique est constituée d'un champ électrique $\vec{E}$ et d'un champ magnétique $\vec{H}$, couplés entre eux : les deux champs sont perpendiculaires l'un à l'autre, leurs amplitudes sont en rapport constant et leurs variations sont en phase.

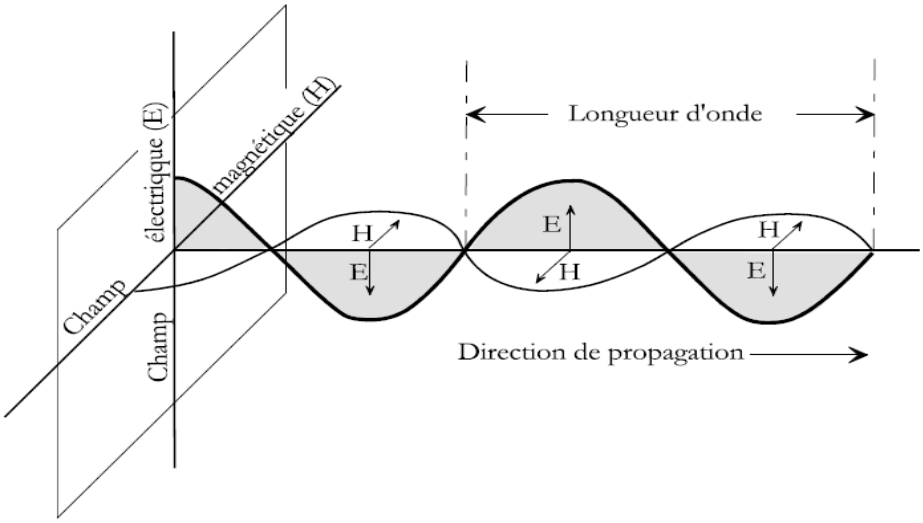


Figure II.1. Propagation des ondes électromagnétiques

$\vec{E}$: Intensité du champ électrique (V/m)

$\vec{H}$: Intensité du champ magnétique (A/m)

II.2.1.Caractéristiques

Les caractéristiques principales d'une onde électromagnétique sont :

- **La longueur d'onde** : c'est la distance entre deux maximums consécutifs ou bien c'est la distance parcourue par l'onde pendant la durée d'une période. On la note λ.

Relation :

$$\lambda = \frac{C}{F} \qquad \lambda = c.T$$

- **La fréquence** : En un point donné, c'est le nombre de maxima de champ par seconde. Elle est égale à la fréquence du générateur qui a donné naissance à l'onde. L'unité est le Hertz. On la note f.
- **La polarisation :** C'est l'orientation du champ électrique par rapport à l'horizontale.

  Si le champ $\vec{E}$ est parallèle à l'horizontale, on dit que l'onde a une polarisation horizontale.

  Si le champ $\vec{E}$ est perpendiculaire à l'horizontale, on dit que l'onde a une polarisation verticale.
- **La vitesse de propagation :** Dans le vide, une onde électromagnétique se propage à la vitesse de la lumière c = 3.10 ^{8}m/s.

II.2.2. La gestion du spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique regroupe les ondes électromagnétiques en fonction de leur fréquence ou de leur longueur d'onde qui s'étend des rayons γ jusqu'aux très basses fréquences.

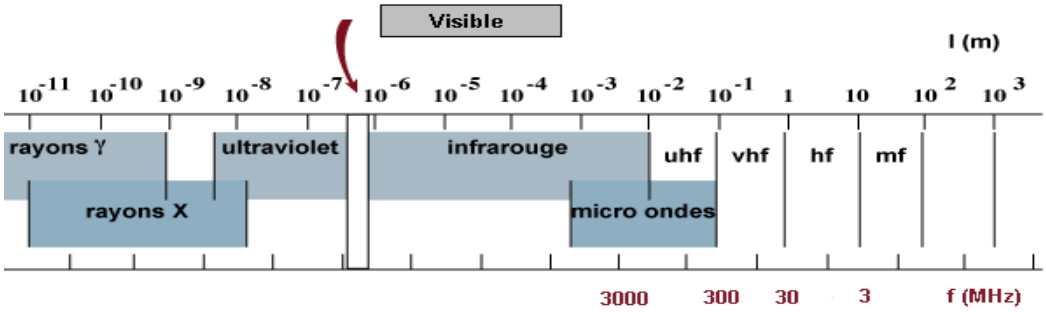


Figure II.2. La gestion du spectre électromagnétique

Chaque système de transmission radio dispose d'une certaine bande de fréquence qui lui est allouée. L'attribution des fréquences s'effectue dans le cadre d'organismes internationaux en particulier la conférence mondiale des radiocommunications (**CMR**) et l'Union internationale de télécommunications (**UIT**) .voir(figure II.2)**.**

II.2.3. Les équations de Maxwell dans le vide

Les ondes électromagnétiques sont régies par les quatre relations de Maxwell :

L'équation de Maxwell Faraday :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad \text{(II.1)}$$

L'équation de Maxwell Ampère :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \qquad \text{(II.2)}$$

L'équation de Maxwell Gauss :

$$\vec{\nabla} \bullet \vec{D} = \rho \qquad \text{(II.3)}$$

L'équation de Maxwell flux magnétique :

$$\vec{\nabla} \bullet \vec{B} = 0 \qquad \text{(II.4)}$$

$\vec{\mathbf{E}}$: Champ électrique (V /m)

$\vec{\mathbf{H}}$: Champ magnétique (A/m)

$\vec{\mathbf{B}}$: Induction magnétique En (Teslas)

$\vec{\mathbf{D}}$: Induction électrique (C/m^2)

$\boldsymbol{\rho}$: Densité volumique de charge (C/m^3)

$\vec{\mathbf{j}}$: Densité de courant de conduction (A/m^2)

$\frac{\partial \vec{\mathbf{D}}}{\partial \mathbf{t}}$: Densité de courant de déplacement (H/m)

II.2.3.1. Relations constitutives dans le vide

Dans le vide, champs et inductions magnétiques pourraient être confondus, il faut donc choisir un système d'unités adéquat.

Dans le système d'unités (SI), $\vec{B}$ et $\vec{H}$ sont reliés par la relation :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \qquad \text{(II.5)}$$

De la même façon, dans le vide, $\vec{D}$ et $\vec{E}$ sont reliés par la relation :

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} \qquad \text{(II.6)}$$

$\mu_0 = 4.\pi.10^{-7}$ N A^{-2} : Perméabilité magnétique du vide ;

$\varepsilon_0 = 8{,}854187.10^{-12}$ (F /m) : Permittivité diélectrique du vide ;

Le produit $\mu_0 \varepsilon_0$ est égal à l'inverse du carré de la vitesse de la lumière dans le vide ; c, mesurée dans le système MKSA. On peut calculer ε_0 à partir des constantes μ_0 et c.

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 . c^2}$$

Dans le vide en l'absence de charge électrique, de courant électrique et en régime harmonique ($\rho = 0$ et $J = 0$), ces équations prennent la forme suivante :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -j\omega\mu_0 \vec{H} \qquad \text{(II.7)}$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = j\omega\varepsilon_0 \vec{E} \qquad \text{(II.8)}$$

$$\vec{\nabla} \bullet \vec{D} = 0 \qquad \text{(II.9)}$$

$$\vec{\nabla} \bullet \vec{B} = 0 \qquad \text{(II.10)}$$

➢ **Equation de propagation**

En combinant correctement les équations de Maxwell, on obtient l'équation de propagation d'ondes ou (équation d'Helmholtz) :

$$\nabla^2 E = \frac{\partial^2 Ei}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Ei}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 Ei}{\partial z^2} = \omega^2 \varepsilon \mu \, E_i \quad \text{et} \quad i=x, y, z \qquad (II.11)$$

Avec :

$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ ⇨ Représente le Laplacien en coordonnées cartésiennes.

On obtient :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t}(\vec{\nabla} \wedge \vec{B})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t}(\vec{\nabla} \wedge \vec{H})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial E^2}{\partial t^2}$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\mu_0 \varepsilon_0 \omega^2 \vec{E}$$

Comme dans l'analyse on a : $\vec{\nabla} \wedge \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = \vec{\nabla}(\vec{\nabla}.\vec{E}) - (\vec{\nabla}.\vec{\nabla})\vec{E}$

On obtient donc : $\vec{E} = \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 \vec{E}$ car $\vec{\nabla}.\vec{E} = 0$

$$\Delta \vec{E} + \mu_0 \varepsilon_0 \omega^2 \vec{E} = 0$$

On prend : $k_0^2 = \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0$

$$\Delta \vec{E} + k_0^2 \vec{E} = 0 \qquad (II.12)$$

$$\Delta \vec{H} + k_0^2 \vec{H} = 0 \qquad (II.13)$$

II.2.4. L'onde plane

L'onde plane est une solution de l'équation de propagation. Une onde est dite plane lorsque l'amplitude est la même pour tout point situé dans un plan normal à la direction de propagation. Cela revient à dire que les champs électriques $\vec{E}$ et magnétiques $\vec{H}$ sont identiques en tous points du plan, appelé plan d'onde.

Les champs électriques et magnétiques sont perpendiculaire entre eux et à la direction de propagation. Ils sont en phase et constants dans tout plan perpendiculaire à la direction de propagation.

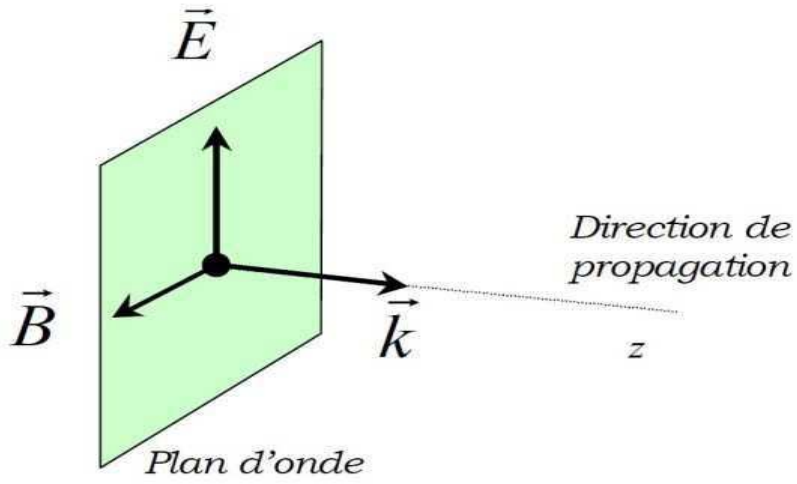


Figure II.3. Représentation d'une onde plane

a) Expression des champs :

Alors : $\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} = 0$

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = -\omega^2 \mu_0 \varepsilon_0 E_x \Leftrightarrow \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} + \omega^2 \mu_0 \varepsilon_0 E_x = 0 \qquad (II.14)$$

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} = -\omega^2 \mu_0 \varepsilon_0 E_y \Leftrightarrow \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} + \omega^2 \mu_0 \varepsilon_0 E_y = 0 \qquad (II.15)$$

b) Vitesse de propagation :

$$C = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\,\varepsilon_0}}$$

C : est une vitesse de propagation de l'onde électromagnétique dans le vide (célérité de la lumière dans le vide), elle vaut environ $c=3.10^8$m/s.

- **La fréquence f :** $f = \frac{\omega}{2\pi}$
- **La longueur d'onde λ :** $\lambda = \frac{c}{f}$
- **Le vecteur d'onde k :** $k = \omega\sqrt{\mu_0\,\varepsilon_0} = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$
- **L'impédance caractéristique du vide :** $Z_o = \frac{E_o}{H_o} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120\pi = 377\Omega$
- **Indice de réfraction :** $n = \frac{c}{v} \Leftrightarrow n^2 = \frac{\varepsilon\,\mu}{\mu_0\,\varepsilon_0}$

  Dans le vide n= 1

Dans un diélectrique $\varepsilon = \varepsilon_0\,\varepsilon_r$ et $\mu = \mu_0\,\mu_r$, on obtient $n = \sqrt{\mu_r\,\varepsilon_r}$

$n = \sqrt{\varepsilon_r}$ pour les matériaux non magnétique car $\mu_r = 1$

II.2.5. Aspect énergétique

- **Densité d'énergie électromagnétique**

$$u_{em} = \frac{1}{2}\varepsilon_0\vec{E}^2 + \frac{1}{2\mu_0}\vec{B}^2 \qquad \text{(II.16)}$$

- Vecteur de Poynting

La puissance qui traverse l'unité de surface du plan d'onde est donnée par le flux de la valeur moyenne du vecteur de Poynting :

$$\langle \vec{P} \rangle = \frac{1}{2} R_e[\overrightarrow{E} \times \vec{H}^*] \qquad (II.17)$$

$\vec{H}^*$: est le conjugué de $\vec{H}$

Le vecteur de Poynting le long de $\breve{z}$:

$$\langle \vec{P} \rangle = \frac{1}{2} R_e[\overrightarrow{E} \times \vec{H}^*] = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\mu_0}} {E_0}^2 = \frac{{E_0}^2}{2z} \qquad (II.18)$$

II.2.6. Polarisation des ondes planes

L'état de polarisation d'une onde électromagnétique se propageant suivant l'axe z peut être décrit par l'extrémité du vecteur champ électrique $\vec{E}$ dans le plan xOy. Trois états de polarisation peuvent être définis: rectiligne, circulaire et elliptique.

II.2.6.1. Polarisation rectiligne

Elle est obtenue quand le champ $\vec{E}$ vibre dans une direction fixe de l'espace, c'est-à dire que Ey (z, t) ou Ex (z, t) est indépendant du temps. Ce cas est obtenu pour un déphasage nul, soit :

$$\varphi = \varphi_x - \varphi_y = 0(2\pi)$$

Cela est équivalent à dire qu'une des deux composantes du champ est nulle. En effet, par rotation des axes autour de Oz, il est possible d'amener le vecteur $\overrightarrow{u_x}$ selon la direction de $\vec{E}$ par un choix d'axe convenablement effectué, et on a ainsi :

$$\vec{E} = E_\circ \cos(\omega t - kz)\, \overrightarrow{u_x}$$

Dans les systèmes de transmission utilisant une antenne, on parle de « polarisation horizontale » ou de « polarisation verticale », selon que le champ électrique est parallèle ou perpendiculaire à la surface de la terre.

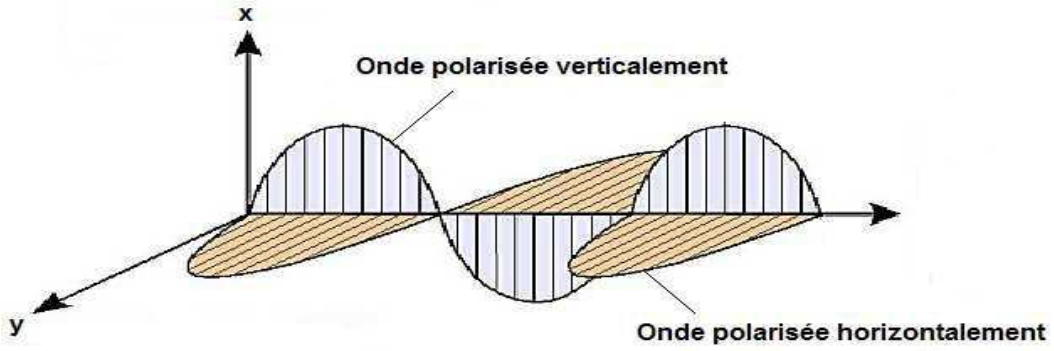


Figure II.4. Polarisation rectiligne

II.2.6.2. Polarisation elliptique

Dans ce cas l'extrémité du vecteur $\vec{E}$ dans un plan z = cte décrit une ellipse. On parle de polarisation elliptique droite (gauche) si l'ellipse est décrite au cours du temps. En effet, la différence de phase θ entre les deux composantes est quelconque lorsque $Ex \neq Ey$.

II.2.6.3. Polarisation circulaire

C'est un cas particulier de la polarisation elliptique, obtenu quand :

$$\varphi_x - \varphi_y = \pm\frac{\pi}{2} \text{ et } Ex_0 = Ey_0$$

C'est-à-dire que les deux composantes sont en quadrature temporelle et ont la même amplitude. De même que la polarisation elliptique, la polarisation circulaire peut être droite ou gauche suivant le sens de parcours du cercle (Fig. ci dessous).

La polarisation est circulaire si $Ex_0 = Ey_0$:

Polarisation droite pour $\varphi = \varphi_x - \varphi_y = -\frac{\pi}{2}$

Polarisation gauche pour $\varphi = \varphi_x - \varphi_y = +\frac{\pi}{2}$

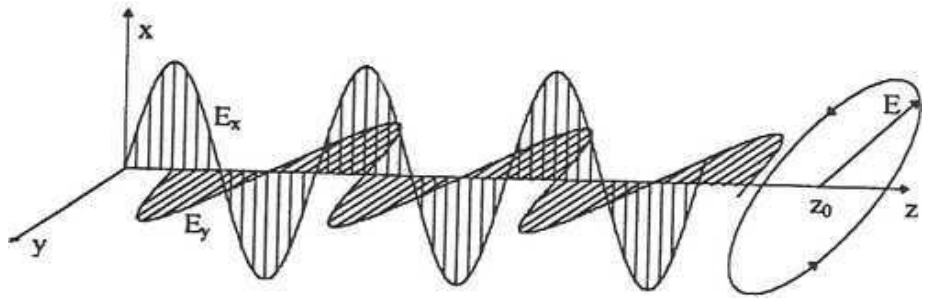


Figure II.5. Polarisation circulaire

II.3. La propagation dans l'environnement terrestre

Lorsqu'on effectue sur la terre une transmission entre un émetteur et un récepteur, le récepteur reçoit une onde directe émise par l'émetteur mais aussi une onde réfléchie.

La réflexion peut se faire sur la terre, sur la mer, mais parfois aussi sur les hautes couches de l'atmosphère (ionosphère).

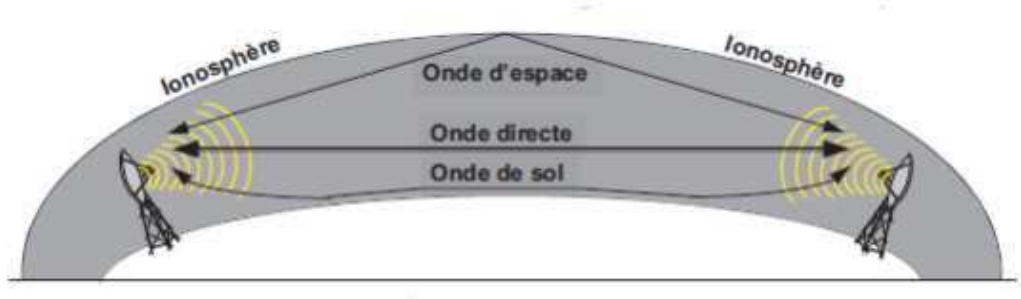


Figure II.6. Propagation des OEM dans l'environnement terrestre

II.3.1. Atmosphère terrestre

L'atmosphère terrestre est essentiellement constituée d'un mélange gazeux, l'air. Ce mélange comprend surtout de l'azote et de l'oxygène. Pour le reste, soit 1 %, on y trouve de l'argon, du dioxyde de carbone et des traces infimes de néon, krypton, hélium, ozone, hydrogène, xénon ainsi que les différents rejets de la biosphère.
Cette composition est quasiment constante jusqu'à 85 km d'altitude, sauf pour l'ozone qui est surtout présent entre 30 et 40 km d'altitude et qui est responsable de la remontée en température dans la stratosphère où il absorbe le rayonnement solaire.

II.3.1.1.Les différentes couches de l'atmosphère terrestre

a-La troposphère : C'est la couche la plus proche de la surface de la Terre. Sa température diminue de 6,5 °C par km d'altitude. Son épaisseur moyenne est de 13 km. C'est dans la troposphère que les phénomènes météorologiques tels que les précipitations, les tornades et les éclairs se déroulent. C'est également là que s'accumulent les gaz polluants issus des activités humaines.

b-La stratosphère : C'est une couche qui monte jusqu'à une altitude de 50 km, où la température est proche de celle de la surface terrestre. La température augmente progressivement dans la stratosphère car la couche d'ozone absorbe le rayonnement solaire. Le célèbre trou de la couche d'ozone se situe également dans cette couche.

C-L'ionosphère : L'ionosphère est une région de la haute atmosphère terrestre, s'étend de 50 km et 1000 km d'altitude; elle est exposée au rayonnement solaire ainsi qu'aux rayons cosmiques et aux météorites qui provoquent l'ionisation des molécules, c'est-à-dire l'arrachement des électrons des couches extérieures de la molécule; les particules chargées négativement (électrons) et positivement (ions) ont

tendance à se concentrer en couches ionisées qui vont jouer un rôle très important dans la propagation des ondes, principalement des ondes HF. On distingue généralement trois couches aux propriétés propres vis-à-vis de la propagation des ondes :

✓ **Couche D :** Elle est la plus proche de la surface de la Terre. Son altitude est entre 50 km et 90 km. Du fait de la forte densité des gaz, le processus de recombinaison est très actif. La densité électronique est très faible. Cette couche est surtout présente durant la journée, mais le rayonnement cosmique maintient une ionisation résiduelle durant la nuit. Elle ne reflète pas les ondes HF mais elle les absorbe, principalement à basses fréquences. En conséquence, l'absorption est plus faible durant la nuit, ce qui explique la meilleure propagation des stations AM durant la nuit.

✓ **La couche E :** La région E est située à une hauteur d'environ de 110 km et d'épaisseur de 25km .Elle permet des propagations à grande distance avec plusieurs réflexions successives. Elle existe le jour et disparaît en partie la nuit ce qui réduit la gamme de fréquence réfléchies mais les ondes longues et moyennes passent toujours tandis que les ondes courtes trop courtes (fréquences élevées) vont tout et se perdent.

✓ **La couche F :** Cette couche est située au dessus de la couche E , Pendant le jour, il y a deux couches F1 et F2 :

- Sous-couche F1 hauteur 200 km
- Sous-couche F2 hauteur 300 km

Ces couches étant directement exposées au rayonnement du soleil ; sont les plus ionisées et ce sont celles qui permettent la réflexion des fréquences les plus élevées. Elle est bien ionisée pendant le jour et moins la nuit. Les couches F1 et F2 fusionnent en une couche F la nuit.

D-L'exosphère : C'est la couche ultime de l'atmosphère. La première barrière s'étend de 500 à 3500 km alors que la deuxième barrière s'étend de 12000 à 50000km, elles sont constituées principalement d'électrons et de protons venant du soleil et piégés par le champ magnétique terrestre. On connaît mal les propriétés de cette couche. Elle joue peu de rôle dans la propagation des ondes .

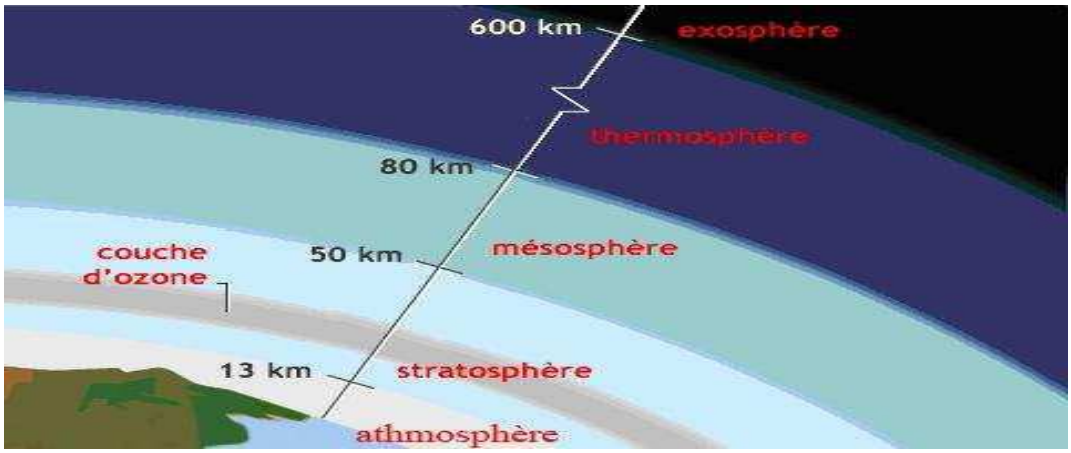


Figure II.7. Couches atmosphériques

II.3.2 Les types de propagation

Entre une antenne d'émission et une antenne de réception, situées au voisinage de la terre, une onde électromagnétique peut suivre différents types de propagation :

II.3.2.1 La propagation troposphérique

Les ondes radio se propagent en ligne droite dans le vide ; ceci est également vrai dans l'air si la densité de l'air est homogène. Cependant comme la densité de l'air diminue avec l'altitude, le trajet des ondes sera légèrement incurvé vers la terre.

II.3.2.1.1.La contrainte de la propagation troposphérique

En propagation troposphérique, les ondes accomplissent la totalité de leurs trajets dans la couche la plus basse de l'atmosphère, très près du sol. L'onde sera donc influencée par les phénomènes atmosphériques (pluie, brouillard, etc..) par les

obstacles naturels (montagnes, forêts,..) et artificiels (bâtiments élevés). L'oxygène est la vapeur d'eau absorbent peu d'énergie aux fréquences radio.

L'horizon radio, c'est à dire la distance maximale D à laquelle une antenne située au niveau du sol pourra recevoir le signal émis par une antenne située à une hauteur He, est donné par la formule approchée :

$$D = \sqrt{2RHe} \qquad (II.19)$$

R est le rayon de la Terre = 6366km

Si l'antenne de réception est à la hauteur Hr , la distance maximale pour une communication devient :

$$Dmax = \sqrt{2RHe} + \sqrt{2RHr} \qquad (II.20)$$

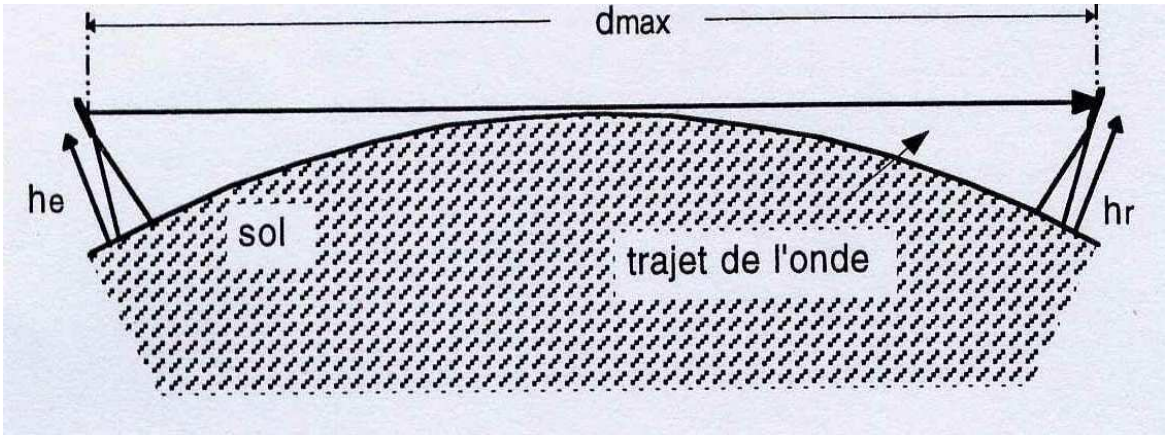


Figure II.8. Portée d'une transmission troposphérique

- **L'effet fantôme : une première cause d'interférences**

Quant aux obstacles, ils peuvent se comporter soit comme des écrans, créant une zone d'ombre, soit comme des réflecteurs, s'ils comportent des éléments métalliques (béton armé, châssis métallique,..). On constate alors parfois des effets fantômes, crées par une interférence entre une onde captée directement et

une onde captée après réflexion avec un obstacle. Le résultat sur l'écran de télévision est une image atténuée et légèrement décalée par rapport à l'image principale.

❖ **L'effet du sol : une cause majeure d'interférences**

Cet effet, qui peut être très gênant, est dû à la présence d'une onde réfléchie par la surface terrestre : en effet, les deux ondes auront parcourues un chemin presque égal, mais la composante horizontale du champ électrique aura été déphasée de 180 degrés lors de la réflexion sur le sol. La composante horizontale du champ électrique au niveau de l'antenne sera donc fortement réduite.

➢ **Les facteurs qui réduisent les interférences**

Ces facteurs diminuent en fait l'intensité de l'onde réfléchie et donc les interférences:

✓ sol peu conducteur dans la zone ou s'opère la réflexion;

✓ présence d'obstacles sur le trajet du chemin réfléchi ;

✓ emploi d'antennes très directives qui envoient peu d'énergie en direction du sol, ceci n'est réalisable qu'aux très hautes fréquences.

II.3.2.2.Propagation par onde de surface ou de sol

Lorsque l'antenne d'émission est verticale et proche du sol, l'onde électromagnétique quittant l'antenne est polarisée verticalement. Comme la direction de propagation de l'onde est toujours perpendiculaire au champ électrique $\vec{E}$, l'onde quitte l'antenne parallèlement au sol. Cependant, l'angle entre $\vec{E}$ et la surface du sol peut se modifier en raison du relief ou de la composition de l'atmosphère. En effet, la densité de l'atmosphère diminue avec l'altitude, or la vitesse de l'onde augmente légèrement lorsque la densité de l'air diminue. Par conséquent, l'onde se propageant à une certaine altitude a tendance à se propager un peu plus vite que l'onde au voisinage du sol, ceci entraîne une inclinaison progressive du front d'onde.

A une certaine distance de l'antenne, le champ électrique $\vec{E}$ comportera donc, outre la composante perpendiculaire au sol, une composante horizontale. Mais cette composante horizontale induit un déplacement des charges dans le sol, ce qui provoque des pertes et atténue donc fortement cette composante. Il reste donc seulement la composante verticale de $\vec{E}$, la direction de propagation de l'onde se modifie donc pour rester parallèle à la surface du sol. C'est essentiellement ainsi que sont diffusées les grandes ondes.

II.4.Transmission par faisceaux hertziens

II.4.1.Définition

Un faisceau hertzien est un système de transmission de signaux, numériques ou analogiques, entre deux points fixes. Il utilise des ondes radioélectriques très fortement concentrées à l'aide d'antennes directives. La directivité du faisceau est d'autant plus grande que la longueur d'onde utilisée est petite et que la surface de l'antenne émettrice est grande.

Le faisceau est un support de type pseudo-4 fils. Les deux sens de transmission sont portés par des fréquences différentes.

II.4.2.Principe d'un faisceau hertzien

Les télécommunications hertziennes permettent des liaisons point fixes à point fixe (relais téléphoniques, relais de télévision, etc.) ou entre mobiles. La souplesse de l'infrastructure nécessaire permet de desservir des zones géographiques impropres aux communications filaires. En contrepartie, l'encombrement spectral limite le nombre des canaux de communication et ce d'autant plus que l'atmosphère impose ses propres contraintes. Les fréquences des systèmes de télécommunication sont donc attribuées par des organismes de normalisation tels que l'UIT-R et l'IFRB

(International Frequency Registration Board).Selon la forme (numérique ou analogique) sous laquelle se présente ces informations, différents types de modulation sont utilisés, d'une part pour former le multiplex et d'autre part pour transposer le spectre des signaux dans la gamme de fréquence appropriées pour l'émission.

➢ **Faisceau hertzien numérique**

Il permet le multiplexage temporel des voies téléphonique numérisé par une modulation MIC ou de données numérique puis transposition en hyperfréquences par modulation (analogique discrète) d'une porteuse sinusoïdale en PSK, MSK, QAM.

II.4.3. Affectation des fréquences dans les faisceaux hertziens

Il est nécessaire de planifier l'utilisation des fréquences. Pour cela il est possible de jouer sur le plan de fréquence proprement dit, mais aussi sur l'utilisation des polarisations verticale (V) ou horizontale (H) en utilisant les découplages d'antenne pour augmenter la capacité des liaisons.

➢ **Utilisation d'un seul couple de fréquences**

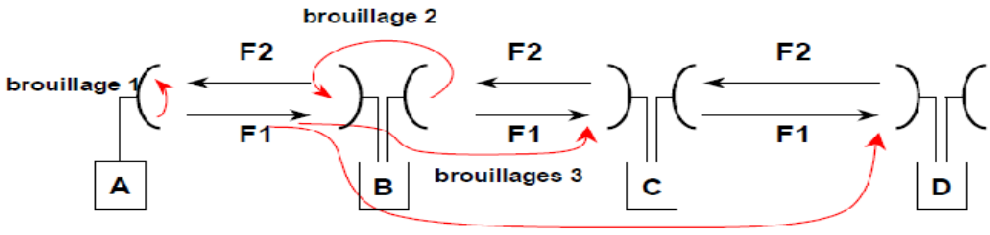


Figure II.9. Utilisation d'un seul couple de fréquences

Brouillage 1 : Le niveau fort F1 perturbe la réception du niveau faible F2 (filtrage insuffisant) ;

Brouillage 2 : Le niveau fort F1 perturbe la réception du niveau faible F1 (lobe arrière de l'antenne) ;

Brouillage 3 : Le niveau faible F1 perturbe la réception du niveau faible F1(résistance aux brouilleurs co-canal) ;

- **Canal émission commun aux deux sens dans une station**

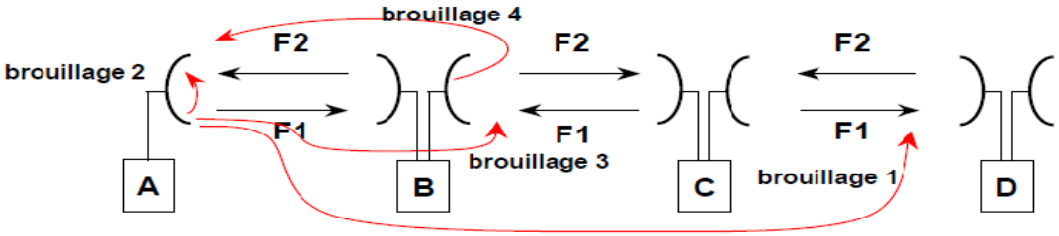


Figure II.10. Canal émission commun aux deux sens dans une station

Brouillage 1 : Brouillage de la réception en D par l'émission en A ;

Brouillage 2 : Le niveau fort F1 perturbe la réception du niveau faible F2;

Brouillage 3 : Le niveau faible F1 perturbe la réception de l'autre niveau faible F1 (lobe arrière de l'antenne) ;

Brouillage 4 : Brouillage émis en B par le lobe arrière de l'antenne .

- **Réduction des brouillages**

Alternance des fréquences émission et réception d'un relais à l'autre, croisement des polarisations.

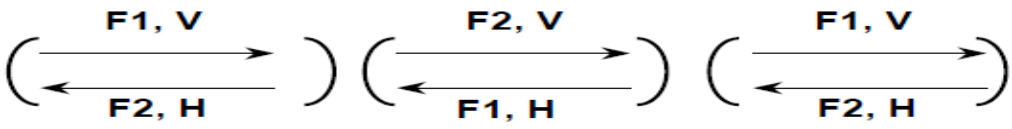


Figure II.11. Réduction des brouillages

Emploi d'antennes très directives et ayant des lobes latéraux suffisamment bas utilisation de deux canaux différents pour la transmission bilatérale d'un signal.

➢ **Séparation des demi-bandes émission/réception**

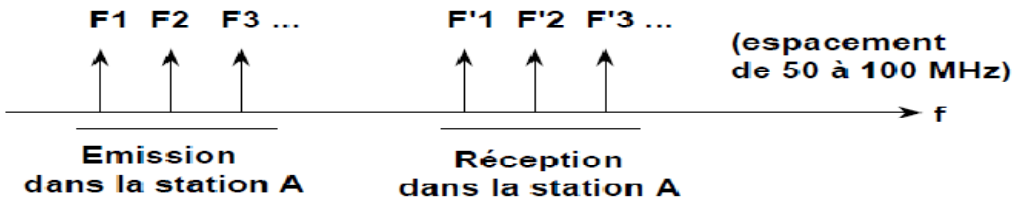


Figure II.12. Séparation des demi-bandes émission/réception

-Grouper dans chaque station, d'une part tous les canaux servant à l'émission et d'autre part ceux servant à la réception ;

-Eloigner ces deux groupes pour qu'ils puissent être séparés par filtrage ;

-Il faut une antenne et deux guides d'ondes par station.

➢ **Alternance des polarisations verticale et horizontale**

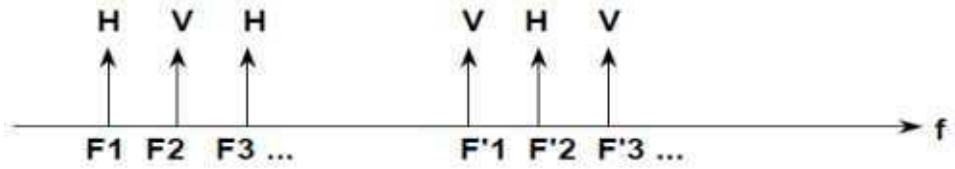


Figure II.13. Alternance des polarisations verticale et horizontale

Chaque guide d'onde n'achemine qu'un seul sens de transmission il faut deux antennes et quartes guides d'onde par station et par direction.

II.4.4.Propagation en visibilité

La présence de la terre et de l'atmosphère met en jeu différents mécanismes physiques : la réflexion, la réfraction, la diffraction, l'absorption qui vient modifier les conditions de propagation et influencer le niveau du champ reçu même si les deux extrémités de la liaison sont en visibilité directe, Pour déterminer si la propagation se fait dans des conditions de propagation en visibilité directe (Line Of Sight), il convient de considérer les Ellipsoïdes de Fresnel.

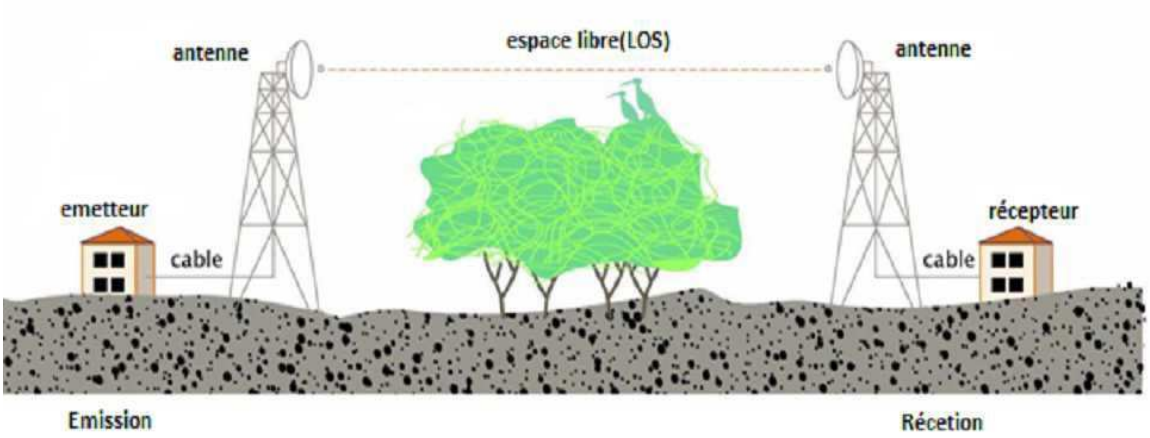


Figure II.14.Dégagement de la ligne de visibilité

II.4.5.Ellipsoïdes zone de Fresnel

On dit qu'une liaison est en visibilité directe si elle est suffisamment dégagée de tout obstacle à l'intérieur d'un certain volume appelé premier ellipsoïde de Fresnel, ayant pour foyer les antennes d'émission et de réception. Cela se passe de telle sorte que la somme des distances d'un point de l'ellipsoïde aux antennes d'émission E et de réception R dépasse d'une demi-longueur d'onde la distance entre ces antennes.

Le premier ellipsoïde de Fresnel délimite la région de l'espace où est véhiculée la plus grande partie de l'énergie du signal. Se situer dans cet ellipsoïde revient à se retrouver dans les conditions de la propagation en espace libre. Ce dégagement signifie que les phénomènes de diffraction par les obstacles éventuels situés au

voisinage du trajet ont une influence négligeable sur le niveau de réception. En pratique le dégagement du premier ellipsoïde de Fresnel est nécessaire et suffisant pour que la liaison soit de bonne qualité.

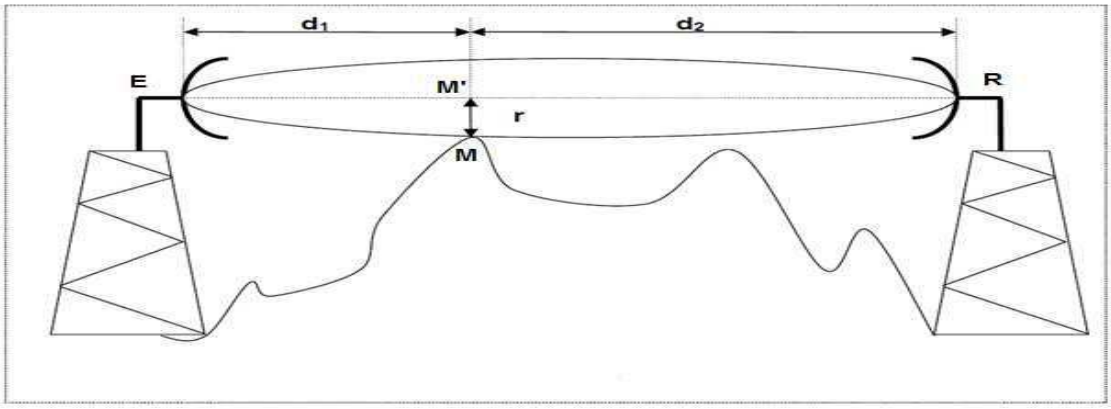


Figure II.15.L'ellipsoïde de Fresnel

L'équation du premier ellipsoïde de Fresnel est donnée par :

$$EM + MR = ER + \frac{\lambda}{2} \qquad (II.21)$$

Le rayon du n^{ième} ellipsoïde en un point du parcours situé à la distance d1 de E et à la distance d2 de R est donné par la relation suivante :

$$r_n = \sqrt{\frac{n\lambda d1 d2}{d1+d2}} \qquad (II.22)$$

n est un nombre entier qui caractérise l'ellipsoïde considéré (n = 1 correspond au premier ellipsoïde de Fresnel)

Le rayon du 1er ellipsoïde est égal à :

$$r = \sqrt{\frac{\lambda d1 d2}{d1+d2}} \qquad (II.23)$$

r : rayon de l'ellipsoïde,

d_1 : distance entre l'émetteur E et le point M',

d_2 : distance entre le récepteur R et le point M',

λ : Longueur d'onde de fonctionnement.

Rayon équatorial : $d1 = d2 = \frac{d}{2}$

$$r_{eq} = \sqrt{\frac{\lambda\frac{d}{2}\times\frac{d}{2}}{\frac{d}{2}+\frac{d}{2}}} = \sqrt{\frac{\lambda d}{4}} = \frac{1}{2}\sqrt{\lambda d}$$

La valeur maximale au milieu du trajet du rayon du 1er ellipsoïde est donc :

$$r_{eq} = r_{max} = \frac{1}{2}\sqrt{\lambda d} \qquad (II.24)$$

Normalisation :

$$\frac{r}{r_{eq}} = \sqrt{\frac{\lambda d1 d2}{d1+d2}} \times \frac{2}{\sqrt{\lambda d}} = 2\sqrt{\frac{d1d2}{d(d1+d2)}} = 2\sqrt{\frac{d1d2}{(d1+d2)^2}} = 2\frac{\sqrt{d1d2}}{(d1+d2)}$$

Sachant que : $d = (d1 + d2)$

Alors on obtient :

$$\frac{r}{r_{eq}} = 2\frac{\sqrt{d1d2}}{d} \qquad (II.25)$$

Dans le cas où la courbure de la terre est négligée, la première zone de Fresnel est l'intersection du plan du 1er ellipsoïde de Fresnel définie par l'une des extrémités de la liaison et le point symétrique de l'autre extrémité par rapport au plan de propagation.

II.4.6. Les facteurs pouvant affecter la propagation

II.4.6.1. Réfraction atmosphérique

Le volume de Fresnel toutefois n'est pas fixe, il faut tenir compte pour la définition de cette zone des conditions de l'atmosphère le long du trajet de l'onde. En effet, les rayons ne se propagent pas en ligne droite, mais suivent préférentiellement les zones de fort indice électromagnétique, soit les couches de l'atmosphère les plus denses.

- **L'indice de réfraction de l'air** : dépend directement de sa densité, qui varie avec l'altitude et la température. L'indice de réfraction diminue avec l'altitude. La diminution moyenne est linéaire en première approximation (voir la figure II.16).

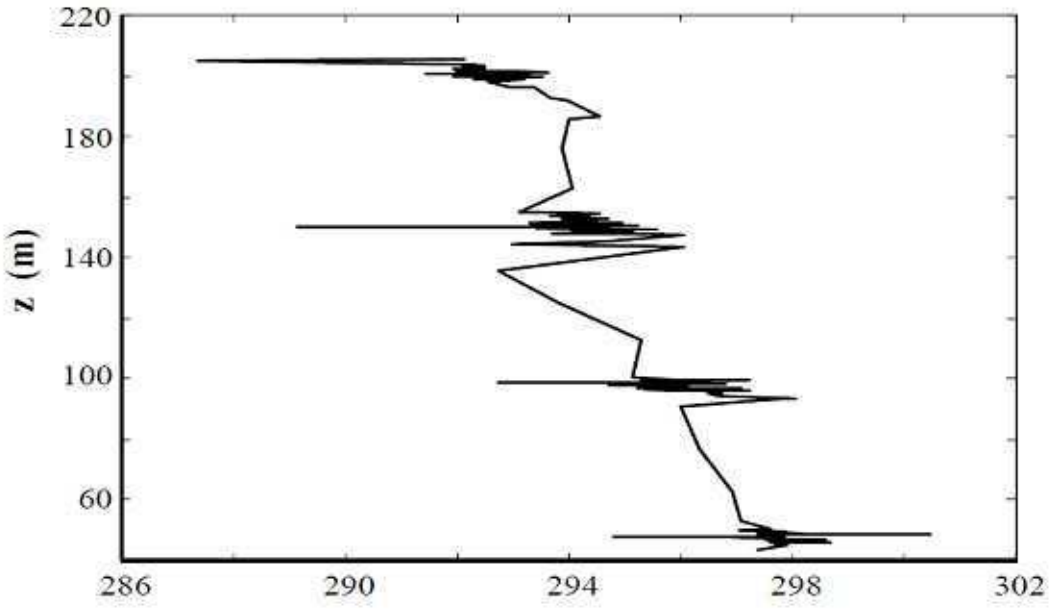


Figure II.16. Indice de réfraction réduit N mesurée en basse atmosphère

La direction de propagation est déviée vers l'indice le plus grand, c'est à dire vers le sol. Les ondes se propagent donc avec une courbure dans le même sens que la courbure terrestre. Dans la troposphère, les ondes peuvent être très perturbées par la variation de la température et l'humidité. On rencontre une croissance de l'indice

de réfraction dans certaines couches de l'atmosphère. Par conséquent, la visibilité directe est perturbée.

II.4.6.2.Dégagement/ diffraction

L'ellipsoïde de Fresnel est parfois partiellement obstrué par un obstacle. On distingue habituellement trois types d'obstacle :

- lame, pour des obstacles « minces » ;
- rugueux, pour une paire d'obstacles de type « lame » ;
- sphérique, pour des obstacles obstruant le faisceau sur une distance importante.

Pour chacun, des méthodes de calcul permettent de prévoir l'atténuation supplémentaire à prendre en compte dans les bilans.

II.4.6.3.Réflexion, trajets multiples

Le signal reçu est la somme du signal principal, et de tous les signaux réfléchis (sur le sol, la végétation, et surtout les étendues d'eau) propagés selon des chemins différent, appelés " trajets multiples ". Les interférences générées entre tous ces signaux entraînent des sur-champs et des sous-champs parfois extrêmement importants mais également des distorsions (évanouissements sélectifs).La réflexion principale est le phénomène de multi-trajet dominant. Il existe cependant d'autres cas d'importance.

On parle de multi trajets lorsqu'au point de réception l'onde émise arrive par des trajets différents suite à des réflexions. Le multi trajet est à l'origine du fading à la réception.

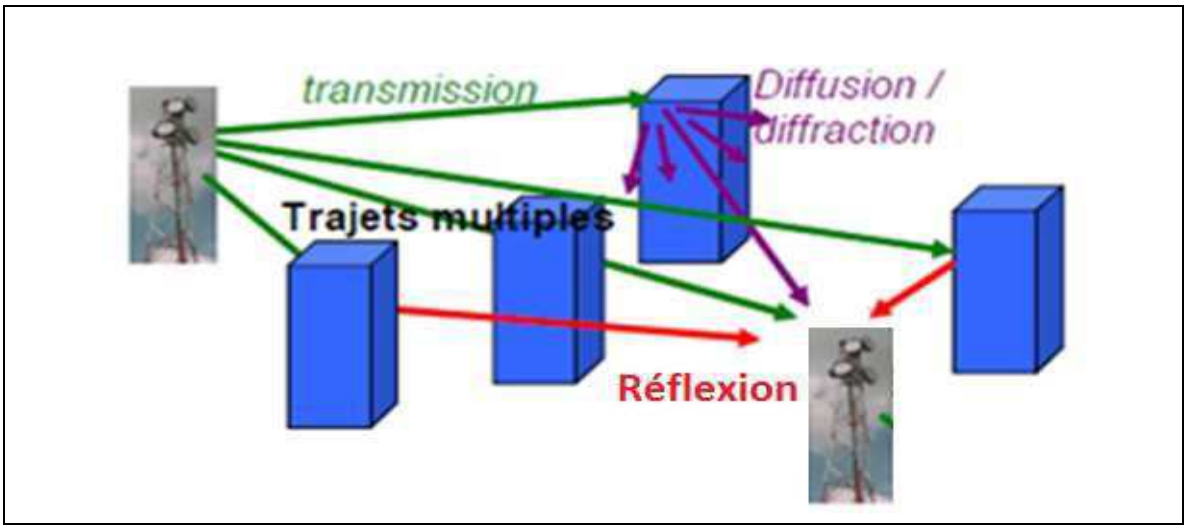


Figure II.17. Propagation par diffraction et trajets multiples

II.4.7. Atténuation des ondes dans l'atmosphère

L'atténuation des ondes dans l'atmosphère est due à deux causes principales :

- Une absorption par les gaz atmosphériques ;
- Une absorption et une diffusion par les particules liquides et solides dans l'atmosphère, et principalement par les gouttes de pluie.

➢ Atténuation par les gaz

Aux fréquences inférieures à 15Ghz, l'affaiblissement dû aux gaz atmosphériques est négligeable. Deux pics d'absorption apparaissent à 22GHZ et 60GHZ dus respectivement à la fréquence de résonance des vapeurs d'eau et des molécules d'oxygène .

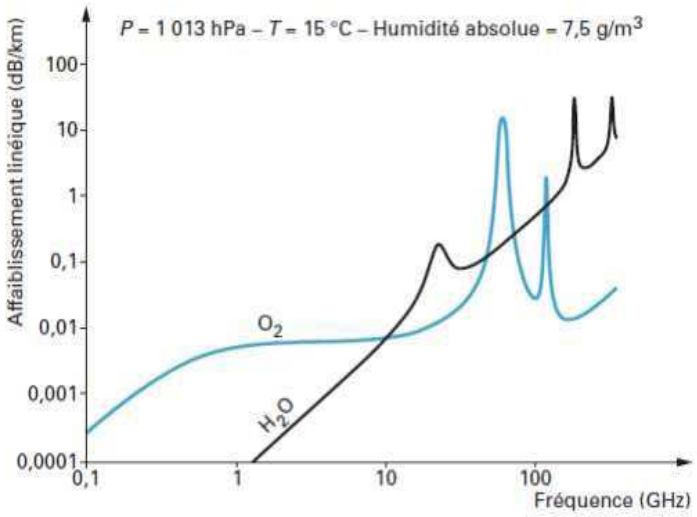


Figure II.18. Affaiblissement linéique dû aux gaz de l'atmosphère

➢ **Atténuations dues aux hydrométéores**

Pour les FH de fréquence supérieure à 8 GHz, les précipitations entraînent des pertes également considérables, d'autant plus que le taux de précipitation (en mm/h) et la fréquence sont élevés. L'intensité de pluie varie de 22 à 60 mm/h; 0,01% de l'année moyenne. De plus la phase de ces précipitations influence également l'atténuation du signal. Ainsi la neige, qui a une très petite constante diélectrique, a beaucoup moins d'influence que des gouttes de pluie de même masse. La neige fondante, d'autre part, allie le large diamètre des flocons et le coefficient de la pluie pour créer des obstacles plus important que les deux séparément que l'on nomme bande brillante. Ainsi le passage d'une onde de 10 cm dans cette bande rencontre de trois à 30 fois plus d'atténuation que dans la pluie sous la bande. L'atmosphère contient des gouttes d'eau qui provoquent une atténuation importante pour les ondes radioélectriques de fréquence supérieure à 1 GHZ. L'atténuation due à la pluie a deux origines :

• L'absorption de l'énergie par perte ohmique dans les gouttes d'eau ;

• Une diffusion de l'énergie par ces gouttes d'eau.

Cette atténuation ne se manifeste qu'en présence d'une pluie d'intensité significative. Voir le (tableau II.1) et la (figure II.19).

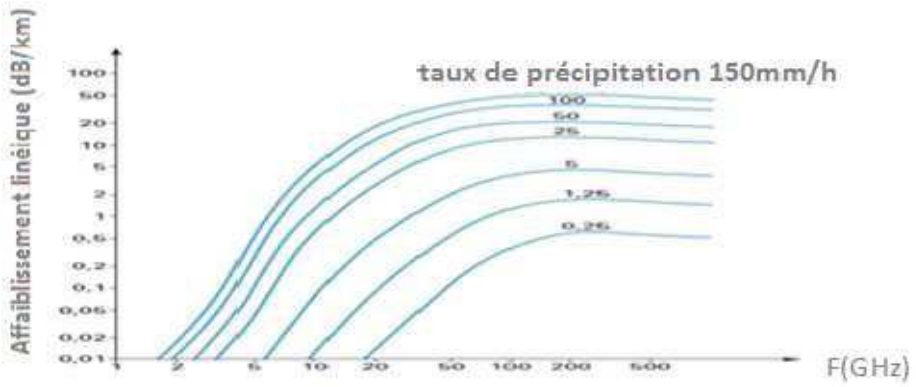


Figure II.19 . Affaiblissement linéique dû à la pluie en fonction de la fréquence pour différents taux de précipitation (UIT-R P. 838)

	Affaiblissement (dB/km)			
Fréquences / Nature de la pluie	6 GHZ	10 GHZ	20 GHZ	40 GHZ
Pluie fine 0,25 mm/h	Négligeable	Négligeable	0.013	0.07
Averse 5 mm/h	0,012	0,089	0,45	1,5
Orage 50 mm/h	0,22	1,2	5,5	13
Fort orage 150 mm/h	1,2	5,5	18	27

Tableau II .1. Atténuation due à la pluie

- **Atténuation due au brouillard et aux nuages**

Dans le cas de nuages ou de brouillard composé entièrement de gouttelettes minuscules, d'un diamètre généralement inférieur à 0,01cm, on peut exprimer l'affaiblissement en fonction de la teneur totale en eau par unité de volume.

L'affaiblissement linéique dans de tels nuages ou un tel brouillard s'exprime alors par la formule :

$$\gamma_c = K_1 M$$

avec :

- γ_c: affaiblissement linéique (dB/Km) à l'intérieur du nuage ;
- K_1 : coefficient d'affaiblissement linéique (dB/Km) / (g/m^3) ;
- M : teneur du nuage en eau liquide (g/m^3).

Aux fréquences de l'ordre de 100 GHz et aux fréquences supérieures, l'affaiblissement par le brouillard peut devenir important. La teneur en eau liquide du brouillard est typiquement égale à environ 0,05 g/m^3 pour un brouillard modéré (visibilité de l'ordre de 300m) et de 0,5 g/m^3 pour un brouillard épais (visibilité de l'ordre de 50 m). L'affaiblissement linéique correspondant serait par exemple de 0,4 dB/Km et de 4 dB/Km respectivement, à la fréquence 140GHz. Dans la pratique, les valeurs dépendent des types de brouillard et peuvent être influencées par les anomalies de l'absorption de la vapeur d'eau.

- **Atténuation par Sable et poussière**

L'atténuation est inferieure à 1dB, les contraintes sont essentiellement mécaniques, notamment en présence de vent fort qui peut déséquilibrer l'installation.

II.5.Bilan de liaison des faisceaux hertziens

Dans la réalisation des faisceaux hertziens à visibilité directe, on doit tenir compte de plusieurs effets de propagation, parmi lesquels: Les effets du sol qui sont les phénomènes de réflexion, de diffraction et la propagation par trajet multiple, l'effet de l'atmosphère qui sont les phénomènes de réfraction et d'affaiblissement dû aux gaz

atmosphériques et aux hydrométéores, l'influence des sources perturbatrices naturelles et artificielles. Ces effets dégradent la qualité et la disponibilité du lien FHN.

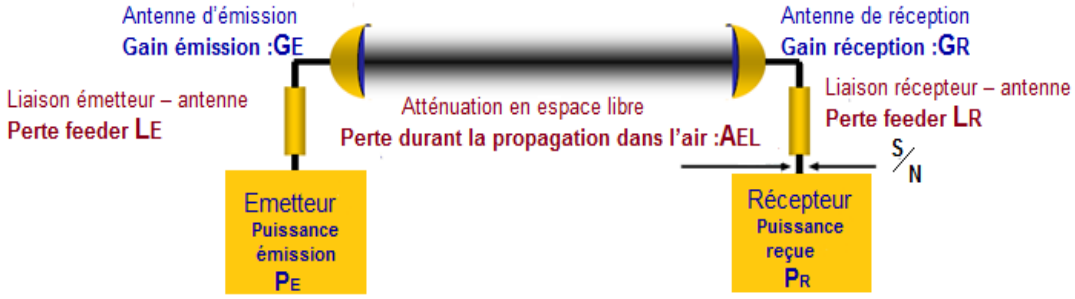


Figure II.20. Schéma illustratif des différentes pertes

Chaque équipement d'extrémité a des caractéristiques quand doit prendre en compte pour le calcul du bilan énergétique, en exprimant les différentes puissances, gains et pertes en dB, il est possible de déterminer la puissance reçue à l'aide de l'équation suivante et donc d'établir un bilan de liaison.

D'une manière générale, la formule utilisée pour déterminer la puissance de réception est :

$$P_R = P_E - L_E + G_E - A_{EL} + G_R - L_R \qquad (II.26)$$

Pour Calculer P_R dit aussi bilan de liaison en espace libre on doit déterminer chaque paramètre constituant la formule (II.26)

Tout calcul de puissance d'émission s'effectue par le passage de la PIRE (puissance isotrope rayonnée équivalente) ; on a par définition du gain G :

$$PIRE = P_E \,.\, G_E \qquad (II.27)$$

Si P_E désigne la puissance de l'émetteur, on doit faire intervenir les taux d'affaiblissement $\frac{1}{L_E}$ dus aux feeders. Dans ce cas on écrira :

$$PIRE = \frac{P_E \cdot G_E}{LE}$$

qui donne en niveaux :

$$PIRE(dB) = P_E + G_E - LE \qquad (II.28)$$

La puissance reçue par la parabole de réception située à une distance d est le flux du vecteur de Poynting au travers de son aire équivalente A_R soit :

$P_R = S \cdot A_R$ d'où $S = \frac{PIRE}{4\pi d^2}$ (loi de la photométrie isotrope)

On obtient alors: $$P_R = \frac{A_R.PIRE}{4\pi d^2} \qquad (II.29)$$

Afin de faire apparaître un terme de gain G_R analogue à celui de l'antenne d'émission, on est amené à écrire par un produit puis une division par le terme $(\frac{4\pi}{\lambda^2})$:

$$P_R = \frac{A_R.PIRE}{4\pi d^2} = \frac{PIRE.A_R.(\frac{4\pi}{\lambda^2}).\lambda^2}{(4\pi d)^2} = \frac{PIRE.G_R.\lambda^2}{(4\pi d)^2}$$

En niveaux : $$P_R = PIRE + G_R + 10 \log \frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2}$$

$$P_R = PIRE + G_R - 20\log \frac{4\pi d}{\lambda}$$

$$P_R = PIRE + G_R - AEL \qquad (II.30)$$

Afin de tenir compte de la réalité des pertes de lignes en réception (guides d'onde et feeders) on utilise dans la pratique le calcul de P_R au niveau de l'entrée du récepteur ; par un raisonnement identique à celui effectué à l'émission, on écrira :

$P_{RdB} = PIRE_{dB} + GR_{dB} - 20\log \frac{4\pi d}{\lambda} - LR_{dB}$ qui se développe enfin sous la forme :

$$P_{RdB} = [PE_{dB} + GE_{dB} - LE_{dB}] + [GR_{dB} - LR_{dB}] - 20\log \frac{4\pi d}{\lambda}$$

$$P_{RdB} = [PE_{dB} + GE_{dB} - LE_{dB}] + [GR_{dB} - LR_{dB}] - AEL\ (dB) \qquad (II.31)$$

Avec la présence sur le trajet du FH d'obstacles ou d'absorbants (hydrométéores) créant un affaiblissement supplémentaire A_S on aura au final :

$$P_R = P_E + (G_E + G_R) - AEL - (L_E - L_R) - A_S \quad (II.32)$$

Dans une liaison sans fil, le signal envoyé par l'émetteur est atténué et la fraction arrivant au récepteur est réduite, malgré les gains des antennes et de l'amplificateur. Le signal est donc dégradé. En outre, divers éléments introduisent une puissance de bruit qui va également dégrader les performances. Dans ce cas, le rapport signal à bruit est exprimé en termes de rapport signal à bruit par bit, qui est directement relié au taux d'erreur binaire. Dans le cas d'un bruit thermique et d'un signal binaire.

Puissance de bruit disponible après l'antenne :

$$P_B = kT_AB \quad (II.33)$$

K : la constante de Boltzmann= 1.28 10^{-23}

T_A : la température du bruit globale du récepteur (290K=17 ^{0})

B_N : la bande de Nyquist B_N = (1.2* Fréquence) /n

Tel que 2n= N, N étant le nombre d'états de phase

$$\text{bruit total: } P_B = k(T_A + T_B)B \quad (II.34)$$

$$\text{or Antenne de gain } G_E \Longrightarrow P_R = G_E \frac{P_E}{4\pi d^2} A_R \quad (II.35)$$

$$\Longrightarrow P_R = G_E \frac{P_E}{4\pi d^2} \frac{\lambda^2 G_R}{4\pi} \text{ d'ou}$$

$$P_R = P_E G_E G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \quad (II.36)$$

$$\Longrightarrow P_{RdBm} = PIRE_{dB} + G_{RdB} - AEL_{dB} \quad (II.37)$$

On a ainsi un rapport $S/N = P_R / P_B$ égal a :

$$\frac{P_R}{P_B} = PIRE \frac{G_R}{(T_A+T_R)} \frac{1}{kB} \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 = \frac{S}{N} \quad (II.38)$$

- $\frac{G_R}{(T_A+T_R)}$:Facteur de mérite de la station de réception

Afin de quantifier la dégradation subie par un signal numérique ou de spécifier la qualité que doit atteindre une transmission numérique, on utilise la notion de taux d'erreur binaire ou Bit Error Rate (BER). Il s'agit du taux d'erreur mesuré à la réception d'une transmission numérique, et se calcule à l'aide de l'équation.

$$BER = \frac{1}{2} * erfc\left(\sqrt{\frac{S}{N}}\right) \quad (II.39)$$

$\frac{S}{N}$: rapport signal à bruit par bit .

Plus la contrainte sur la qualité de service d'une transmission est élevée, plus le BER est faible. Par exemple, la norme GSM spécifie un BER < 1 % pour une puissance reçue > -102 dBm. Le temps de dépassement d'un taux d'erreur donné d'une liaison hertzienne doit être inférieur à la valeur normalisée par le UIT-R (0.054%). Ce temps caractérise l'indisponibilité de la liaison.

II.5.1.Disponibilité

On appelle taux d'indisponibilité, le pourcentage de temps pendant lequel la liaison sera coupée ou fonctionnera de façon dégradée. Ce taux est calculé à partir de la marge obtenue dans le bilan de liaison, en tenant compte, entre autre, des conditions climatiques.

En fonction de ces résultats, on est conduit à modifier le projet, par exemple, en modifiant le diamètre des antennes, en ajoutant une diversité d'espace, voir même diviser la liaison en rajoutant un bond.

II.5.2.Seuils

En général sont définis les seuils suivants dans le système :

- **Surveillance de la propagation**

Seuil de puissance reçue : choix d'une valeur maximale de la marge, au dessus de laquelle l'alarme de puissance reçue est activée.

- **Surveillance de la qualité**

- Demande de commutation anticipée est activé si le champ reçu est inférieur au seuil à 10^{-8} ou si le taux d'erreur est supérieur à 10^{-8}. Cela déclenche une commutation sur le canal secours, quand il existe et si son taux d'erreur est meilleur

- Demande de commutation est activée si le taux d'erreur est supérieur à 10^{6} (alarmes majeure). Cela déclenche une commutation sur le canal secours, quand il existe et si son taux d'erreur est meilleur.

- Une troisième valeur de seuil (de l'ordre de 10^{-3}) définit le seuil de coupure de la liaison suite à une mauvaise qualité de la réception.

II.6. Sensibilité d'un récepteur

La sensibilité d'un récepteur est l'amplitude du signal qu'il faut appliquer à son entrée pour obtenir à la sortie du démodulateur un rapport signal/bruit déterminé (transmission analogique) ou un taux d'erreur donné en transmission numérique (10^{-3} ou 10^{-6}). Une des principales contraintes d'un récepteur concerne sa sensibilité ou seuil de réception.

C'est la puissance minimale en dessous de laquelle la qualité de la liaison est dégradée : craquements importants (« friture ») pour une liaison audio, image dégradée en transmission vidéo (« neige »), taux d'erreur important en transmission numérique (« pixellisation » ou « figeage » de l'image en TV vidéo numérique).

II.7.Les antennes

II.7.1.Définition

L'antenne a un rôle très important dans les liaisons hertziennes : elle assure l'interface entre le circuit électrique et le milieu de propagation. Une antenne est un dispositif réciproque :

En émission, l'antenne reçoit un courant et une tension, elle génère un champ électrique et un champ magnétique.

En réception, l'antenne reçoit un champ électrique et un champ magnétique, elle génère une tension et un courant. Les caractéristiques d'une antenne sont les mêmes si l'antenne est utilisée en émission ou en réception.

II.7.2.Antenne isotrope

L'antenne isotrope est une antenne de référence qui rayonne de la même façon dans toutes les directions alimentée par la puissance P_E. Son diagramme de rayonnement est une sphère centrée sur l'antenne à la distance d, toute la puissance est répartie sur la surface de la sphère. Il permet aussi de définir le gain absolu d'une antenne :

La surface de la sphère est :

$$S_{SPHERE} = 4\pi . d^2 \qquad (II.40)$$

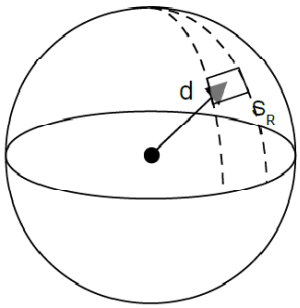


Figure II.21. Antenne isotrope

II.7.3.Les principaux caractéristiques d'une antenne

- **Gain**

On rappelle que l'antenne isotrope émet la même puissance dans toutes les directions de l'espace. Une antenne directive n'émet de la puissance que dans un angle étroit de l'espace. La puissance émise est donc plus forte .C'est le rapport entre la puissance qu'il faudrait fournir à une antenne de référence (antenne isotrope) et celle qu'il suffit de fournir à l'antenne considérée pour produire la même intensité de rayonnement dans une direction donnée (par unité d'angle solide).

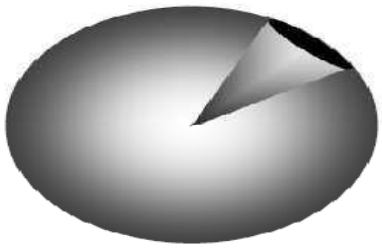


Figure II.22. Gain d'une antenne

Le gain absolu (dans la direction du rayonnement maximum correspondant à l'axe électromagnétique de l'antenne) est défini par :

$$G_{max} = \left(\frac{4\pi}{\lambda^2}\right) A_{eff} \qquad (II.41)$$

A_{eff} : la surface équivalente de l'antenne

Plus l'antenne est directive, plus l'angle d'ouverture est étroit et plus le gain de l'antenne est important.

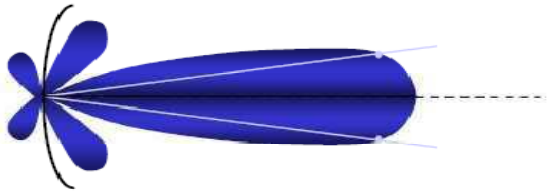


Figure II.23. Champ de fort gain d'une antenne

- **Diagramme de Rayonnement**

L'antenne isotrope n'existe pas et n'est pas réalisable. En réalité, l'énergie rayonnée par une antenne répartie inégalement dans l'espace, certaines directions sont privilégiées : ce sont les lobes de rayonnement.

Le diagramme de rayonnement d'une antenne permet de visualiser ces lobes dans les trois dimensions, dans le plan horizontal ou dans le plan vertical incluant le lobe le plus important. La directivité d'une antenne caractérise la façon dont cette antenne concentre le rayonnement dans certaines directions de l'espace.

C'est la variation du gain en fonction de la direction. On appelle directivité le rapport entre la densité de puissance créée dans une direction donnée et la densité de puissance d'une antenne isotrope.

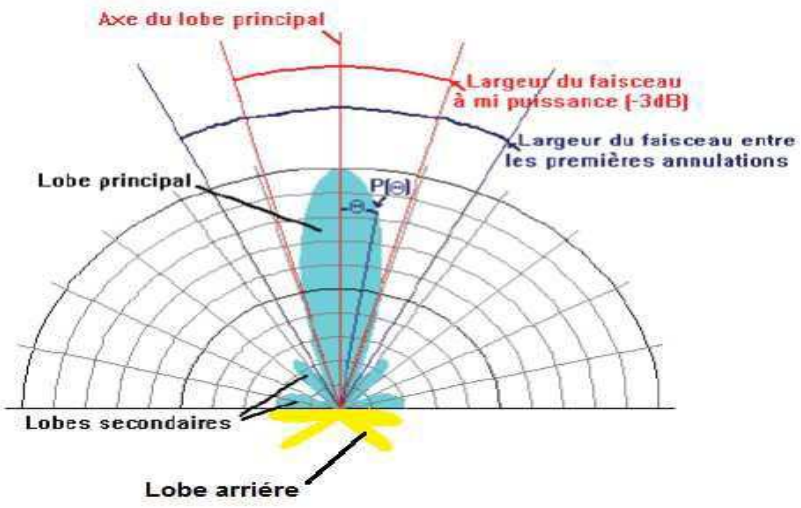


Figure II.24. Le diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement permet de définir de nombreuses caractéristiques de l'antenne. En particulier :

- ✓ **Angle d'ouverture :** L'angle d'ouverture d'une antenne est l'angle de direction pour lequel la puissance rayonnée est la moitié (-3dB) de la puissance rayonnée dans la direction la plus favorable. Il est donc représentatif de la directivité de l'antenne. Plus cet angle est étroit plus l'antenne est directive.
- ✓ **Lobes secondaires :** Un lobe secondaire correspond à un maximum de puissance dans une direction autre que la direction privilégiée. Idéalement, ils doivent être les plus faibles possibles.
- ✓ **Lobe arrière :** Le lobe arrière est un lobe secondaire dans la direction opposée à la direction privilégiée de l'antenne (à l'arrière de l'antenne).

➢ La P.I.R.E

La P.I.R.E (Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente), est une caractéristique importante d'un émetteur. Elle correspond à la puissance émise par l'émetteur, augmentée du gain d'antenne. Lorsqu'une antenne produit une puissance rayonnée P_E, la densité surfacique de puissance créée dans une direction donnée est le produit du gain dans cette direction par la puissance. Elle peut également être définie

par la puissance qu'il faudrait fournir à une antenne ayant un rayonnement isotrope pour produire la même puissance que l'antenne directive dans la direction considérée.

$$P.I.R.E\ (W) = P_E(W).G_E\ (G_E \text{ ici n'est pas en dBi}) \qquad (II.42)$$

➢ **La polarisation**

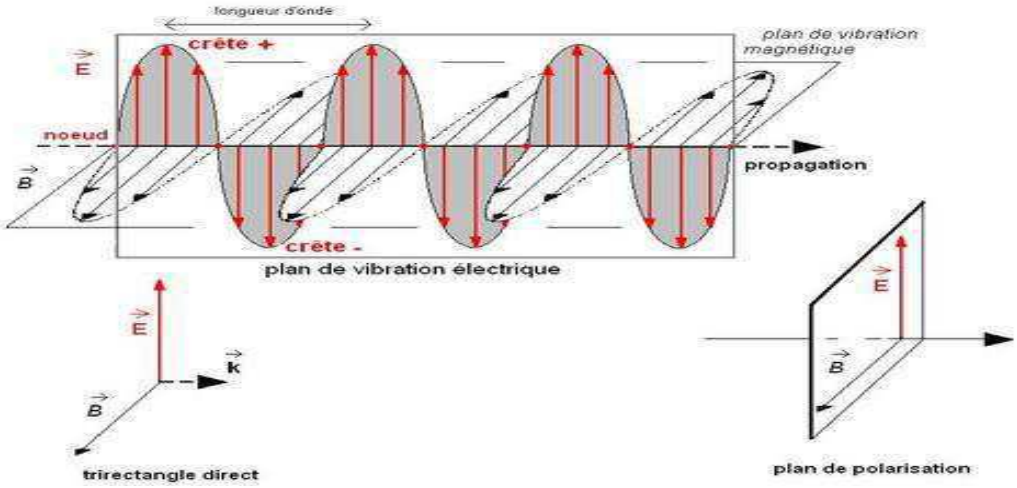


Figure II.25. Plan de vibration électrique

II.7.4.Antenne parabolique

Une antenne parabolique, communément appelée parabole par le grand public, est une antenne disposant d'un réflecteur en forme de parabole.

Les propriétés géométriques de la parabole permettent de concentrer tous les rayons reçus en un point unique appelé foyer.

C'est en ce point que l'on placera une petite antenne (la source) qui est alimentée en émission, et qui capte le signal en réception.

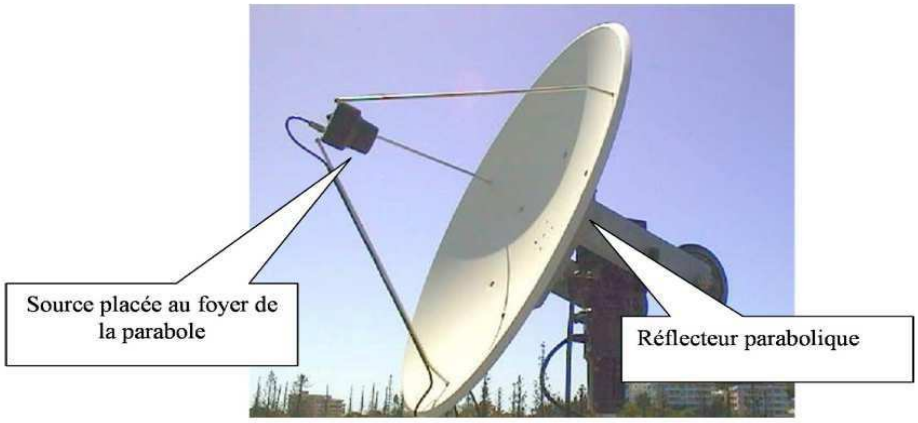


Figure II.26. Antenne parabolique

- **Réflecteur parabolique**

Réflecteur parabolique, en réception, est indiqué pour faire converger toute la puissance d'une onde plane incidente vers un point appelé le point focal d_f. Il faut que cette onde arrive d'une direction particulière sinon la convergence vers un seul point ne sera pas possible. Par réciprocité, une source électromagnétique située au point focal verra la partie de sa puissance capturée par le réflecteur, redirigée vers la direction privilégiée.

La figure (II.26) illustre les divers paramètres géométriques de ce type de réflecteur dans sa version axisymétrique (symétrie par rapport à l'axe z contenant le foyer). Le réflecteur parabolique étant une antenne à ouverture, son étude passe par l'expression des champs électromagnétiques dans le plan de l'ouverture. Il faut alors considérer les trois points suivants :

- L'amplitude des champs dans l'ouverture dépend de la fonction caractéristique de la source primaire ("feed") située au foyer.

Mais cette distribution n'est pas identique car elle implique une conversion des angles d'´emission de la source primaire vers les coordonnées du plan d'ouverture.

- La phase des champs dans l'ouverture est constante car la distance pour se rendre du foyer au réflecteur parabolique et de là, à un point du plan de l'ouverture

ne change pas ; c'est d'ailleurs la caractéristique principale d'une parabole. Le terme de phase peut donc être supprimé.

- L'orientation des champs dans l'ouverture dépend de la polarisation de la source primaire mais la parabole cause une dépolarisation qu'il faudra considérer. Si on visualise par la théorie de l'optique comme sur la figure (II.27), les rayons émis puis réfléchis par la parabole émergeront en formation parallèle. La géométrie est telle que dans le plan de l'ouverture sur cette figure ; les signaux émis du point focal vers le réflecteur, reviennent tous en phase.

Donc :

$\overline{F\,P} = \tilde{r}$ et $\overline{P\,A} = \tilde{r}\cos\tilde{\theta}$

Ainsi :

$$\overline{F\,P} + \overline{P\,A} = (\tilde{r} + \tilde{r}\cos\tilde{\theta}) = \tilde{r}(1 + \cos\tilde{\theta}) \qquad \text{(II. 43)}$$

Dans le cas particulier ou $\tilde{\theta}=0$ on aura : $\overline{P\,A} = \tilde{r} = d_f$

$$\overline{F\,P} + \overline{P\,A} = 2\,d_f \qquad \text{(II.44)}$$

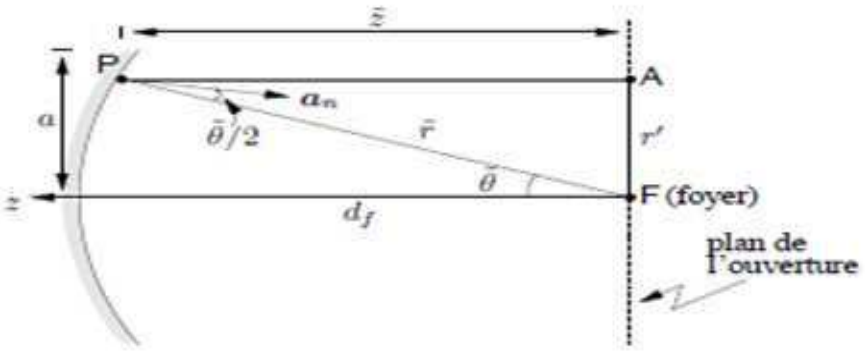


Figure II.27. Géométrie d'une antenne parabolique

Plus le réflecteur sera grand (pour une même géométrie), plus grande sera la puissance capturée donc la surface éffective et la directivité.

- **Source**

La source est une antenne de dimension réduite placée au foyer du réflecteur parabolique. Son rôle est d'éclairer le réflecteur de façon optimum : complètement mais sans déborde

- **Gain parabolique**

Le gain isotrope de l'antenne parabolique dépend principalement de son diamètre et de la fréquence d'utilisation mais aussi, dans une moindre mesure, de l'efficacité du système d'illumination de la parabole par la source (coefficient k) et de la précision de réalisation du réflecteur.

Le gain d'une antenne parabolique est donné par la relation suivante :

$$G_{dBi} = 10.\log K.(\frac{\pi D}{\lambda})^2 \qquad (II.45)$$

Avec :

K : rendement du système d'illumination (source), généralement compris entre 0,5 et 0,8.

D : diamètre du réflecteur parabolique.

λ: Longueur d'onde d'utilisation.

D et **λ** doivent être exprimés dans la même unité.

Les antennes paraboliques sont peu utilisées en dessous de 1 GHz (λ= 0,3m et plus que l'antenne est grande devant la longueur d'onde, plus le gain est important.

- **Angle d'ouverture**

L'angle d'ouverture à -3dB d'une antenne parabolique est lié à la dimension de l'antenne. Plus l'antenne est grande devant la longueur d'onde, plus le gain est important et plus l'antenne est directive.

L'angle d'ouverture est donné par la relation suivante :

$$\theta = \frac{70\lambda}{D} \qquad (II.46)$$

➢ **Polarisation**

La polarisation de la source détermine la polarisation de l'antenne parabolique. Le principe de fonctionnement d'une antenne parabolique est simple et suit la propriété principale de la parabole :

Lorsqu'une source primaire émet des rayons à partir du foyer du paraboloïde vers la face concave de celui-ci, ces rayons, après s'être réfléchis sur cette face, se retrouvent en phase à son ouverture.

Une condition au bon fonctionnement de l'antenne concerne le front d'onde émis par la source primaire qui doit être parfaitement sphérique.

II.8.Types de modulations

Plusieurs types de modulations sont utilisés :

Les modulations les plus simples sont l'ASK (Amplitude Shift Keying), la FSK (Frequency SK) et la PSK (Phase SK).

II.8.1.La modulation d'amplitude ou ASK

La modulation d'amplitude s'applique en faisant varier l'amplitude du signal en fonction des bits à coder.

Par exemple :

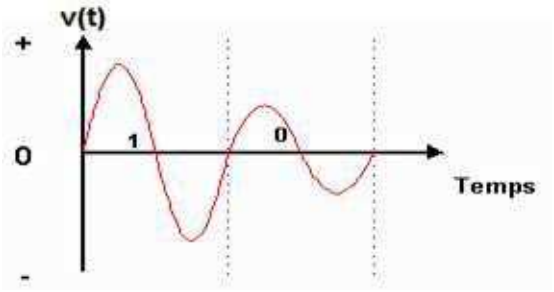


Figure II.28. Modulation d'amplitude ou ASK

II.8.2.La modulation de fréquence ou FSK

En modulation de fréquence, les niveaux logiques sont représentés par la variation de la fréquence de la porteuse. La modulation FSK est utilisée pour des transmissions à faible débit sur le réseau téléphonique commuté.

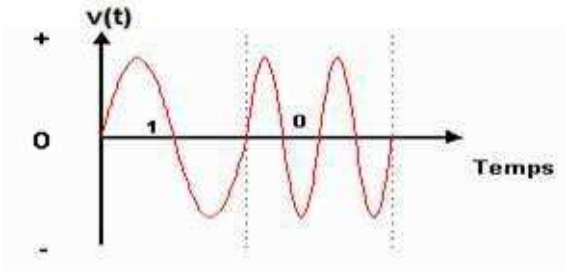


Figure II.29. Modulation de fréquence ou FSK

II.8. 3. La modulation de phase ou PSK

La modulation de phase associe à un code binaire une valeur de la phase de la porteuse. La vitesse peut être facilement augmentée en utilisant un code binaire sur 2, 3 bits ou plus sans augmentation de la fréquence de la porteuse.

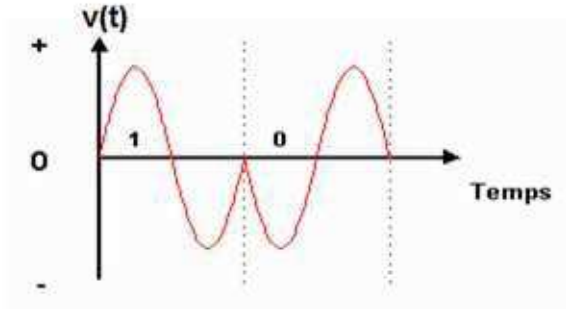


Figure II.30. Modulation de phase ou PSK

D'autres modulations plus élaborées sont possibles. Nous allons voir maintenant l'exemple de la modulation QAM (Quadrature Amplitude Modulation) à 4 états.

II.8.4.Modulation QAM

La modulation QAM (Quadrature Amplitude Modulation) ou modulation d'amplitude en quadrature de phase est une technique qui emploie une combinaison de modulation de phase et d'amplitude. Elle est largement employée par les modems pour leur permettre d'offrir des débits binaires élevés. Prenons par exemple un signal modulé QAM avec 3 bits transmis par baud. Une telle modulation requiert donc 2^3 soit 8 combinaisons binaires différentes. Dans notre exemple, nous prendrons 2 amplitudes combinées avec 4 décalages de phase différents. La table de correspondance pourra être du type :

Groupe de bit	Amplitude	Décalage de phase
000	1	0
001	2	0
010	1	¼
011	2	¼
100	1	½
101	2	½
110	1	¾
111	2	¾

Tableau II.31. Modulation QAM

Exemple de codage de la suite binaire 1 0 0 0 0 1 0 1 1 1 1 0 à partir de la table ci-dessus :

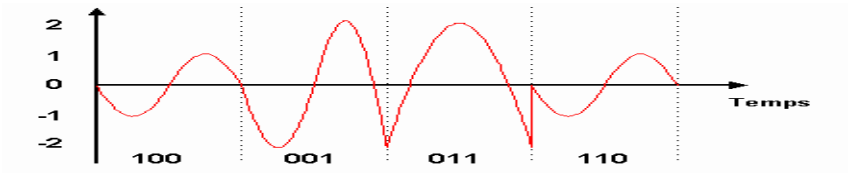


Figure II.32. Les combinaisons d'amplitude et de phases

Les combinaisons possibles en modulations QAM sont souvent représentées par une constellation de points représentant chacun un groupe de bits.

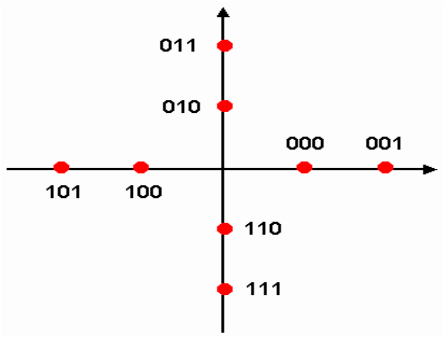


Figure II.33. Exemple de constellation QAM8 (3 bits par baud)

II.9. Multiplexages

II.9.1.Multiplexage PDH

Le faisceau hertzien utilise un multiplexage PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy), Pour parvenir au multiplexage de plusieurs voies téléphoniques, simultanément sur un même circuit, les Européens ont adopté la trame MIC qui permet de multiplexer 30 canaux de parole, avec signalisation et synchronisation, sur un support à 2,048 Mbps .Ce format est appelé E-1.

- E-1 = 2,048 Mbps (30 voies)
- E-2 = 8,448 Mbps (120 voies)
- E-3 = 34,368 Mbps (480 voies)
- E-4 = 139,264 Mbps (1920 voies)

Cette hiérarchie pour la téléphonie "numérique" est comparable à la hiérarchie définie pour le multiplexage "analogique" en fréquence. Le multiplex primaire à 30 voies est regroupé par ensembles de 4 pour fournir un multiplex du second ordre de

120 voies à 8,448 Mbps. Ce débit est légèrement supérieur à la somme des 4 débits primaires car on insère dans la trame à 8 Mbps des octets de bourrage pour individualiser les 4 multiplex constituants et pour ne pas synchroniser entre eux ces derniers (chaque circuit à 2 Mbps fonctionne avec son horloge propre).

II.9.2. Limitation de la PDH

- L'inconvénient de ce mode de transmission est le multiplexage bit par bit de la trame numérique plésiochrone, ce qui ne permet pas l'accès au niveau inférieur sans démultiplexage ;
- L'absence de la normalisation au niveau de l'UIT-T(C.C.I.T.T), ce qui veut dire qu'on ne peut pas interconnecter deux hiérarchies différentes (USA, EUROPE) ;
- La technique de multiplexage est complexe en raison du plésiochronisme des sources;
- la trame PDH ne contient pas d'octets réservés à l'exploitation;
- Pas d'interopérabilité à hauts débits entre les continents puisque les débits sont différents;
- La technique PDH est une technique de point à point et non une technique de réseau organisée en anneau permettant d'obtenir une disponibilité importante de services.

II.9.2.La modulation d'impulsions codées (MIC)

La modulation par impulsion d'amplitude (PAM pour Pulse Amplitude Modulation) est une technique qui consiste à convertir un signal analogique en une série d'impulsions binaires codées. Ainsi, pour réaliser un système de modulation MIC, trois opérations de base sont indispensables :

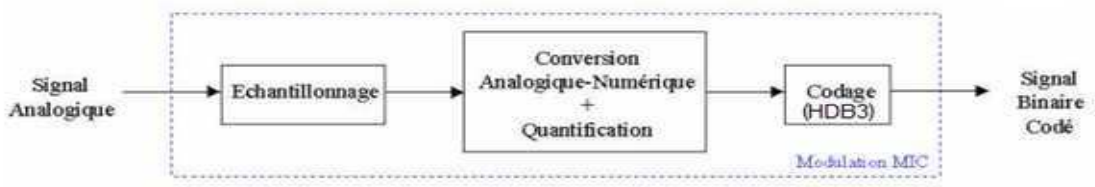


Figure II.34. Synoptique général de la modulation MIC

II.9.2.1.Échantillonnage

Le théorème de l'échantillonnage indique la fréquence minimale à laquelle un signal analogique doit être exploré pour qu'il puisse être rendu dans sa forme initiale à partir des échantillons sans aucune perte d'information. Nous avons vu que la fréquence d'échantillonnage Fe, doit être au moins le double de la bande passante du signal ou de la fréquence la plus élevée contenue dans le signal analogique Fmax.

$$\text{Fe} \geq 2\ \text{Fmax}$$

Pour la bande de fréquences de 300 à 3400 Hz utilisée en téléphonie, pour une communication téléphonique Fmax = 4KHz et donc la fréquence d'échantillonnage, Fe= 8KHz Ceci signifie qu'un signal de fréquence vocale est exploré 8000 fois par seconde. L'intervalle entre deux échantillons successifs se calcule comme suit :

$$\text{Te} = \frac{1}{\text{Fe}} = 125\ \text{ms}$$

II.9.2.2.Quantification

La transmission des impulsions modulées sont très sensible aux bruits ce qui rend la reconstitution du signal à la réception incomplète. Pour cette raison nous quantifions le signal en faisant correspondre à chaque échantillon l'amplitude la plus voisine d'une suite discrète et finie d'amplitudes « étalons » appelées niveaux .c'est

la valeur de ces niveaux qui à l'émission après le codage seront transmise en ligne.

En système téléphonie (MIC) : Les échantillons sont codés par des mots de n bites $n = 8$

Les valeurs discrètes : N= $(2)^n = 2^8 = 256$

II.9.2.3.Compression

D'après la répartition statique de la parole, le rapport signal sur bruit est faible pour les petits signaux que les forts signaux. Pour garder une bonne qualité de transmission ; le rapport S/B doit être constant sur toutes les plages de fréquences .pour corriger ce problème on utilise deux lois de compressions :

- **La loi européenne A**

  C'est une loi de compression adoptée en Europe; définit une quantification logarithmique approchée selon le compromis suivant:

- segment logarithmique pour les amplitudes relatives se trouvant entre 1/A et A ;
- segment linéaire à l'origine pour $x \leq \frac{1}{A}$ tangent au segment logarithmique

Son expression, exprimée relativement à l'amplitude maximale tolérable du signal

$$y = \frac{A}{1+Ln(A)}x \quad \text{pour} \quad x \leq \frac{1}{A} \tag{II.47}$$

$$y = \frac{1+Ln(Ax)}{1+Ln(A)} \quad \text{pour} \quad x \geq \frac{1}{A} \tag{II.48}$$

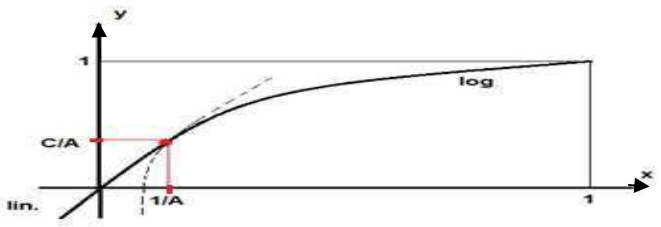


Figure II.35. La loi européenne A

La pente du segment linéaire à l'origine est appelée taux de compression C .Il a été choisi égal à 16.

$$C = \frac{1}{1+\ln A} = 16 \qquad (II.49)$$

Ce qui définit A= 87,6

- **La loi américaine μ**

La loi **μ** est une loi de compression adoptée en Amérique qui a l'expression mathématique suivante:

$$Y = \frac{Ln(1+\mu x)}{Ln(1+\mu)} \qquad \text{avec } \mu = 255 \qquad (II.50)$$

$$C = \frac{C}{Ln(1+\mu)} = 46 \qquad (II.51)$$

II.9.2.4.Codage

Chaque niveau de quantification est représenter par un nombre binaire de « n » bits, qui est le même pour tous les niveaux ce qui permet une transmission synchrone de mot identique.

- **Codage HDB3**

Le codage HDB3 (High-Density Bi-polar modulus 3) est très utilisé dans les réseaux téléphoniques numériques notamment dans les liaisons faisceaux hertziennes utilisant le PDH. le code HDB3, a pour caractéristique de limiter à trois le nombre de zéros successifs l'émetteur remplace toutes les séquences de 4 zéros successifs par une autre séquence de la forme B00V, dans laquelle le quatrième zéro "V" est forcé à avec la même polarité que le bit à "1" immédiatement précédent. Il y a donc violation de l'alternance des polarités. (bit de viol). B respecte l'alternance

des polarités, c'est à dire qu'il aura le signe opposé à la dernière impulsion sauf dans le cas où il y a un nombre impair d'impulsion depuis la dernière violation de polarité. Dans ce cas B sera mis à zéro ce qui maintient une valeur moyenne nulle.

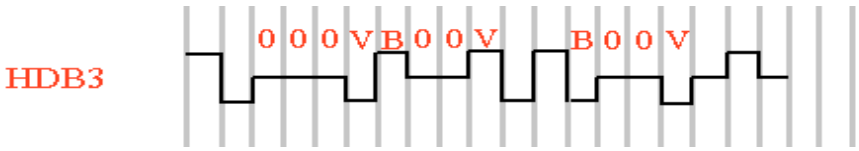


Figure II.36. Codage HDB3

II.9.3.Structure de trame MIC

II.9.3.1.Trame primaire et l'intervalle temporel (IT)

Une fois que l'échantillon a été quantifié, il peut être envoyé. Et un nouvel échantillon peut alors être échantillonné, compressé et quantifié. L'ensemble de ces opérations doit cependant être limité dans le temps. En effet puisqu'on échantillonne à 8000 Hz, la durée de "fabrication" des mots de 8 bits codant l'échantillon ne peut dépasser 125µs. En réalité les mots de 8 bits sont produits très rapidement et on peut même insérer entre deux mots successifs provenant de la même voie, des mots provenant d'autres voies. On réalise ainsi une transmission multiplexée temporellement de plusieurs voies. (Recommandation UIT-T Rec. G711) .

En Europe le système qui réalise cette fonction est appelé MIC E1 (Modulateur d'impulsions codées). C'est le premier niveau de la hiérarchie de multiplexage. Dans ce système 30 voies sont multiplexées temporellement dans une "fenêtre" de 125µs.

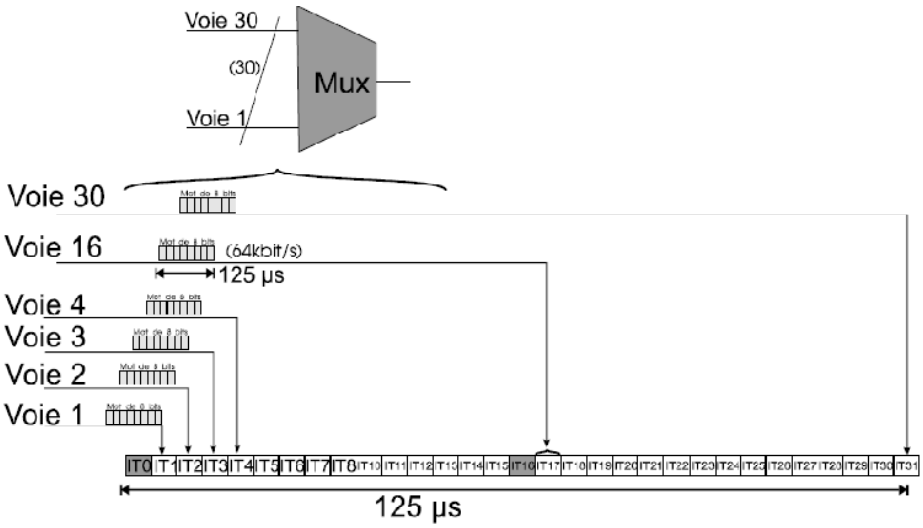


Figure II.37. Structure d'une trame MIC

La fenêtre de 125µs appelée trame est donc découpée en 32 morceaux appelés "Intervalle de temps" ou "IT", qui vont de IT0 à IT31.

Les 32 intervalles de temps sont occupés de la manière suivante :

Les échantillons compressés et quantifiés en provenance des voies 1 à 15, sont placés respectivement dans les IT1 à IT15. De même pour les voies 16 à 30 placées dans les IT17 à IT31. Seuls les IT0 et IT16 sont particuliers car ils ne sont pas utilisés pour transmettre des voies mais pour la signalisation. Lorsqu'une trame est émise par un émetteur vers un récepteur deux principes importants doivent être respectés:

- La synchronisation
- Le verrouillage

➢ Synchronisation

L'émetteur E et le récepteur R doivent être synchronisées, c'est à dire que leurs horloges HE et HR doivent être identiques afin que les bits soient lus à des instants "corrects".

En effet si le récepteur cherche à détecter l'état d'un bit alors qu'un front montant ou descendant est présent une erreur peu se produire.

➢ **Verrouillage**

Le récepteur R doit savoir où commence la trame au bit près. Sans cela il n'y a aucun moyen de distinguer où commence une IT et où s'arrête une autre. A cela deux conséquences :

1. Il faut indiquer le début de la trame
2. si R n'est pas synchronisé sur E, il est important que E et R puissent se transmettre un signal de perte de verrouillage les avertissant de l'état de leur synchronisation.

Les IT0 et IT16 jouent cet office, et permettent à l'émetteur E et au récepteur R de "s'entendre".

II.9.4.Multiplexage SDH

La SDH est une nouvelle technologie de transmission Cette hiérarchie de transmission est fondée sur les concepts de SONET (Synchronous Optical NETwork) proposés par l'organisme de normalisation américain BELLCORE. La SDH repose sur une trame numérique de niveau élevé qui apporte une facilité de brassage et d'insertion/extraction des niveaux inférieurs. Les concepts de la SDH permettent ainsi de remédier aux inconvénients de la hiérarchie numérique plésiochrone (PDH) et répondent à un certain nombre d'objectifs qui sont la flexibilité, la visibilité, la facilité d'exploitation, la prise en compte des évolutions futures vers les hauts débits et l'interconnexion des systèmes. la SDH se situe sur les deux premiers couches du modèle OSI .Le premier niveau de cette hiérarchie est le STM1 (155,52Mbit/s)

Les niveaux supérieurs sont :

- STM 4 à 622,08 Mbit/s
- STM16 à 2488,32 Mbits/s (dit 2,5Gbit/s)
- STM 64 à 9953,28 Mbits/s (dit 10Gbit/s)

Ces informations transitent non plus sur des câbles, mais sur des fibres optiques et des faisceaux hertziens.

II.10.Conclusion

Au cours de chapitre nous nous sommes focalisés sur les liaisons FHN point à point.

Les faisceaux hertziens, fréquemment mis en œuvre comme solution de collecte, présentent des performances particulièrement intéressantes. Les débits peuvent varier entre 2 et 40 GHz pour chaque lien établi. Ces débits sont dédiés et symétriques ; la portée d'un lien faisceau hertzien, est relativement importante en comparaison avec d'autres technologies sans-fil : elle peut atteindre jusqu'à 70 Km en fonction du plan de fréquence utilisé. Cette portée est même extensible si l'on choisit de mettre en place une liaison à plusieurs bonds. Néanmoins, ils subissent des contraintes de par leurs caractéristiques intrinsèques. Cette solution de transmission sans fil est en effet sensible aux phénomènes d'absorption (obstacles naturels, bâtiments, voire, variations climatiques dans le cas des fréquences les plus élevées). Pour limiter ces risques, il est préférable d'installer les antennes d'émission et de réception en ligne de vue directe, sur des points hauts. Les liaisons hertziennes Convient particulièrement aux régions à faible densité de population et dans les régions montagneuses. Une autre particularité des faisceaux hertziens est l'utilisation du satellite de télécommunication comme étant un relais de transmission spatial. Une liaison de télécommunication par satellite peut être considérée comme une extension d'une liaison par faisceau hertzien. Les transmissions par satellites sont directement apparentées aux faisceaux hertziens en ce sens qu'elles établissent des liaisons par l'intermédiaire d'une station relais et qui a la particularité d'être embarqué à bord d'un satellite, généralement géostationnaire.

III.1. Introduction

Le trafic vocal, assuré par les satellites, est surtout destiné aux pays qui n'ont pas de réseaux terrestres. Donc il existe plusieurs systèmes pour réaliser la téléphonie mobile par satellite, ainsi qu'on trouve deux famille de systèmes existant, les systèmes de téléphonie mobile par satellite géostationnaires et les systèmes de téléphonie mobile par satellites MEO et LEO.

La constellation satellitaire moyenne orbite (MEO) constitue le système ICO qui est un réseau de communication mobiles .Il doit permettre la fourniture de services voix, fax, données et multimédia à contrainte de temps réel (vidéo par exemple).

Parmi les systèmes utilisant des satellites GEO on peut citer Inmarsat qui a été le premier système de communications mobiles par satellites pour la desserte en mer puis en avion et en terrestre, et aussi le système Thuraya qui offre un service de téléphonie mobile sur l'Asie centrale, ce système a la paricularité d'offrir de la téléphonie mobile au moyen d'un satellite Géostationnaire.

Les systèmes de téléphonie mobile par satellites LEO on citera Les systèmes Iridium, et Globalstar qui sont des réseaux de communication mobiles par constellation satellitaire à basse orbite, Ils conçurent pour fournir des services de téléphonie personnelles (voix, données, fax, messagerie) à des utilisateurs potentiellement répartis dans le monde entier.

III.2. Principes de fonctionnement des satellites

Les terminaux terrestres (par exemple, VSAT) transmettent leurs données sur la voie montante (f1), que le satellite reçoit, amplifie, traduit en une bande passante plus étroite (f2) pour éviter les interférences, puis, les diffuse sur la voie descendante à toutes les stations terrestres de son champ de vision. Dans ce cas, le satellite ne joue que le rôle d'un tuyau physique reliant différentes stations terrestres par un canal satellite.

III.2.2. Les VSAT (Very Small Aperture Terminal)

Le système VSAT est basé sur des satellites géostationnaires et permettant l'émission et la réception de données à partir d'un terminal de petite dimension. Ils peuvent être aisément déplacés, rapidement installés, il n'y a pas de problèmes d'interconnexion avec d'autres réseaux. La puissance des VSAT est de l'ordre de 1Watt, contre plusieurs centaines de Watts voir K Watts pour les grosses stations fixes. Le système VSAT est asymétrique. En effet, le débit offert par les VSAT peut aller de 19,2 Kbits/s jusqu'à 10 Mbits/s. D'autres caractéristiques des systèmes VSAT comme par exemple le prix invariant selon la distance et le nombre de connexions.

III.2.2.1. Architecture des réseaux VSATs

III.2.2.1.1. Architecture maillée

Dans cette architecture les VSATs sont reliés par le biais du canal satellite. Malheureusement dans le contexte de satellites géostationnaires (donc une distance de 35786 Km), les réseaux VSATs maillés subissent une atténuation de puissance de 200 dB sur la voie montante et sur la voie descendante.

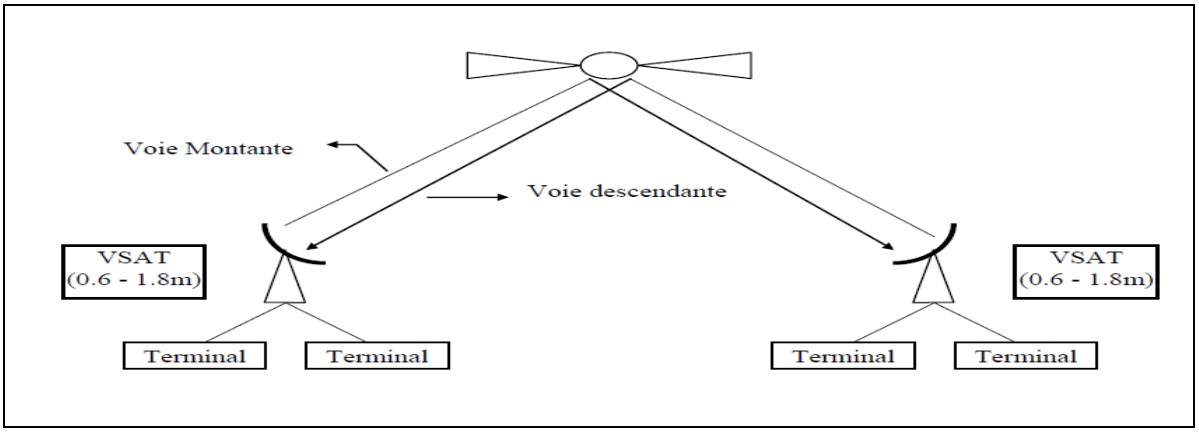


Figure III .1. Architecture maillée

III.2.2.1.2. Architecture en étoile

Pour résoudre les problèmes précédemment cités, un HUB a été introduit. Celui-ci a un diamètre supérieur à celui des VSATs (4-11m). L'architecture est dite 'en étoile'. L'ensemble de la voie montante et la voie descendante allant du VSAT émetteur vers le HUB est appelé 'inbound link' tandis que l'ensemble de la voie montante et la voie descendante allant du HUB vers le VSAT récepteur est appelée 'outbound link'. Ces réseaux peuvent être soit unidirectionnels soit bidirectionnels. Dans le cas d'un réseau unidirectionnel, les VSATs sont considérés comme des terminaux récepteurs. Cette architecture est utilisée pour des services de diffusion à partir d'un site central (le HUB) vers des sites distants (VSATs). Dans le cas d'un réseau bidirectionnel, les VSATs sont à la fois des émetteurs et des récepteurs.

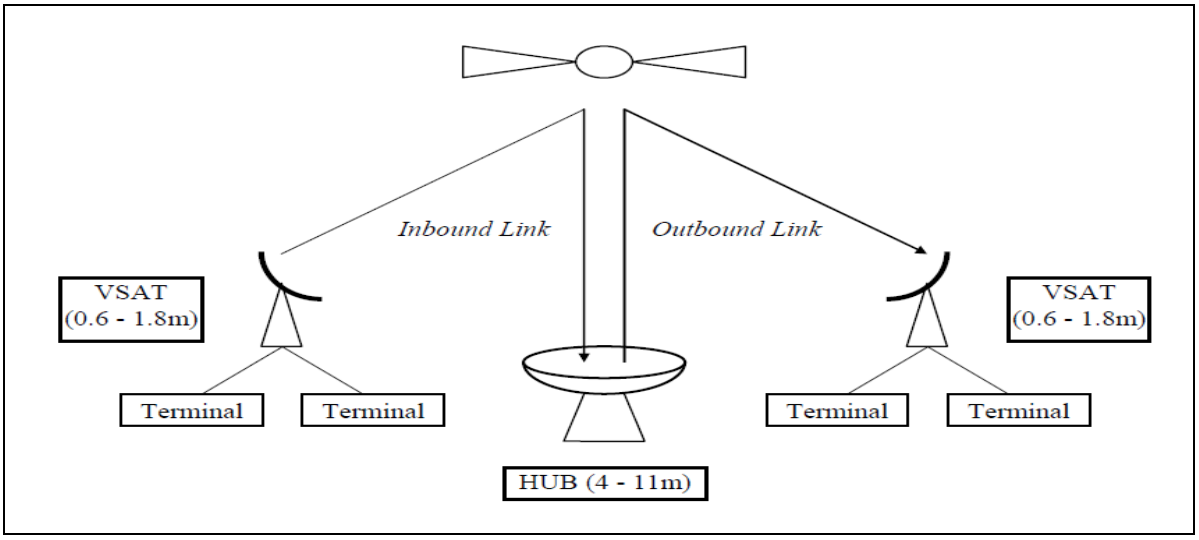


Figure III .2. Architecture en étoile

III.2.2.2.Fonctionnement des VSATs

La puissance d'émission des VSAT est faible, deux stations VSAT ne peuvent pas dialoguer directement entre elles. Il est donc nécessaire d'utiliser une station de relais appelée HUB. La HUB est doté d'une parabole de grande dimension à fort gain. Elle a deux rôles principaux. Tout d'abord elle s'occupe d'amplifier et de relayer les signaux émis par les stations VSAT. Ensuite elle gère toutes les méthodes d'accès au support de communication afin d'éviter d'éventuelles collisions entre les signaux.

III.2.2.3. Les applications

Les terminaux VSAT possède des Slots permettant d'accueillir des cartes de différentes natures:

– Cartes réseaux : X25, FR, ATM, Ethernet, …

– Cartes multimédia: Visioconférence, Streaming vidéo.

– Cartes de communication: lignes analogiques, lignes numériques, ports séries.

Grâce à toutes ces cartes, un réseau VSAT n'est plus seulement un réseau de données, mais il peu devenir un réseau téléphonique, un réseau de diffusion vidéo. On peut définir les différents caractéristiques des VSATs comme les fréquences d'émission et réception, ainsi la puissance d'émission et leurs avantages et inconvénients dans les bandes C et Ku. (Voir le tableau 1).

Caractéristiques des VSATs	Bande C	Bande Ku
Diamètre de l'antenne Fréquence d'émission Fréquence de réception Puissance d'émission	1.8 à 2.4 m 5.85 à 6.425 GHz 3.625 à 4.2 GHz 30 W	1.2 à1.8 m 14 à 14.5 GHz 10.7 à 12.75 GHZ 1 W
Avantages	-Couverture mondiale ; atténuations dues à la pluie plus faibles; -Antennes de réception de grande taille (1 à 3m);	-Meilleure exploitation du satellite -Technologie moins coûteuse -Antennes plus réduites
Inconvénients	Perturbation possibles par les équipements terrestres ou satellites , utilisant la même bande.	-Couverture régionale; -Terminaux plus coûteux; -Perturbations possibles dues à la pluie.

Tableau III .1. Comparaison entre les bandes C et Ku de VSAT

III.2.3. Les bandes de fréquences utilisées par les satellites

Les bandes de fréquences mises en œuvre pour les communications par satellite sont le plus souvent comprises entre 1 et 30 GHz. En dessous de 1 GHz les ondes sont principalement réfléchies et diffusées par l'atmosphère. Au dessus de 30 GHz les liaisons satellitaires sont possibles mais l'absorption atmosphérique est importante et la technologie d'amplification plus complexe.

La bande de fréquence 1-30 GHz est divisée en sous bandes.

a-La bande C:

La bande C fut la première à être utilisée pour un trafic commercial par satellites. Deux plages de fréquences sont définies dans cette bande C, la plus basse (4 GHz) pour le trafic descendant (satellite-terre) ou downlink, la plus haute (6 GHz) pour le trafic montant (terre-satellite) ou uplink. Cette bande C est fort encombrée, elle est notamment utilisée par les opérateurs de télécommunications pour leurs liaisons intercontinentales.

b-La bande Ku:

La bande Ku quant à elle, fonctionne à 12 GHz, c'est pour le downlink, et à 14 GHz c'est pour l'uplink. Cette bande n'est pas encore saturée.

Le désavantage de cette bande est qu'elle est très sensible aux orages, l'eau de pluie absorbe les signaux. Par contre cette bande, est peu sensible aux parasites urbains et est donc préconisée pour l'utilisation des VSAT.

c-La bande Ka:

La bande Ka permet l'utilisation d'antennes encore plus petites. Cette bande est surtout utilisée par les terminaux mobiles de type GSM.

d- La bande L :

Elle est exclusivement réservée aux services mobiles par satellites (MSS). À présent, elle est utilisée par Inmarsat, Globalstar, ICO et elle sera certainement utilisée par d'autres dans le futur.

La bande L est principalement destinée aux satellites en orbite basse.

d- La bande X:

La bande X est réservée aux applications militaires.

Les bandes de fréquences utilisées par les satellites ont des zones de fréquence différente, entre 1et 30GHz et chaque bande a un service propre. (Voir le tableau 2).

Bande	Fréquences	Services
L	1-2 GHz	communications avec les mobiles
C	4-6 GHz	communications civiles internationales et nationales
X	7-8 GHz	communications militaires
Ku	11-14 GHz	communications civiles internationales et nationales
Ka	20-30 GHz	nouveaux systèmes d'accès au réseau large bande

Tableau III.2. Utilisation des bandes de satellite

III.3.Les constellations de satellites

III.3.1. Intérêts des constellations

Avec la libéralisation des télécoms depuis plus de dix ans, des initiatives privées ont proposé de nouveaux services, engendrant elles-mêmes la conception et l'application de nouveaux systèmes de satellites, comme pour la téléphonie mobile.
Actuellement, le réseau GSM utilisé par les téléphones portables ne permet pas de couvrir l'ensemble de la planète : le passage par l'espace reste indispensable pour relier un marin ou un arpenteur du désert par un simple mobile. Dans ce cas précis, le satellite géostationnaire s'avère moins efficace qu'une constellation (ensemble de petits satellites placés à seulement quelques centaines de kilomètres de hauteur). Ces constellations ont l'avantage d'offrir une couverture permanente et totale de la Terre, une réception au sol plus performante et un temps de transmission moins long.

La téléphonie mobile a déjà entraîné la création de trois constellations de satellites, Le premier, Iridium, regroupe 66 satellites placés à 781 km d'altitude. Les derniers des 58 satellites du système Globalstar et le système SkyBridge qui utilise une constellation de 64 satellites.

Après avoir vue son intérêt, une constellation de satellite peut être définie comme plusieurs satellites semblables de même type et ayant la même fonction et qui sont conçus pour être similaires, complémentaires et orbités pour un but commun sous un contrôle partagé.

On distingue trois types de constellation selon leurs altitudes d'orbites :

III.3.1.1. Constellations Basse Orbite (LEO)

Les satellites en orbite basse décrivent des orbites elliptiques ou (plus souvent) circulaires à moins de 2.000 kilomètres de la terre. La période orbitale à ces altitudes est comprise entre 90 minutes et deux heures. Quant au rayon de la zone de couverture, il est compris entre 3000 et 4000 kilomètres.

Un satellite LEO peut rester visible jusqu'à 20 minutes pour un observateur sur la terre.

Un système de transmissions global en utilisant ce type d'orbite exige un grand nombre de satellites, dans un certain nombre de plans orbitaux différents. Lorsqu'un satellite en charge d'un utilisateur donné n'est plus visible pour cet utilisateur (il passe sous l'horizon visible), le satellite doit être capable de transférer les services dont il avait la charge à un autre satellite parcourant une orbite identique ou adjacente : c'est la gestion du hand-over.

Les constellations LEO offrent en tout cas des retards de propagation particulièrement faibles, de l'ordre d'une vingtaine de ms, ce qui leur permet d'assurer des services de même type que ceux des réseaux filaires terrestres en fibres optiques.

III.3.1.2. Constellations moyenne orbite (MEO)

Les satellites en orbite moyenne -Intermediate Circular Orbits (ICO), ou Medium Earth Orbits (MEO)- décrivent des orbites circulaires à une altitude d'environ 10.000 kilomètres. La période orbitale est d'environ 6 heures et un observateur terrestre peut avoir une visibilité d'un satellite de quelques heures.

Un système de transmission global utilisant ce type d'orbite exige un nombre plus modeste de satellites par rapport aux constellations LEO. Il suffit de 2 à 3 plans orbitaux pour réaliser une couverture globale.

Une constellation de type MEO fonctionne de manière très semblable aux systèmes LEO; toutefois, par structure, il est bien évidemment moins souvent besoin de faire appel à un système de hand-over.

Le retard de propagation est plus important que dans les constellations LEO, mais reste très inférieur à celui constaté dans les systèmes GEO.

III.3.1.3. Constellation géostationnaire (GEO)

Les satellites les plus couramment utilisés aux fins de télécommunication sont des satellites géostationnaires. L'altitude de ces satellites équatoriaux, telle que leur période d'orbite soit synchrone de la terre, soit une rotation en 23h 56mn 4s, sera de 36000 km environ. Trois satellites disposés à 120° sur l'orbite géostationnaire, permettent "de voir" quasiment toute la terre, à part une petite zone polaire située aux des extrêmes voir figure (III.3). Le retard de propagation est plus important que dans les constellations LEO et MEO.

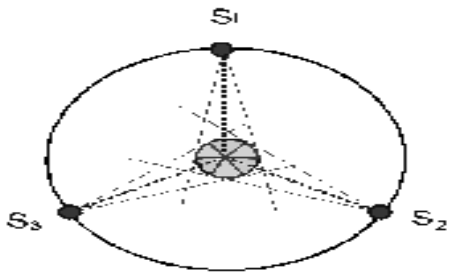


Figure III.3 Constellation GEO

Les orbites de satellites LEO, MEO, GEO ont plusieurs caractéristiques que on a définit dans le tableau ce dessous :

Article	LEO	MEO	GEO
Hauteur d'orbite	500 ~1.500 Km	~20.000 Km	36.000 Km
No. de satellites	48 ~66	10~ 12	1~ 4
Dimension de satellite	Petite (700 Kg)	Large (1500~ 2000 Kg	Large (1500 ~2000 Kg)
Vie	5~ 7 ans	10 ~15 ans	10 ~15 ans
Période d'orbite	1 h45 min.	5~ 6 heures	-
Période de Visibilité	~12 min	~2 heures	Toujours
Délai Rond de Soulèvement	20 ms	90 ms	270ms
Réutilisation de fréquence	Haut	Milieu	Basse
Fréquence de passation	Haut	Milieu	Basse
Puissance de Terminal RF	Petite	Milieu	Haut
Antenne de	Poursuite	Poursuite	Fixée

terminal			

Tableau III. 3. La comparaison entre les caractéristiques LEO, MEO, GEO.

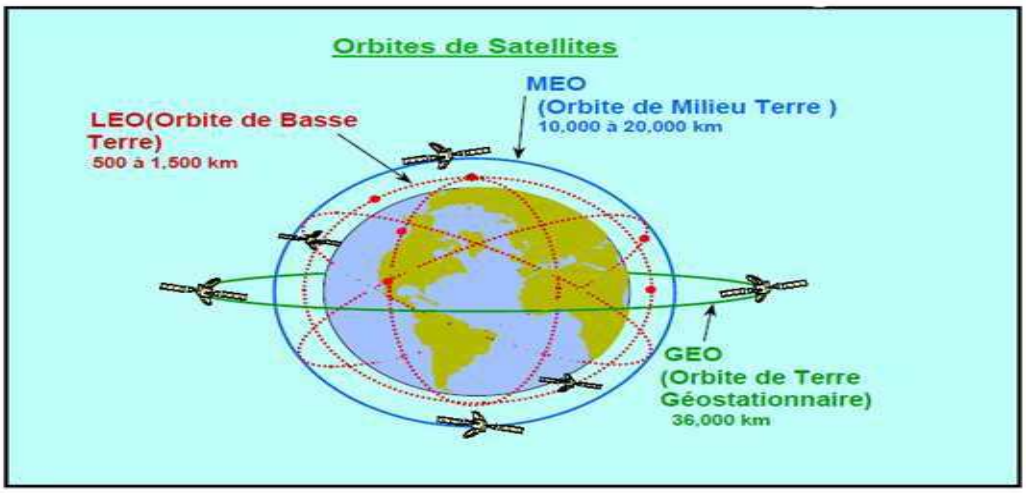


Figure III.4. Les différents orbites de satellites

III.4. Fonction utiles des différents modules

Quelle que soit leur mission, les satellites comprennent plusieurs modules:

a) Le module de propulsion:

Groupe le moteur de stabilisation avec ses réservoirs d'ergols et ses tuyères trois axes.

b) Le module de service :

Assure la télémétrie, la télécommande, le contrôle de l'altitude et de l'orbite au moyen de la liaison radio avec le sol. Il oriente les panneaux solaires de façon à obtenir la puissance maximale de l'alimentation. Il comprend la batterie pour la télécommande et l'alimentation pendant les éclipses du soleil. Il contrôle l'installation électrique et la température des principaux composants.

c) Le générateur solaire :

Groupe un grand nombre de cellules au silicium en fonction de la puissance du satellite. Il faut plusieurs dizaines de milliers de cellules pour obtenir la puissance souvent supérieure à 3kW en fin de vie. En effet les cellules reçoivent l'impact des microparticules à haute énergie provenant de l'espace qui diminue leur rendement.

d) Le module de communication:

Il reçoit le signal de la Terre, le démodule, l'amplifie, le re-module sur des fréquences différentes et enfin, le dirige vers l'antenne d'émission.

e) Le module des antennes:

Il comprend l'antenne de réception, la ou les antennes d'émission, l'antenne de télémesure et de la télécommande. Les signaux captés sont réémis sur une fréquence différente, en général plus basse. Ce changement de fréquence entre les antennes de réception et d'émission est assuré par des appareils appelés répéteurs, chargés également d'amplifier massivement le signal.

f) Les transpondeurs:

Les satellites commerciaux transportent un certain nombre de transpondeurs(ou répéteurs), par exemple un signal télévisé peut disposer d'un transpondeur à lui seul alors qu'un autre transpondeur achemine des centaines d'appels téléphoniques.

Ces transpondeurs matériels reçoivent les signaux de la liaison ascendante, les démodulent, puis les remodulent à la fréquence de la liaison descendante et les amplifient avant de les réémettre vers la Terre.
Un transpondeur est identifié par ses fréquences d'Uplink et de Downlink, par sa polarisation (horizontale, verticale, circulaire droite, circulaire gauche), et en général sa bande passante qui est de l'ordre de 40 MHz.

III.4.1. La couverture par satellites

L'orbite d'un satellite de par sa forme et son rayon définit la zone de couverture et la portée du satellite. Plus le satellite est éloigne de la terre et plus sa couverture est étendue. Bien qu'évident ce critère reste un élément majeur dans le choix et l'élaboration d'une solution satellite. En effet plusieurs systèmes de satellites peuvent couvrir la même superficie mais chacun se distinguera par un ensemble de caractéristiques particulières. Parmi elles, la plus déterminante est le nombre de satellites composant le système et la méthode utilisée pour les gérer.

En effet, la couverture d'un satellite géostationnaire peut être atteinte par une constellation de satellites à plus basse altitude mais il faudra alors s'intéresser aux moyens de rendre ce réseau homogène sur l'ensemble de la zone. Pour cela deux solutions existent soit les satellites communiquent entre eux soit un relais terrestres permet de les synchroniser.

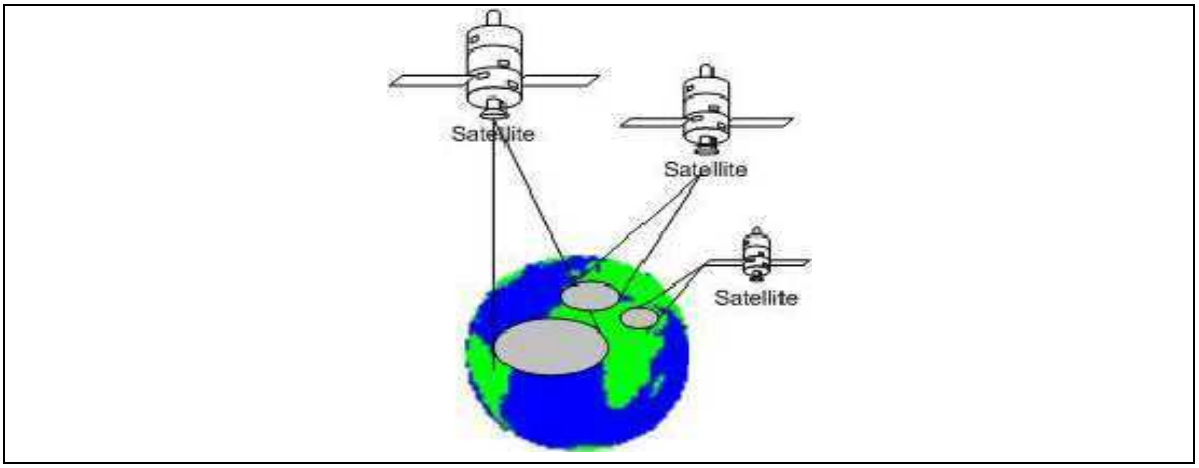


Figure III.5. La couverture par satellite

III.4.2. La téléphonie mobile par satellite

Pour la téléphonie mobile par satellite, il existe plusieurs réseaux.

Parmi ses réseaux, on définit :

Inmarsat , Thuraya , Globalstar, Iridium, Ico, Ellipso, Ecco et Intelsat ,Teledesic .

III.4.2.1. Le réseau INMARSAT

Inmarsat est une organisation internationale propriétaire de satellites destines a offrir un service de téléphonie mobile pour les marins. La réussite des différents services ont permis a Inmarsat d'être le premier réseau de téléphones par satellites, utilises par les marins, mais aussi par les Aviateurs ou conducteurs terrestres, qu'ils soient scientifiques, explorateurs, journalistes, hommes d'affaire… qui tous ont besoin d'un service fiable de téléphonie lors d'un déplacement dans le monde.

Le schéma qui suit propose des exemples typiques de topologies utilisées pour le système Inmarsat :

Un unique satellite en orbite géostationnaire qui relaie les communications vers un hub. INMARSAT est l'exemple typique.

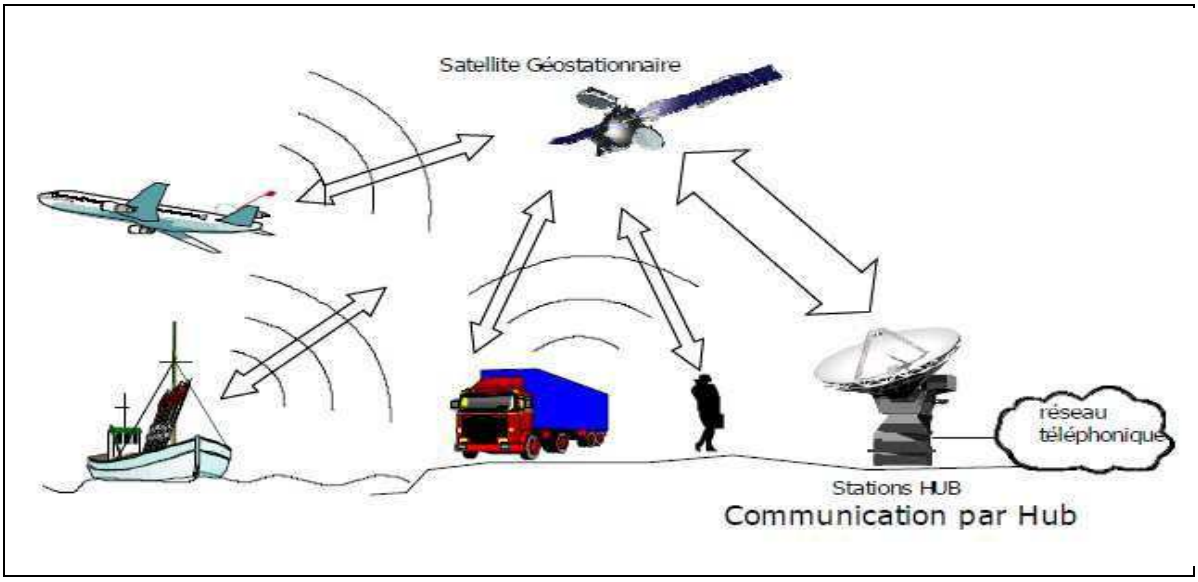


Figure III .6. Téléphonie mobile par l'organisation Inmarsat

III.4.2.2. Le réseau THURAYA

Exploitant deux satellites en orbite géostationnaire, Thuraya fournit un service standard de phonie, sms et transfert de données. Les terminaux acceptent en particulier les cartes SIM GSM d'autres operateurs rendant son utilisation plus souple.Ils intègrent également en série un récepteur GPS permettant la geolocalisation.

Le service géostationnaire induit un retard non négligeable dans la liaison, mais la puissance de sortie est limitée à 2W (modulation QPSK).

Thuraya est un consortium d'industriels, situe aux Emirats Arabe Unis. Ses services s'adressent avant tout aux habitants des pays d'extrême et du Moyen-Orient.

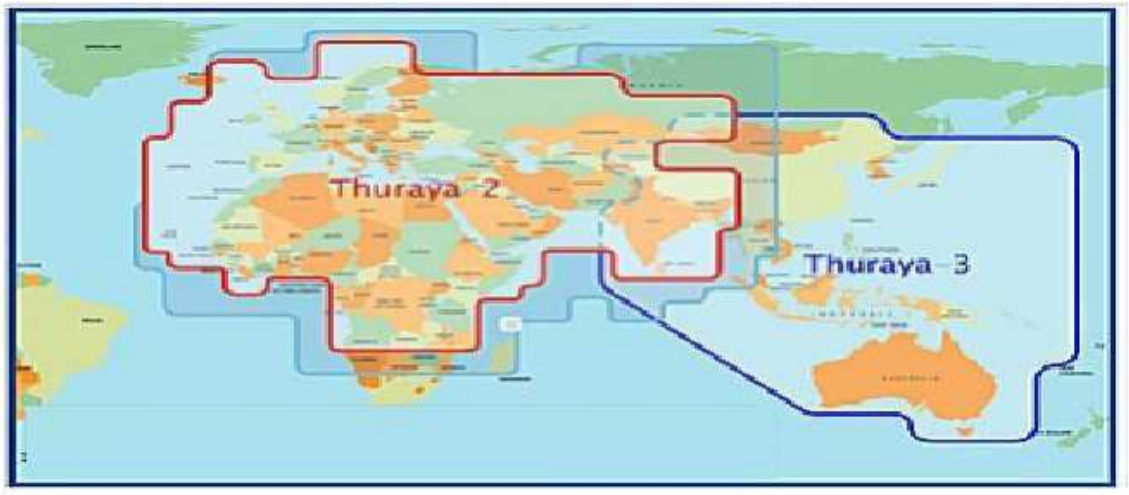


Figure III.7. Couverture et exemple de terminal (Thuraya XT)

III.4.2.3. Le réseau Globalstar

Globalstar est un système de télécommunications par satellite basé sur une constellation de 48 satellites en orbite basse (1414 km), simples répéteurs et chaque satellite a six faisceaux étroits visant des zones de couverture sur la Terre. La capacité de chacun est de 28.800 circuits simultanés de téléphonie ou de

transmission de données…

Les satellites pèsent chacun 350Kg, ont une puissance de 875W et occupent les bandes de fréquence L et C (L : 1,53GHz à 1,6605GHz ; C : 3,4GHz à 7,075GHz), et aussi, les appels des abonnés sont acheminé via un satellite jusqu'à la station terrienne la plus proche, reliée aux réseaux nationaux et internationaux existants. Chaque station de connexion dessert une zone spécifique allant jusqu'à 3000 km de diamètre.

Le système assure des liaisons entre un utilisateur isolé, en n'importe quel point de la Terre et une station réceptrice qui gère le trafic.

Une modulation QPSK (phase en quadrature) est utilisée pour les voies de communication.

III.4.2.4. Le réseau Iridium

Les satellites Iridium, chacun d'une masse de 690 kg , sont au nombre de 66 et évoluent en orbite basse à environ 780 km. Occupés chacun par 11 satellites de 48 faisceaux.

Ils communiquent directement avec les équipements terrestres. L'une des caractéristiques d'Iridium est la possibilité pour les satellites de communiquer entre eux. Cela permet ainsi de se passer des réseaux terrestres traditionnels : les communications peuvent être directement traités entre satellites, sans redescendre au sol. Les liens intersatellitaires se situent dans la bande Ka (fréquences comprises entre 23.18 et 23.38GHz). Pour communiquer entre eux les satellites devront être situés dans le plan orbital adéquat.

En théorie, le système Iridium permet donc, à la différence des autres systèmes, de faire du handover : un usager peut commencer sa communication sur un satellite et la poursuivre sur un autre.

Ce service permettrait tout type de communication téléphonique et d'envoi de messages écrits à n'importe quelle destination de la terre, de la mer et du ciel.

Actuellement, seul Iridium offre une couverture étendue ,il cible les secteurs de l'aviation, la construction, les catastrophes naturelles, les urgences, le gouvernement, le tourisme, la marine, l'audiovisuel, les exploitations minières, de pétrole, de gaz, …

La voix sera en full-duplex à 2.4 Kbits/s, les données et le fax seront à 2400 bits/s. Une modulation QPSK (phase en quadrature) est utilisée pour les voies de communication.

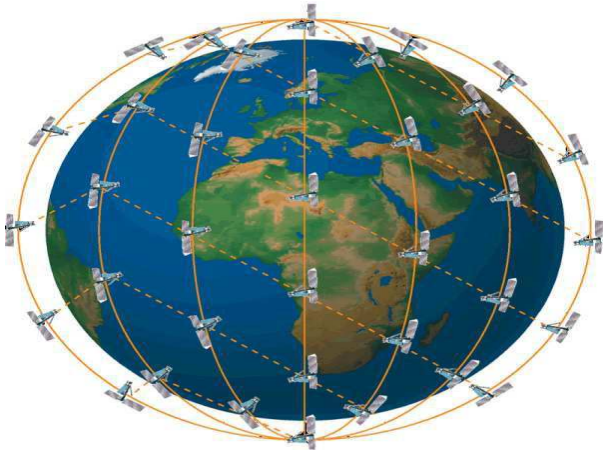


Figure III.8. Constellation des réseaux iridium

III.4.2.5. Le réseau ICO (Intermediate Circular Orbits)

Le réseau ICO vise les secteurs maritimes, les transports internationaux, le gouvernement (capacité unique de crypter les messages vocaux), le pétrole, le gaz, la construction et autres industries, les particuliers, et les petites et moyennes entreprises. Le système ICO consistera à un système constitué de deux parties :

a- Une partie dans l'espace (la constellation de satellites)

La partie dans l'espace est basé sur une constellation de 12 satellites en orbite intermédiaire (MEO) à 10390km. La constellation est répartie sur deux plans orbitaux circulaires, occupés chacun par 6 satellites de 163 faisceaux. Les satellites fourniront un complet chevauchement continu de la surface de la Terre. Chaque satellite mettra environ six heures pour tourner autour de la Terre. Sur les

douze satellites, dix formeront une constellation de base et les deux autres agiront sur une orbite libre. Deux autres satellites seront construits et gardés sur Terre, prêts à être lancés au cas où un des satellites en orbite serait défectueux. Dans ce système, les satellites sont utilisés comme des répéteurs.

b-Une partie terrestre

La partie terrestre est constituée d'un réseau de douze stations, qui aura une bande passante haute avec un protocole Internet (IP) global. Ces stations seront connectées par des liaisons à grande vitesse.

Il est prévu également de décliner la technologie ICO des terminaux sous différentes formes : terminaux mobiles pour véhicules, avions ou navigation maritime et terminaux fixes ou semi-fixes (transportables) pour des cabines publiques en zones rurales ou des téléphones communautaires .

La voix sera en full-duplex à 4,8 Kbits/s, les données et le fax seront à 2400 bits/s. Une modulation QPSK (phase en quadrature) est utilisée pour les voies de communication.

III.4.2.6. Le réseau Ellipso

Ellipso est en train de construire un unique réseau mondial sans fil qui étendra l'Internet, les téléphones cellulaires et publics n'importe où sur la planète. Il offre une variété de services comme Internet, téléphonie sans fil et GPS.

Les satellites d'Ellipso sont conçus sur trois axes stabilisés, basés sur les satellites existants pour le GPS.

III.4.2.7. Le réseau ECCO

ECCO est un système de télécommunication par satellite basé sur une constellation de 46 satellites en orbite basse (LEO) à 2000km, tel que Les appels téléphoniques, messageries, SMS conviennent parfaitement à l'architecture de ce

système ECCO. Il existe deux constellations. La première constellation est répartie sur 7 plans orbitaux circulaires, occupés chacun par 5 satellites de 32 faisceaux. La deuxième est répartie sur 1 plan orbital circulaire équatorial occupé par 11 satellites de 24 faisceaux.

Un appel est transmis directement à un satellite, puis à une station terrestre locale. ECCO utilise les connections point à point.

III.4.2.8. Le réseau Intelsat

Tous les pays du monde ne sont pas reliés par des fibres optiques, mais la plupart sont reliés aux satellites de l'organisation internationale des télécommunications (Intelsat). Cette organisation gère les satellites internationaux qui fonctionnent dans la bande de radiofréquences réservée aux « satellites fixes ». Les appels via satellites sont dirigés vers la station terrestre Intelsat la plus proche. La séquence de bits codant ces appels module une onde radio qui est amplifiée et transmise au satellite par une antenne parabolique dont le diamètre atteint 15 mètres.

Arrivée au satellite, cette onde est très faible, car l'énergie du signal décroît proportionnellement au carré de la distance parcourue. Ainsi, l'antenne de réception des satellites géostationnaires doit être relativement grande. Le signal recueilli est amplifié et retransmis à une station réceptrice, sur la Terre.

III.4.2.9. Le réseau Teledesic

Le système Teledesic est un réseau de communication mobiles qu' il doit permettre la fourniture des déférents services qui sont : la voix, fax, données et multimédia.

Le réseau Teledesic se composera de 288 satellites opérationnels, d'une masse de 750 kg, divisés en 12 plans ayant chacun 24 satellites. Pour permettre une utilisation efficace du spectre radioélectrique, des fréquences sont attribuées de façon dynamique et réutilisées de nombreuses fois à l'intérieur de chaque empreinte de

satellite. Ils communiquent directement avec les équipements terrestres. L'une des caractéristiques de Teledesic (commune avec Iridium) est la possibilité pour les satellites de communiquer entre eux. Les communications peuvent être directement traitées entre satellites, sans redescendre au sol.

Le système Teledesic permet donc de faire du hand-over : un usager peut commencer sa communication sur un satellite et la poursuivre sur un autre.

Le réseau Teledesic opérera dans une portion de la bande Ka des hautes fréquences (28,6 - 29,1 GHz sur la liaison montante et 18,8 - 19,3 GHz sur la liaison descendante). L'orbite basse du réseau Teledesic élimine le long retard des signaux que l'on rencontre normalement dans les communications par le biais de satellites géostationnaires traditionnels, et permet l'emploi de petits terminaux et antennes basse puissance.

La plupart des utilisateurs auront des connexions bidirectionnelles qui fourniront jusqu'à 64 Mbit/s sur la liaison descendante et jusqu'à 2 Mbit/s sur la liaison montante. Les terminaux à large bande offriront une capacité bidirectionnelle de 64 Mbit/s.

Teledesic permet aux utilisateurs de mettre des terminaux sur la plupart des bâtiments administratifs, des écoles et des maisons avec une vue libre du ciel dans toutes les directions.

III.5. Les techniques utilisées pour les transmissions

La mission de télécommunication d'un système à satellite consiste à prendre en charge les informations générées à partir d'une station terrienne, et à les acheminer grâce à un support radioélectrique (ondes porteuses) vers une ou plusieurs stations réceptrices, en utilisant le satellite comme relais radioélectrique.

On distingue plusieurs techniques, associées entre elles, qui sont utilisées pour les télécommunications par satellite.

III.5.1. La technique des modes de liaisons

a- Les liaisons fixes, de type point à point : il s'agit des liaisons montantes vers un satellite. Dans ce cas, le point d'émission et le point de réception sont parfaitement connus géographiquement, et le trajet de l'information est parfaitement défini.

b- Les liaisons en diffusion hertzienne, de type point à multipoint : le point émetteur est parfaitement connu, mais la réception se fait sur une zone généralement large, dans laquelle les récepteurs sont fixes ou mobiles. Il s'agit notamment des émissions de radio ou de télévision reçues par voie hertzienne à partir d'un satellite.

III.5.2. La technique de la transmission des signaux en bande de base

Les signaux en bande de base représentent les signaux générés par les terminaux des usagers. Ils sont fournis aux stations terriennes de transmission soit sous forme analogique, soit sous forme numérique.

III.5.3. La technique des signaux radioélectriques

Pour être transmis par satellite, les signaux délivrés à la station terrienne modulent une porteuse radioélectrique. Cette porteuse est reçue par le satellite, lors d'une liaison montante, et ensuite la station terrienne destinatrice reçoit également à son tour la porteuse, lors de la liaison descendante. Pour caractériser la qualité d'une liaison radioélectrique , on considère le rapport C/No entre la puissance C (en W) de la porteuse et la densité spectrale No (en W/Hz) du bruit.

III.5.4. La technique de multiplexage

Les signaux délivrés à la station terrienne peuvent être transmis individuellement sur une porteuse radioélectrique, ou bien multiplexés. Dans le premier cas, on parle de transmission d'une voie par porteuse SCPC (Single Channel Per Carrier). Dans le second cas, on parle de transmission multivoies par porteuse MCPC (Multi-Channel Per Carrier).

Le multiplexage peut être fréquentiel, c'est le FDM (Frequency Division Multiplex), ou il peut être temporel, c'est le TDM (Time Division Multiplex).

De plus, les multiplexages FDM et TDM sont complétés respectivement par des systèmes d'interfaçage comme le CDMA (Coded Distributed Multiple Access) et le TDMA (Time Division Multiple Access). Ces système permettent à un certain nombre d'utilisateurs dotés chacun de leur propre code numérique, d'utiliser simultanément la même onde porteuse sans interférer les uns sur les autres. Grâce à ces systèmes d'interfaçage, les informations multiplexées peuvent être correctement démultiplexées et envoyée au bon destinataire, sans risque de confusion.

Figure III.9. Multiplexage en fréquence FDM

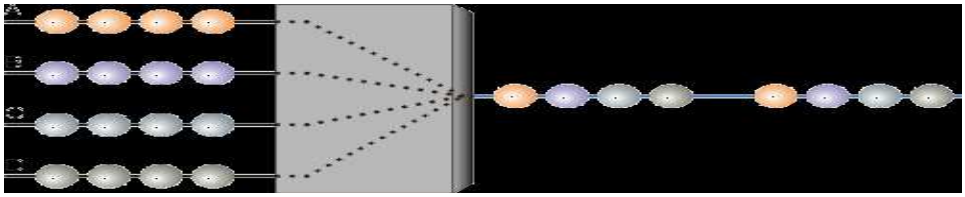


Figure III.10. Multiplexage temporel TDM

III.5.5. La technique de modulation

Pour les signaux analogiques, on utilise le plus souvent la modulation de fréquence, mais pour des signaux numériques ou analogiques numérisés, on utilise le plus souvent une modulation par déplacement de phase du type PSK (Phase Shift Keying). Les plus usuelles sont les modulations à deux et quatre états, du type BPSK (Binary Phase Shift Keying), et QPSK (Quaternary Phase Shift Keying). Le choix de modulations par déplacement de phase provient de deux caractéristiques :

- La première caractéristique: concerne la robustesse, pour les mêmes raisons évoquées pour le cas de signaux analogiques.
- La seconde caractéristique: correspond à une meilleure efficacité spectrale comparée à celle des modulations par déplacement de fréquence du type FSK (Freqeuncy Shift Keying).

L'efficacité spectrale G (bits/s.Hz) d'une modulation numérique s'exprime par le rapport entre le débit transmis R et la bande radiofréquence B occupée par la porteuse : **G=R/B.** (voir le tableau 3).

Efficacité spectrale théorique et pratique des modulations BPSK et QPSK		
Type de modulation	Efficacité spectrale	
	Théorique (en bit/s.Hz)	Pratique (en bit/s.Hz)
BPSK	1	0,7 à 0,8
QPSK	2	1,4 à 1,6

Tableau III. 4. Efficacité spectrale des modulations BPSK et QPSK

III.5.6. La technique de codage

On utilise un codage du type détecteur et correcteur d'erreurs. Il vise à réduire la probabilité d'erreur paire par l'ajout de bit de redondance à l'émission. Le récepteur utilise ces bits de redondance pour détecter et corriger les bits d'informations éventuellement erronés. Les principales techniques de codage sont :

- le codage par blocs de données: où les bits de redondance sont juxtaposés aux bits d'information.
- le codage convolutionnel: où les bits transmis résultent d'une combinaison entre les bits d'information et les bits de redondance. Le débit binaire transmis par la liaison radioélectrique s'en trouve augmenté.

III.6. La localisation par satellite

Grâce aux satellites, on détermine aujourd'hui les trois coordonnées de position avec une étonnante précision.

III.6.1. Le GPS

III.6.1.1. Principes de fonctionnement

Dans le cas du GPS, la mesure de la distance séparant un point du Globe Terrestre d'un satellite est effectué grâce à des signaux radio émis par le satellite. Des impulsions radio sont émises à des instants connus, un récepteur calcule les distances qui les séparent du satellite. Cette méthode nécessite une synchronisation parfaite entre l'émetteur et le récepteur, c'est pourquoi les satellites du GPS embarquent chacun une horloge atomique de haute précision.
Compte tenu du léger décalage de l'horloge du récepteur, les mesures de distance de trois satellites sont toutes quelque peu faussées, ce qui implique que les trois sphères de position centrées sur chaque satellite, ne se coupent pas en un seul et même point).

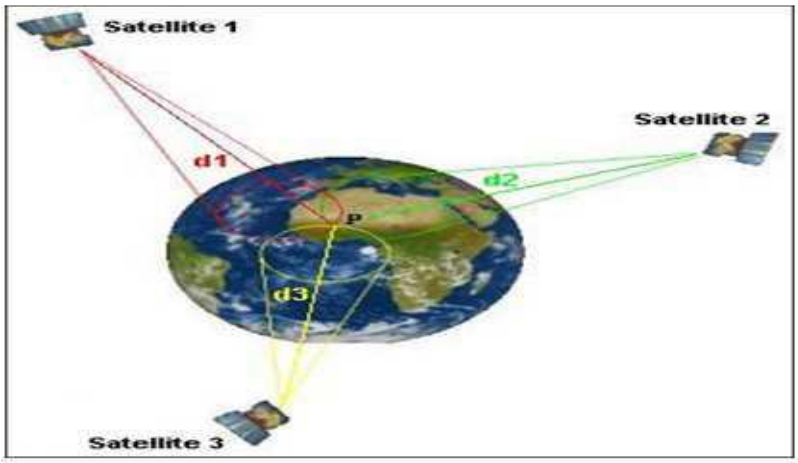


Figure III .11 . La représentation de système GPS

III.6.1.2. Les applications

Les applications sont nombreuses : des automobiles équipées de récepteurs GPS calculent des itinéraires, des trajets de transport, plus rapides, qui évitent les embouteillages par exemple, et permettent ainsi de gagner du temps. De plus, plusieurs sociétés proposent à l'heure actuelle, des récepteurs portables qui coûtent moins de 500 francs. Donnant une information de position dans les trois dimensions de l'espace, le système GPS permet également aux avions de voler plus directement vers leur destination, sans être gênés par l'encombrement des couloirs aériens, et d'atterrir en douceur sans aucune visibilité.

III. 7. Bilan de liaison

Le bilan de liaison est réalisé pour le but de déterminer à priori et avec précision la qualité d'une transmission satellite, qu'elle soit analogique ou numérique. Donc dans cette partie on doit déterminer le bilan de liaison montant et l'amplification satellite ; ainsi le bilan de liaison descendant puis bilan global.

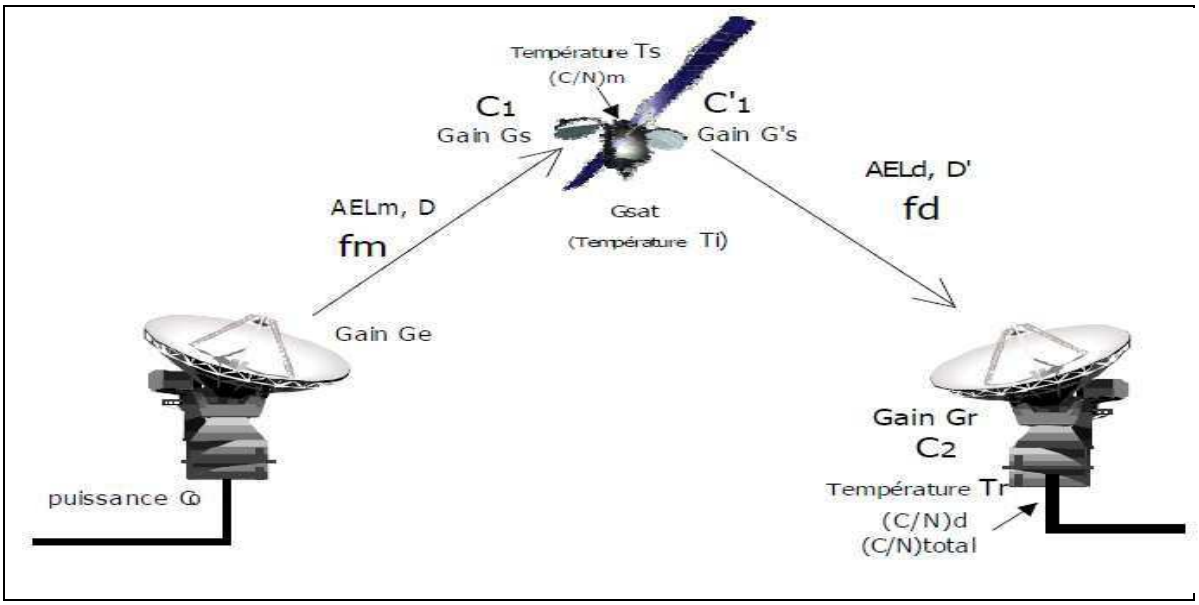


Figure III .12 . Représentation d'une liaison satellite

III 7.1. Bilan de liaison montant

On considère le rapport C/No entre la puissance C (en W) de la porteuse et la densité spectrale No (en W/Hz) du bruit.

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_m = \frac{G_e\, G_s\ \ C_0}{K\, T_s}\ \left(\frac{\lambda_m}{4\Pi D}\right)^2 \qquad \text{(HZ)} \qquad \text{(III.1)}$$

- C_0 : Puissance de sortie de l'amplificateur émission (W) ;
- Ge : Gain de l'antenne station terrienne émission ;
- Ts : Température de bruit du satellite – réception (K) ;

- GS : Gain de l'antenne satellite réception ;
- D : Distance station terrienne émission – satellite (m).
- K : est la constante de Boltzman

pour $\left(\frac{C}{N_0}\right)_m$ en $\left(\frac{C}{N_0}\right)_{mdB.Hz}$:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{mdB.Hz} = 10\log(G_e\ C_0) - 20\log\left(\frac{4\Pi D}{\lambda_m}\right) + 10\log\frac{G_s}{T_s} - 10\log(K)$$

- $10\log(G_e\ C_0)$: PIRE (dBW) de la station terrienne ;
- $20\log\left(\frac{4\Pi D}{\lambda_m}\right)$: AELm (dB) qu'on a déterminé déjà pour FH ;
- $10\log\frac{G_s}{T_s}$: G/T (dB/K) de satellite.

(G/Test le facteur de mérite est lie aux performances de l'antenne de réception. G désigne le gain de cette antenne. T est la température du bruit après l'antenne).

III. 7.2. Amplification satellite

Le satellite réalise deux opérations :

- La transposition de fréquence qui ne modifie la valeur des fréquences descendantes;

_ L'amplification du signal.

On obtient donc :

$$C'_1 = G_{sat}.C_1 \qquad \text{(III. 2)}$$

$$T'_s = G_{st}.T_s + T_i \qquad \text{(III.3)}$$

C'1: Puissance de l'amplificateur satellite (W);

C1 : Puissance reçue sur le satellite (W) ;

G_{sat} : Gain du satellite (amplificateur interne) ;

T's : la température de bruit en sortie du satellite.

On néglige en principe le facteur de bruit et la grandeur Ti.

Ti est le bruit d'intermodulation provoqué par l'amplification simultanée de plusieurs porteuses dans le même amplificateur, qui retombent dans la bande de sortie de l'amplificateur, distordant les signaux utiles. Cette distorsion n'a rien a voir avec un bruit blanc, mais pour des raisons de simplification, on symbolise ce bruit par une température de bruit Ti et on exprime en sortie du satellite le rapport :

$$\frac{C}{I} = \frac{C'_1}{K\,T_i}$$

III.7.3. Bilan de liaison descendant

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_d = \frac{G_r\ C'_0\ C'_s}{KT_r}\left(\frac{\lambda_d}{4\Pi D}\right)^2 \quad (Hz) \qquad (III.4)$$

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{d\ dB.Hz} = 10\log\left(G'_s\,C'_0\right) - 20\log\left(\frac{4\Pi D}{\lambda_d}\right) + 10\log\frac{G_r}{T_r} - 10\log(K) \qquad (III.5)$$

$10\log\left(G'_s\,C'_0\right)$: PIRE (dBW) de la station terrienne ;

$20\log\left(\frac{4\Pi D}{\lambda_d}\right)$: AELm (dB);

$10\log\frac{G_r}{T_r}$: G/T (dB/K) de station terrienne.

Gr : Gain de l'antenne station terrienne réception ;

Tr : Température de bruit station terrienne– réception (K).

III.7.4. Bilan global

On exprime le bilan descendant en tenant compte de l'amplification du bruit dans le satellite. On obtient alors la formule suivante avec des grandeurs linéaires :

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{total} = \frac{1}{\left(\frac{N_0}{C}\right)_m + \left(\frac{N_0}{C}\right)_d} \quad (Hz) \qquad (III.6)$$

m : mentant

d : descendant

Expression en NOMBRE (et surtout pas en dB).

On calcule ainsi le rapport complet en dB. Hz en prenant l'expression logarithmique de la relation précédente :

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{total-dB.Hz} = 10\log\left(\frac{C}{N_0}\right)_{total} \quad (dB.Hz)$$

III.8. Conclusion

Les systèmes satellite ont beaucoup évolué ces dernières années, avec notamment le passage de l'analogique au numérique.

Le satellite permet de répondre à de nombreuses contraintes :

-Déploiement rapide, quelles que soient la distance et la difficulté d'accès;

-Mutualisation des différents services sur les mêmes liens, avec partage ;

-Dynamique de la bande passante pour les différents services et spécifiquement celle de la téléphonie mobile ;

-Permet de réalisation des liaisons point à point et point à multipoint avec une grande fiabilité ;

- couverture de zones isolées et/ou faible densité de population;
- simplification des communications avec les mobiles ;
- coût de communications indépendant de la distance ;
- complémentarité avec les réseaux terrestres.

IV.1. Introduction

Dans cette partie, nous nous sommes intéressées à l'acquisition de données relatives à notre sujet d'étude concernant deux sites. Un site utilisant une liaison FH au niveau d'EL OUED (sud algérien) et un autre site fonctionnant avec une liaison satellite au niveau d'ALGER.

Dans le présent travail nous nous somme consacrés en premier temps à la présentation des caractéristiques des deux liaisons à partir des données rapporter au cours de notre stage tel que : les coordonnées géographiques des sites, diamètre des antennes , puissance émise, bande passante , distance , fréquences d'émissions et réception , ainsi que la marge .

Le réseau utilisé par OTA (Djezzy) est le réseau haut débit long distance pour la transmission des faisceaux hertziens qui peut se faire à travers le multiplexage SDH ou PDH selon les capacités :

-Le multiplexage SDH se fait en STM1 (155 Mbit/s) ;

-Le multiplexage PDH se fait en 4X2 Mbit/s minimum, cette offre est réservé aux débits ne dépassant pas 16X2 Mbit /s.

Concernant la transmission par satellite, OTA (Djezzy) utilise le système de communication EUTELSAT (AB3: Atlantic Bird 3) qui est situé à la position 5° W.

Ce satellite offre une couverture sur tout l'Europe, le moyen- orient, l'Afrique, l'inde et de larges zones de l'Asie et du continent américain et il fait partie parmi des trois premiers opérateurs mondiaux.

Dans un second temps, nous avons établi le bilan de liaison, on se focalise sur le calcule de l'atténuation dans les conditions de propagation qui peuvent se présenter sous forme d'interférences, contraintes du aux obstacles, ainsi que les conditions atmosphériques (temps couvert, pluvieux).

IV.2. Description de la liaison FHN

Notre liaison est située au niveau de la wilaya d'El Oued, au Nord-est de l'Algérie. La wilaya existe depuis 1984, elle compte douze daïras et trente communes La wilaya d'El Oued est situées au nord-est du Sahara algérien. Elle est délimitée :

- au nord, par les wilayas de Tebessa et Khenchela ;
- au nord et au nord-ouest par la wilaya de Biskra ;
- au sud et au sud-est par la wilaya de Ouargla ;
- et à l'est par la Tunisie.

➢ Site- A

El khoubna est un village dans la commune de BenNaceur, Daira Taibet, Wilaya de Ouargla.

➢ Site-B

Edaouia est un village dans la commune de Oued el Alanba, Daira Mih Ouansa, Wilaya d'El Oued le terrain revient à Orascom Telecom.

Nous allons étudier la liaison FHN reliant la région d'El khoubna à la région Edaouia cette liaison utilise le multiplexage SDH avec un débit de STM1 soit 155 Mbit/s pour chaque canal ainsi cette liaison fonctionne en full duplex c'est-à-dire que le lien FHN étudié est bidirectionnelle, de ce fait deux fréquences distinctes sont exploitées F1 et F2,introduisant une diversité d'espace pour réduire les phénomènes d'interférence ,un des principaux problèmes déjà mentionné dans la théorie la présence d'un rayon réfléchi en plus du rayon direct qui entraîne la formation d'interférences dans le plan vertical des antennes de réception. La puissance mesurable présente donc des pics de sur-champ et des creux de sous-champ suivant un axe vertical. L'idée est de placer une deuxième antenne de réception distante de la première d'une demi-frange

d'interférence, ou d'un multiple impair de celles-ci, de manière à ce que les champs principaux et de diversité soient corrélés en opposition. Le champ combiné permet ainsi de s'affranchir très largement des instabilités du champ dues aux réflexions ou aux trajets multiples. Par ailleurs, la méthode présente l'avantage d'une plus grande souplesse, et de performances généralement supérieures. Elle est de plus économe en fréquences.

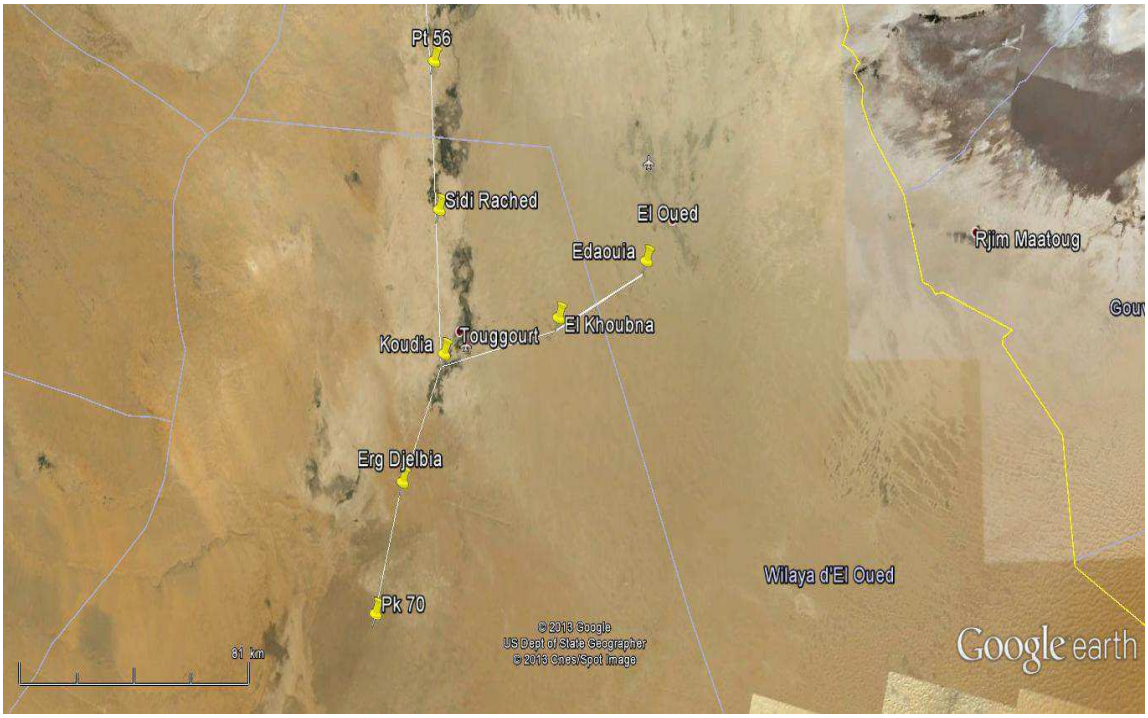


Figure VI.1. Map géographique présente la localisation de la liaison El khoubna, Edaouia

IV .2.1. Présentation des données

IV .2.1. 1. Caractéristiques de la liaison FHN

stations	Site−A	Site−B
Nom du site	El khoubna	Edaouia
Code du site	C30S270	C39S271
Latitude	33 06 04 80 N	33 14 17 40 N
Longitude	006 25 33 00E	006 45 22 50E
Altitude(m)	106	99

Station	Site _A	Site _B
Antenne Principale		
Hauteur de l'ANT (m)	60	65
Diamètre(m)	3	
Antenne Diversité		
Hauteur de l'ANT (m)	40	50
Diamètre(m)	2,4	
Distance entre les deux sites (Km)	34 ,34	
Polarisation	Horizontale	
Capacité	1STM1 soit 155 Mbps	
Fréquence	7(GHz) (F1=7.428 ; F2=7.589)	
Bande passante	28Mhz	

TX principale (dBm)	32 soit 1,58 Watt	
RX principale (dBm)	-37,9	
RX diversité (dBm)	-38,74	-39,03
Critères de seuil Rx	BER 10-6	
seuil Rx (dBm)	-71 ,5	
Marge d'évanouissement thermique (dB)	33 ,6	
Marge d'évanouissement dispersif (dB)	47,2	
Marge d'évanouissement efficace (dB)	32,2	

IV.2.1.2.Caractéristiques de la liaison Satellite

- **Satellite EUTELSAT**
  - Désignation de la liaison satellite : AB3 (36 MHz)
  - Position orbitale du satellite : 5°W.
  - Débit de 41 Mbit/s avec modulation QPSK et correcteur d'erreurs 5/6.

Dans son principe, cette technique de modulation vise à réduire la densité spectrale de puissance du signal à émettre en l'étalant sur une bande de fréquence de très grande largeur. Ce procédé de modulation à étalement de spectre constitue une technique particulièrement souple, et permet dans le cadre des télécommunications par satellites, de satisfaire les normes d'allocation de bandes de fréquences. En effet, les émissions d'informations via les satellites, sont sensibles et peuvent être facilement interceptées si elles ne sont pas codées efficacement.

IV.2.1.2.1. Liaison montante (Dar El Beida)

Caractéristiques	
Fréquence montante	14,375 GHz
lieu d'émission	ALG- Alg-013
Latitude du lieu d'émission	36°47'N
Longitude du lieu d'émission	03°03'E
affaiblissement du aux gaz atmosphériques sur le trajet montant	0,1 dB

IV.2.1.2.2.Liaison descendante (BOUZAREAH)

Caractéristiques	
fréquence descendante	11,075 GHz
Lieu de réception	ALG-Alg-bouzareah
Longitude du lieu de réception	36°47'N
du lieu de réception	03°03'E
affaiblissement du aux gaz atmosphériques sur le trajet descendant	0,1 dB
Type de station descendante	Ku-1.2 m

IV.2.1.2.3. Répéteur

Caractéristiques	
Bande passante nominale	36MHz
Réduction de puissance à l'entrée à plein charge (exploitation multiporteuses)	6,2 dB
Réduction de puissance en sortie à plein charge (exploitation multiporteuses)	4,2 dB

IV.2.1.3. Analyse de l'affaiblissement du à la pluie

Caractéristiques	
Plage maximum de régulation de puissance sur le trajet montant	0 dB
affaiblissement du à la pluie en montée supposée en dan le bilan de liaison	8,1 dB
recul de puissance à l'entrée en présence de l'affaiblissement supposé en montée	13,2 dB
recul de puissance en sortie en présence de l'affaiblissement supposé en montée	10,6 dB
Marge de liaison en présence de l'affaiblissement supposé en montée	0,7 dB
affaiblissement du à la pluie s descente supposé dan le bilan de liaison	6,9 dB
dégradation du g/t due à la pluie sud le trajet descendant	4,1 dB
c/n liaison descendante en présence de pluie	9,1 dB
Marge de liaison en présence de l'affaiblissement supposé s descente	0,7 dB

IV.2.1.4. Analyse de marges de liaison en ciel clair

Caractéristiques	
Distance trajet montant	37316 km
affaiblissement trajet montant par ciel clair	207,1 dB
C/N liaison montante par ciel clair	23,5 dB
Distance trajet descendant	37316 km
affaiblissement trajet descendant par ciel clair	204,9 dB
C/N liaison descendante par ciel clair	20,1 dB
Marge de liaison par ciel clair	8,4 dB

IV.2.1.5. Dimensionnement préliminaire de la station d'émission VSAT (Dar El Beida)

Caractéristiques	
Taille d'antenne	1.2 m
Fréquence d'émission	14385,4000 KHz
Fréquence de réception	11085,4000 KHz
Symbole rate	1.250 Mbaud

IV.2.1.6. Dimensionnement préliminaire de la station de réception (HUB de BOUZAREAH)

Caractéristiques	
diamètre de l'antenne de réception	7,6 m
gain de l'antenne de réception	59,3 dBi
Perte après l'ampli de puissance	4dB
Puissance de la porteuse à la sortie de l'ampli, par ciel clair	14,7 Watts
Puissance de la porteuse à la sortie de l'ampli, en présence de la pluie	14,7 Watts
Fréquence d'émission	14267,9200 KHz
Fréquence de réception	10967,9200 KHz

IV.3. Interprétation des résultats pour la liaison FHN : cas de la liaison khoubna à Edaouia.

IV.3.1. Représentation des données Tx pour les sites A et B

Les figures (IV.2), (IV.3) et (IV.4) présentent les graphs des données d'acquisition du signal émis Tx du site A. Les figures (IV.5), (IV.6) et (IV.7) présentent les graphs des données d'acquisition du signal émis Tx pour le site B. Ceci pour les différents états de l'atmosphère, atmosphère en ciel clair (Cs), ciel couvert (CLD) et pluvieux (R).

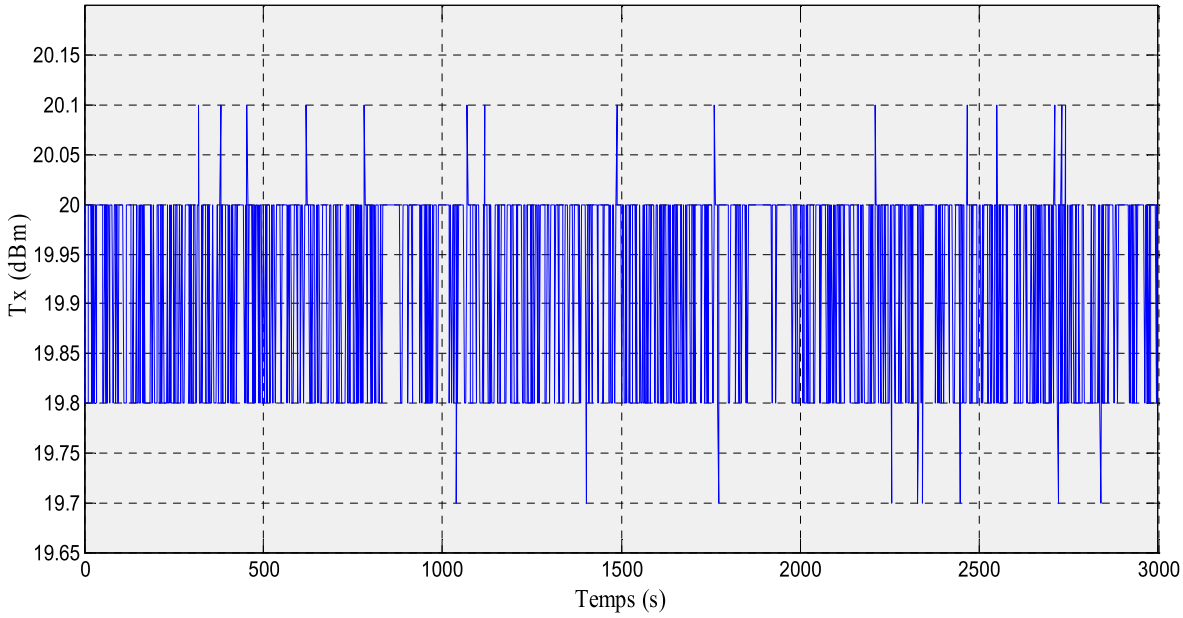


Figure IV.2. Représentation de Tx en Cs en fonction du temps

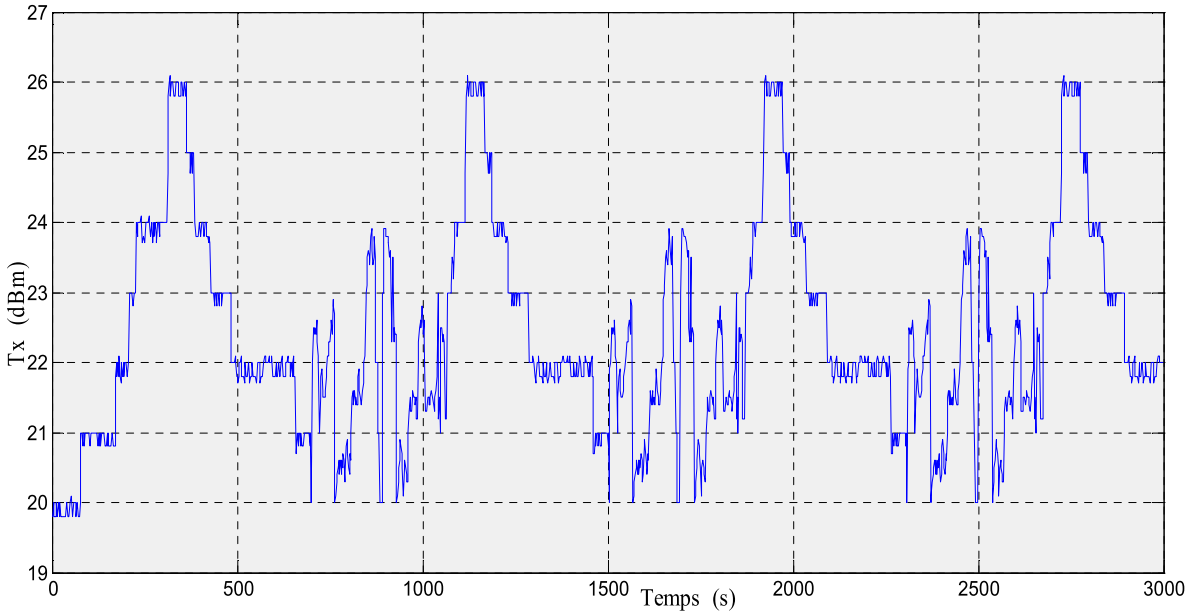


Figure IV.3. Représentation de Tx en CLD en fonction du temps

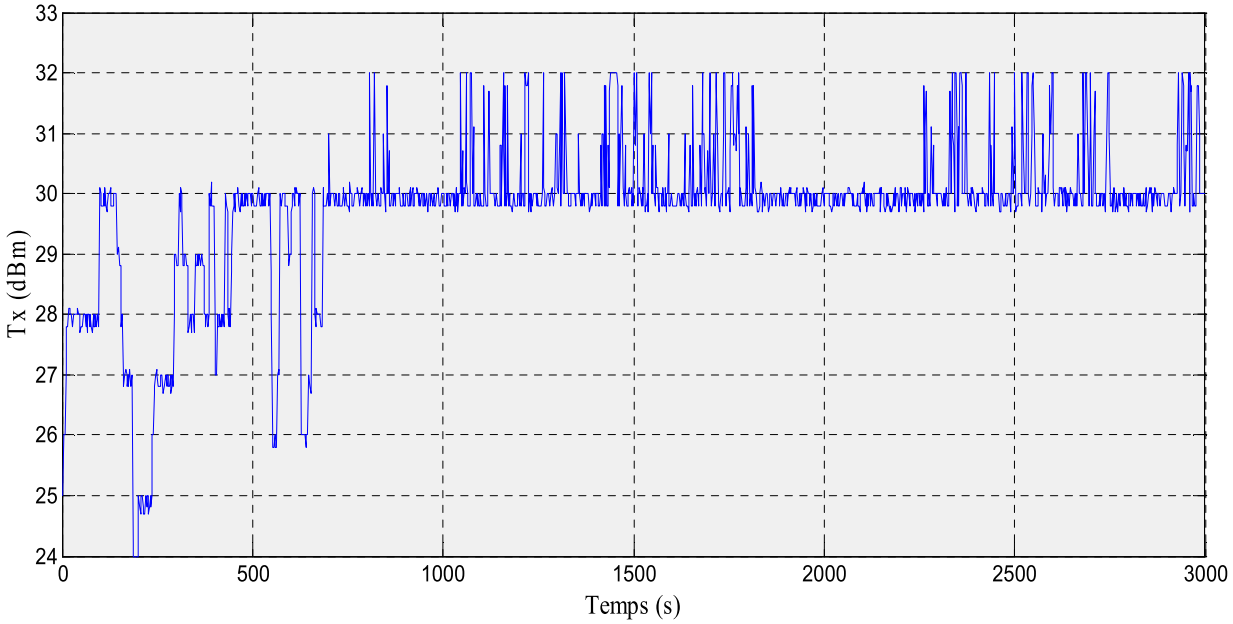


Figure IV.4. Représentation de Tx en R en fonction du temps

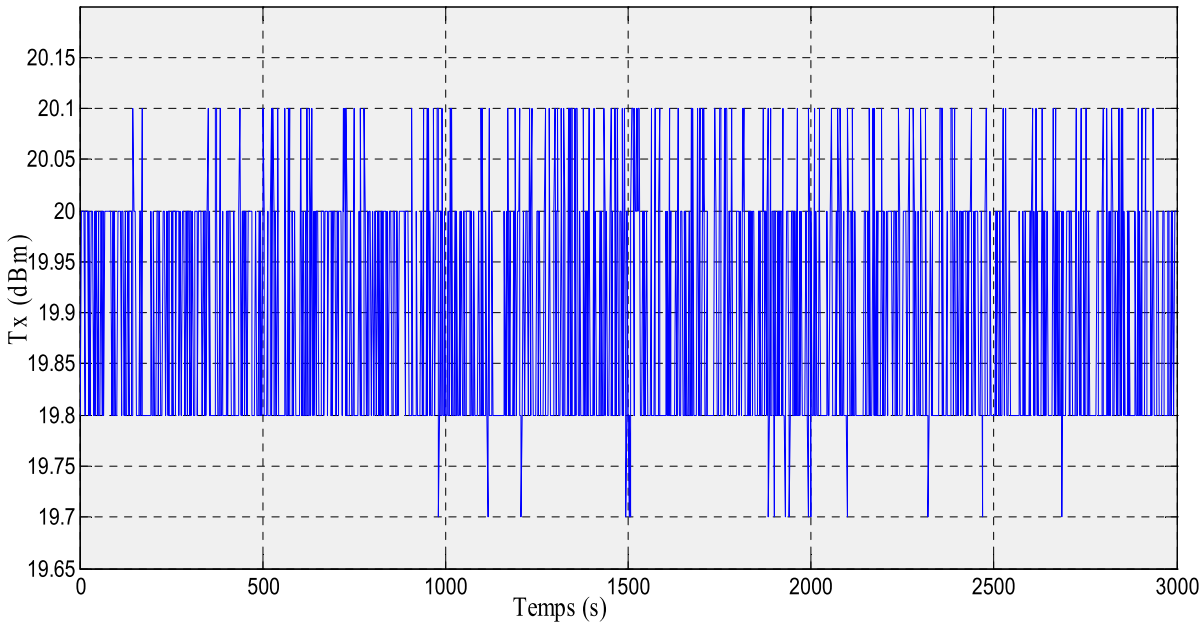


Figure IV.5. Représentation de Tx en Cs en fonction du temps

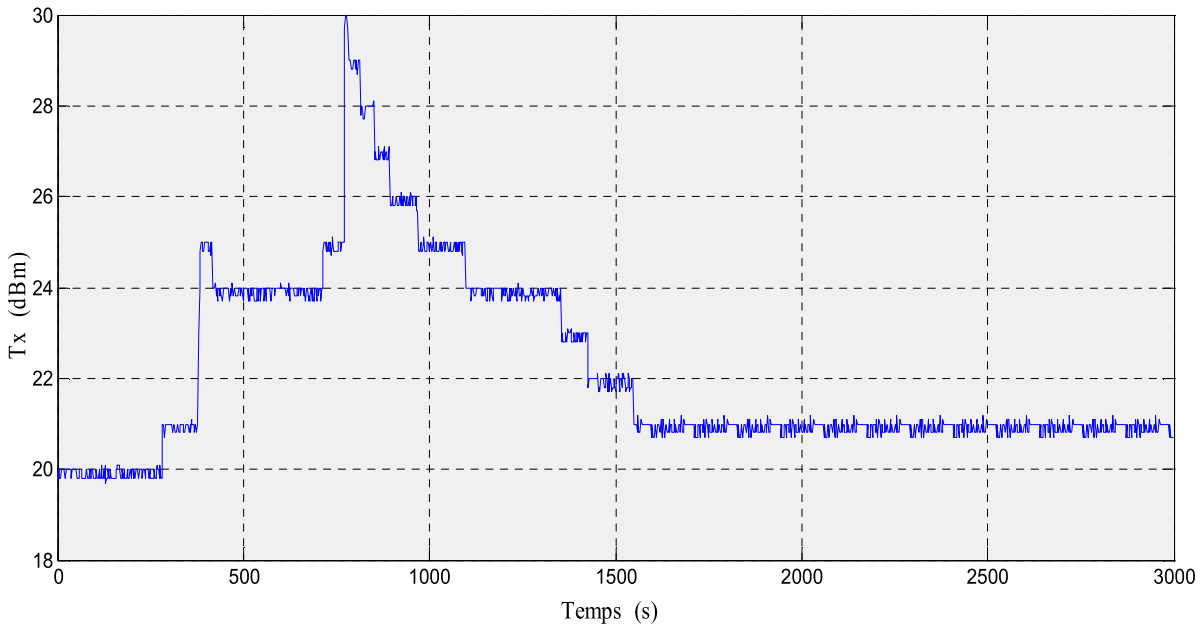


Figure IV.6. Représentation de Tx en CLD en fonction du temps

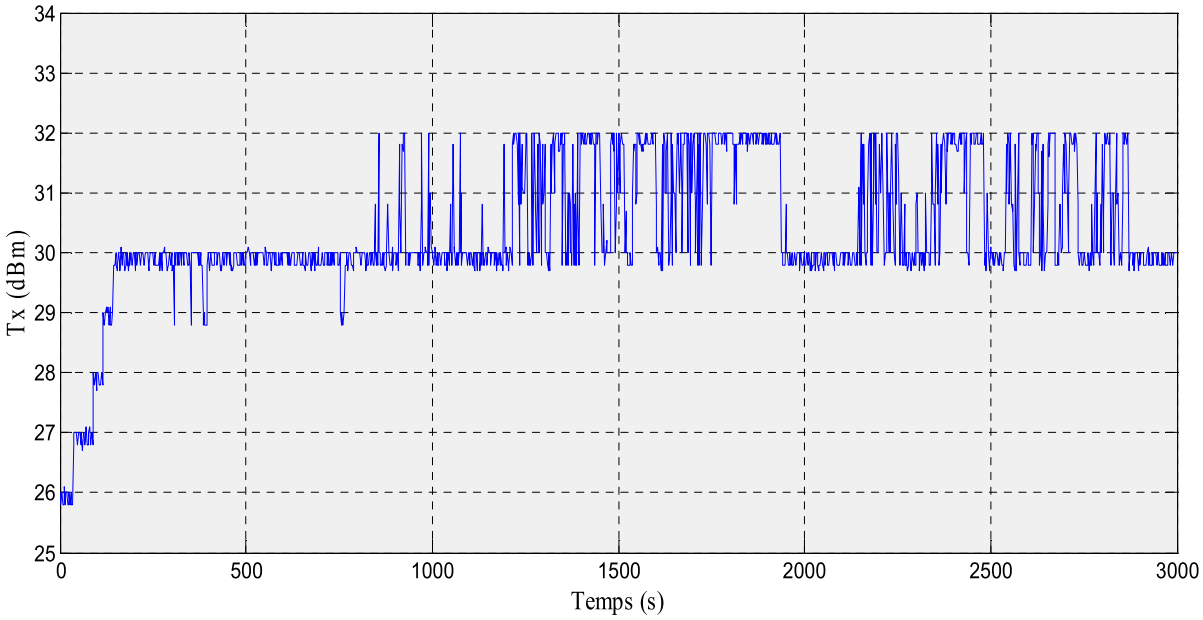


Figure IV.7. Représentation de Tx en R en fonction du temps

La figure en Cs montre que la variation de Tx pour tout le long du trajet , est presque constante pendant toute la durée de notre acquisition , d'une valeur qui varie entre 19.8(dBm) et 20(dBm) pour le site A et B respectivement, mais dans un certain temps on obtient des pics qui varie entre 19.7(dBm) et 20.1(dBm) pour les deux sites ,mais ceci n'a aucune influence sur le signal car les pertes dû aux bruit thermiques des équipements ainsi que les pertes feeders et pertes par guides d'ondes sont négligeable car en temps clair les effets extérieur ne sont pas présente par exemple: le vents, l'humidité…

Ainsi pour la figure en mode CLD nous remarquons une augmentation d'intensité du signal pendant la période de temps de [0;370s] avec une valeur qui atteint 26 (dBm) pour le site A, et pour le site B la puissance émise atteint 30 (dBm) dans l'intervalle [0;800s] , dans ce cas nous avons obtenu un bon signal d'émission malgré les perturbations causé par les différents paramètres d'absorptions tel que la pression atmosphériques, l'humidité, et les effets du bruit thermique, ainsi que les pertes qui dépendent des équipements tel que les pertes feeder, et le guide d'onde d'émission tous cela influence sur le signal mais pour compenser ces différents pertes qu'on a

énumérer une marge supplémentaire a était ajouter ce qui fait que notre signal est meilleur en temps couvert qu'on temps clair et cela grâce a des précautions pris en compte par l'opérateur .A partir de 370s pour le site A et a partir de 800s pour le site B nous remarquons une diminution de Tx jusqu'à 20 (dBm) pour le site A et 21(dBm) pour le site B et cela est dû a la réduction successive de la marge supplémentaire par l'opérateur car les effets qui influence sur le signal commence a disparaitre .

Tx présente une importante augmentation en temps pluvieux avec des valeurs qui vont d'environs 30(dBm) à 32(dBm) pour le site A et B cela dépendent aussi essentiellement de la marge supplémentaire ajouter qui est plus élevé par rapport a celle appliquer en temps couvert et cela pour régler la puissance émise car l'intensité des fortes pluie perturbe et déséquilibre la liaison .

IV.3.3. Représentation Rx pour le site A et B

De la même façon, nous représentons les données relatives au signal reçu Rx. Ainsi les figures (IV.8), (IV.9) et (IV.10) présentent les graphs des données d'acquisition du signal reçu Rx du site B. Les figures (IV.11), (IV.12) et (IV.13) présentent les graphs des données d'acquisition du signal reçu Rx pour le site A. Ceci pour les différents états de l'atmosphère, atmosphère en ciel clair (Cs), ciel couvert (CLD) et pluvieux (R).

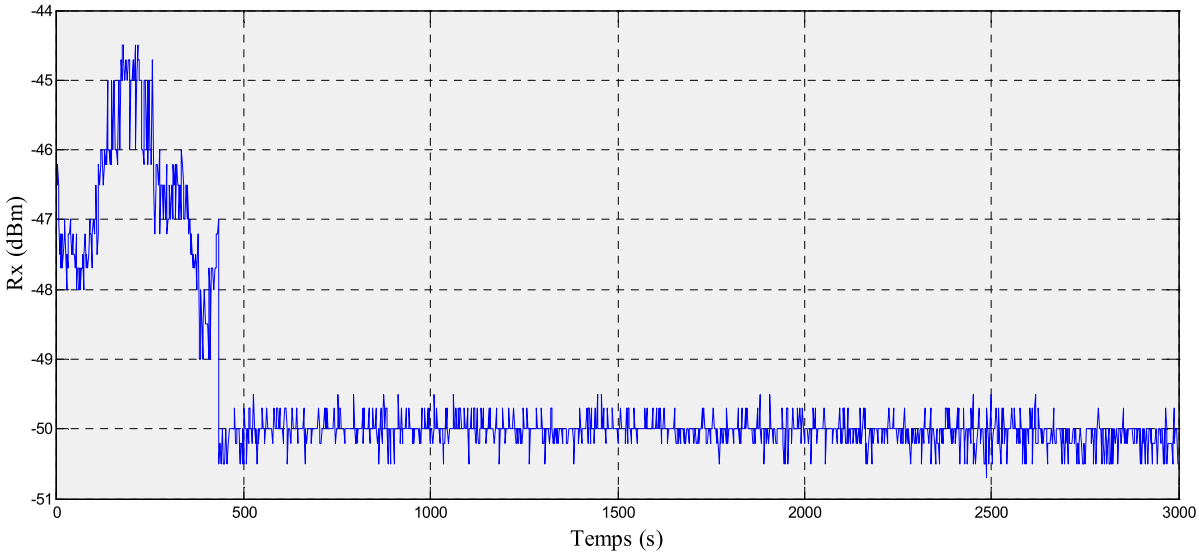


Figure IV.8. Représentation de Rx en Cs en fonction du temps

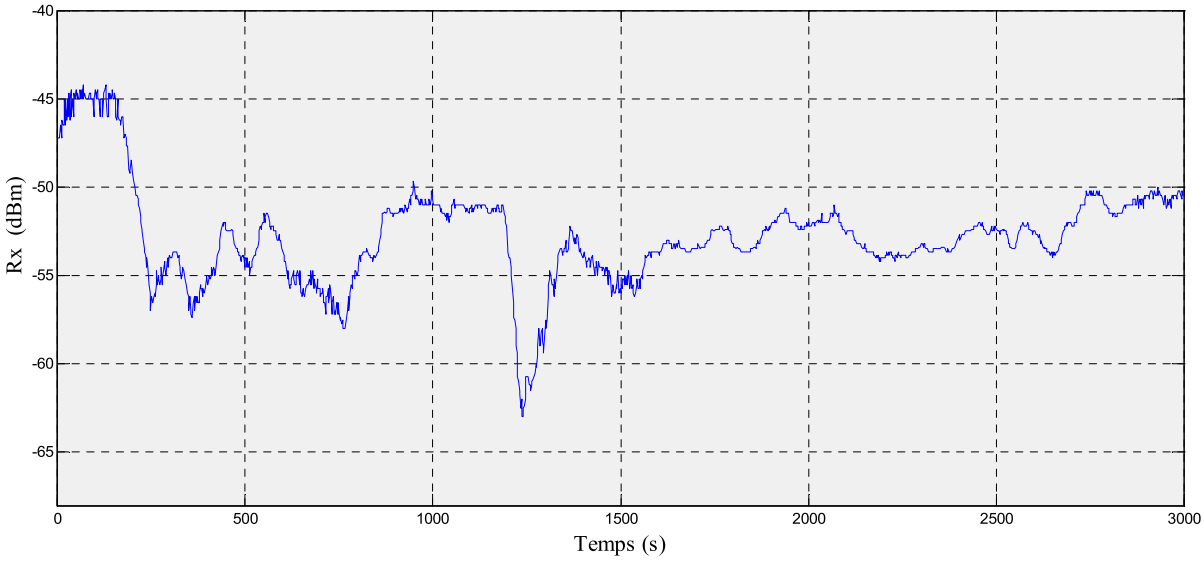


Figure IV.9. Représentation de Rx en CLD en fonction du temps

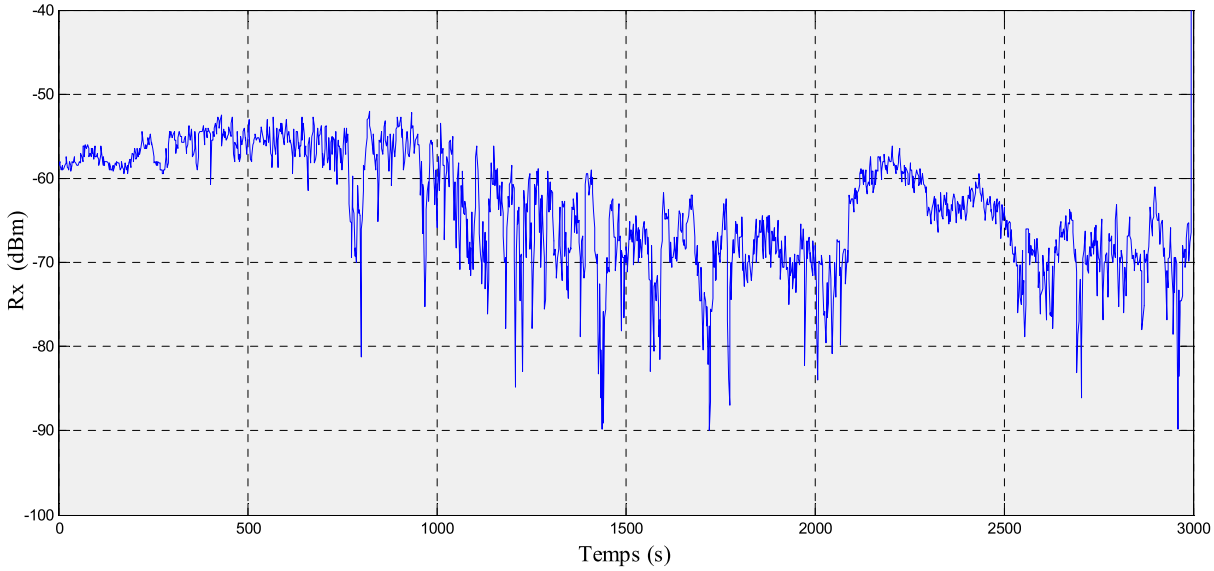


Figure IV.10. Représentation de Rx en R en fonction du temps

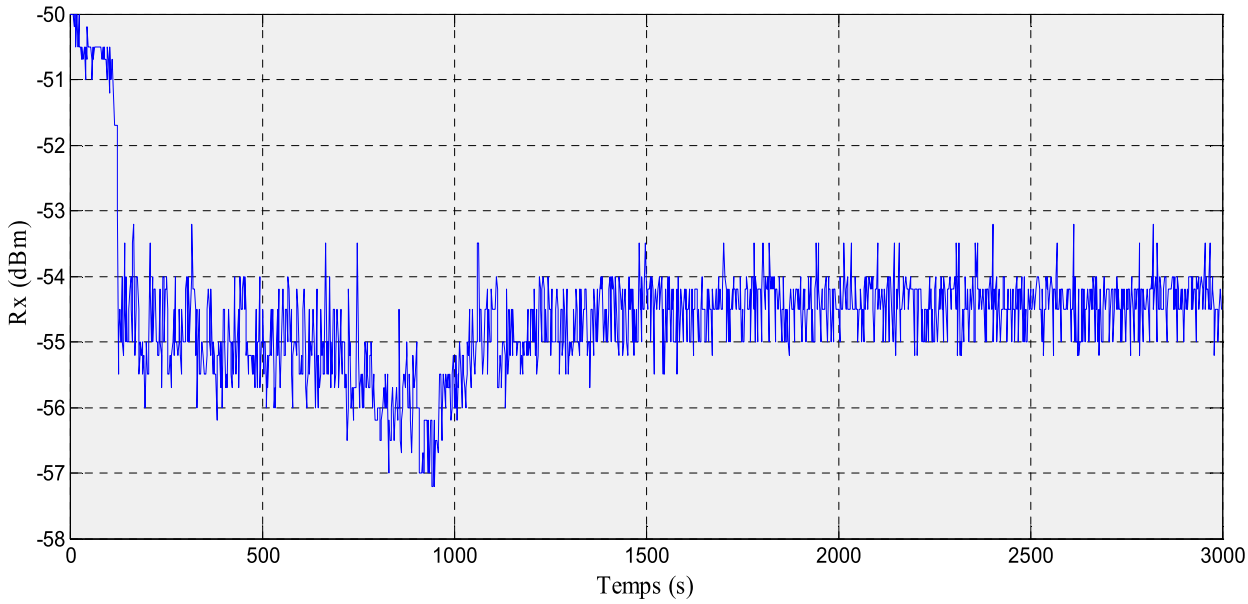


Figure IV.11. Représentation de Rx en Cs en fonction du temps

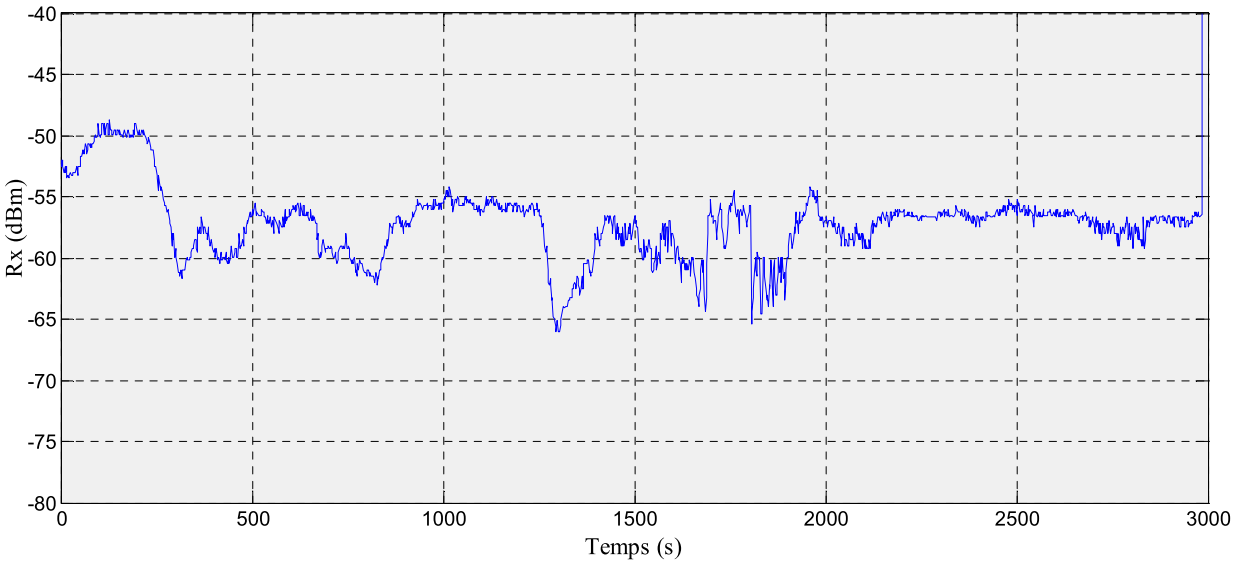


Figure IV.12. Représentation de Rx en CLD en fonction du temps

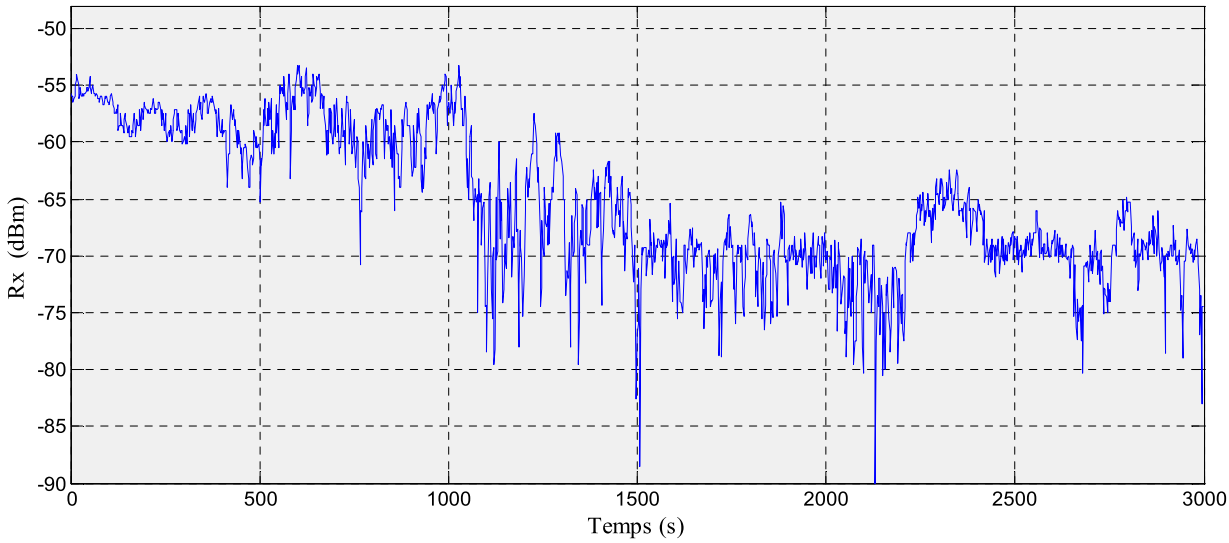


Figure IV.13. Représentation de Rx en Rine en fonction du temps

Nous constatons que la puissance reçu Rx est diminué par rapport à Tx qu'on a émise en Cs, CLD, R que ce soit en site A ou en site B. On peut dire que le signal Rx reçu qui est variable dans le temps est lisible et stable en Cs à partir de 1000s pour le site A et à partir de 500s pour le site B d'une valeur constante entre

-54(dBm) et -55(dBm) pour le site A et entre -49.5 (dBm) et -50.5 (dBm) pour le site B car en atmosphère claire le signal ne subie aucune influence. En CLD le signal est absorbé avec une valeur qui varie entre -55(dBm) et -66(dBm) pour le site A et entre -50(dBm) et -63(dBm) pour le site B, on peut déduire que cette absorption provient par les gaz atmosphériques, le brouillard, l'humidité et pendant un certain temps ces conditions atmosphériques peuvent entrainer de multiples réflexions. Par contre, le champ reçu est très faible en R, tel que à partir de 1000s, Rx varie de -53(dBm) à -90(dBm) environs, ce qui dépasse largement le seuil fixé par Orascom Telecom qui est de -71.5 (dB) . On peut interpréter cette absorption de l'énergie du signal Rx dans les cas: Cs, CLD ,R par les pertes de guide d'onde et feeder au niveau du réception ,sans oublier aussi en R, la pluie forte qui peut déséquilibrer l'installation de l'antenne réceptrice et peut être aussi provoquer par les réflexions multiples. Ainsi le changement de l'indice de réfraction de l'air dû aux couches atmosphériques et spécifiquement la troposphère, qu'ont lieu tous les phénomènes météorologiques en présence de la pluie qui entraîne des pertes remarquables par absorption et diffusion du signale.

IV.3.5. Représentation de l'atténuation intermédiaire

Les figures (IV.14) , (IV.15), (IV.16), présentent les graphs de l'atténuation intermédiaire pour la transmission du site A vers le site B avec une fréquence F1=7.428 GHz , Les figures (IV.11), (IV.12) et (IV.13) présentent les graphs de l'atténuation intermédiaire pour la transmission du site B vers le site A avec une fréquence F2= 7.589 GHz .Ceci pour les différents états de l'atmosphère, atmosphère en ciel clair (Cs), ciel couvert (CLD) et pluvieux (R).

Par définition l'affaiblissement ou l'atténuation est le rapport de la puissance à la sortie du système Rx sur la puissance à son entrée Tx qui est calculée par l'équation suivante :

$$\alpha_{int}\,(\mathrm{dB}) = \mathrm{R_x}\,(\mathrm{dBm}) - \mathrm{T_x}(\mathrm{dBm})$$

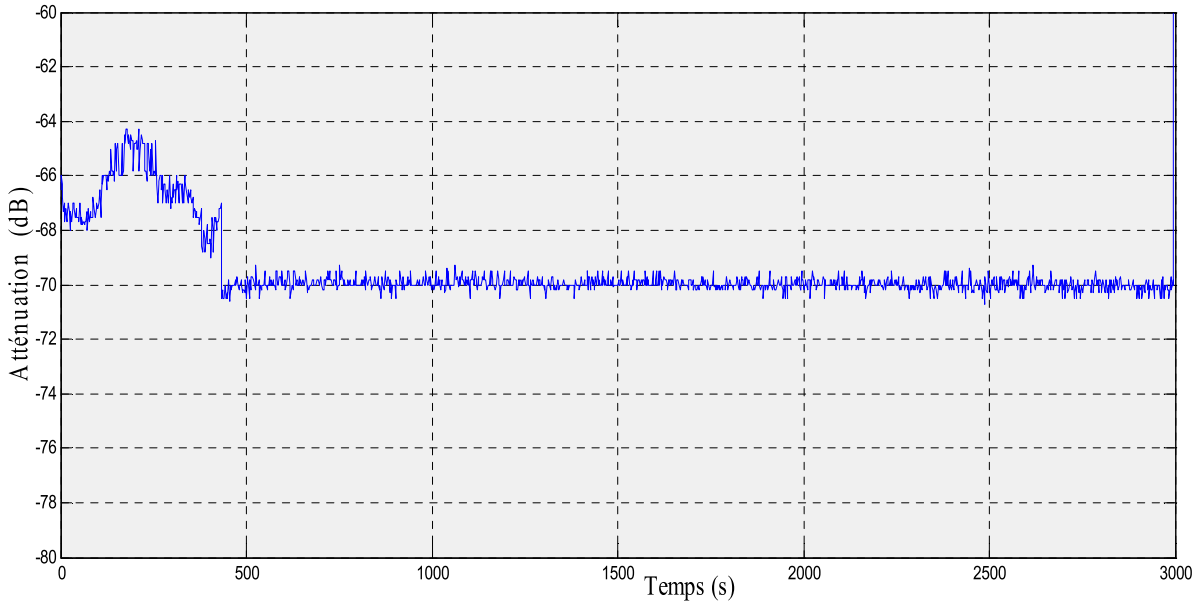


Figure IV.14. Représentation de l'atténuation α_{int} Cs en fonction du temps

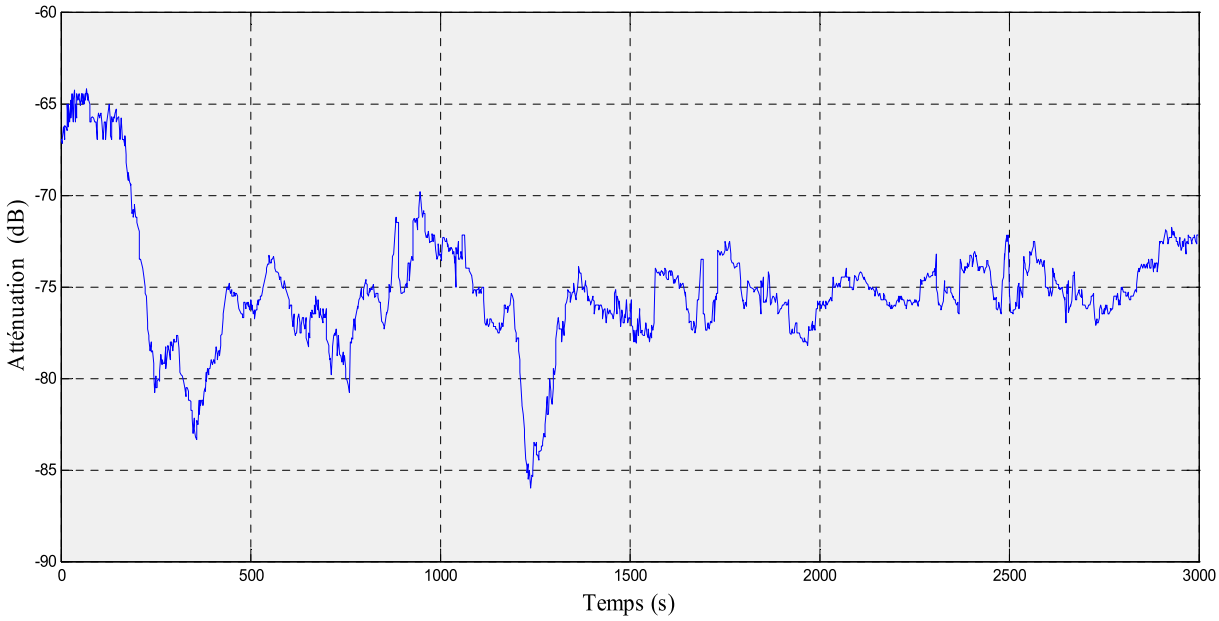


Figure IV.15. Représentation de l'atténuation α_{int} CLD en fonction du temps

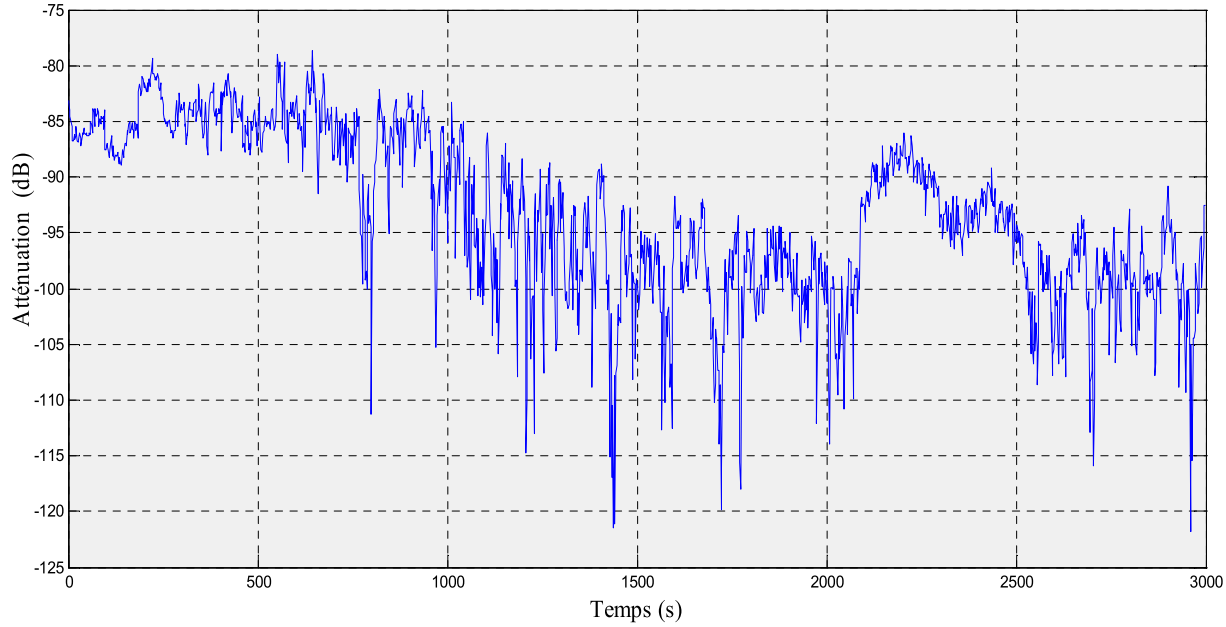


Figure IV.16. Représentation de l'atténuation α_{int} en R en fonction du temps

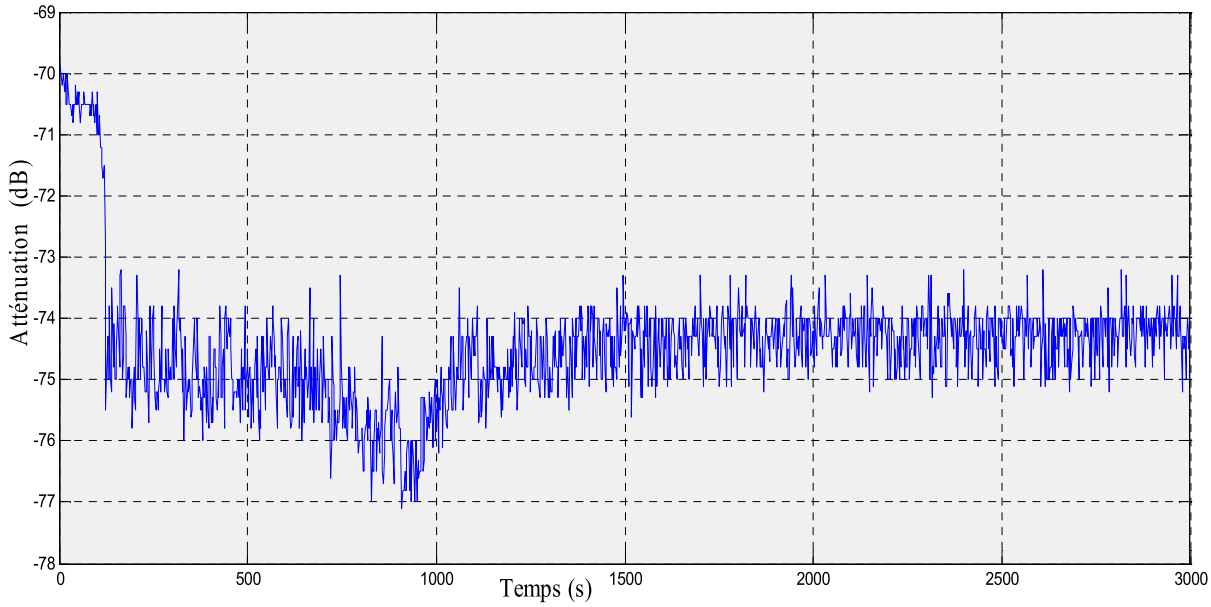


Figure IV.17. Représentation de l'atténuation α_{int} Cs en fonction du temps

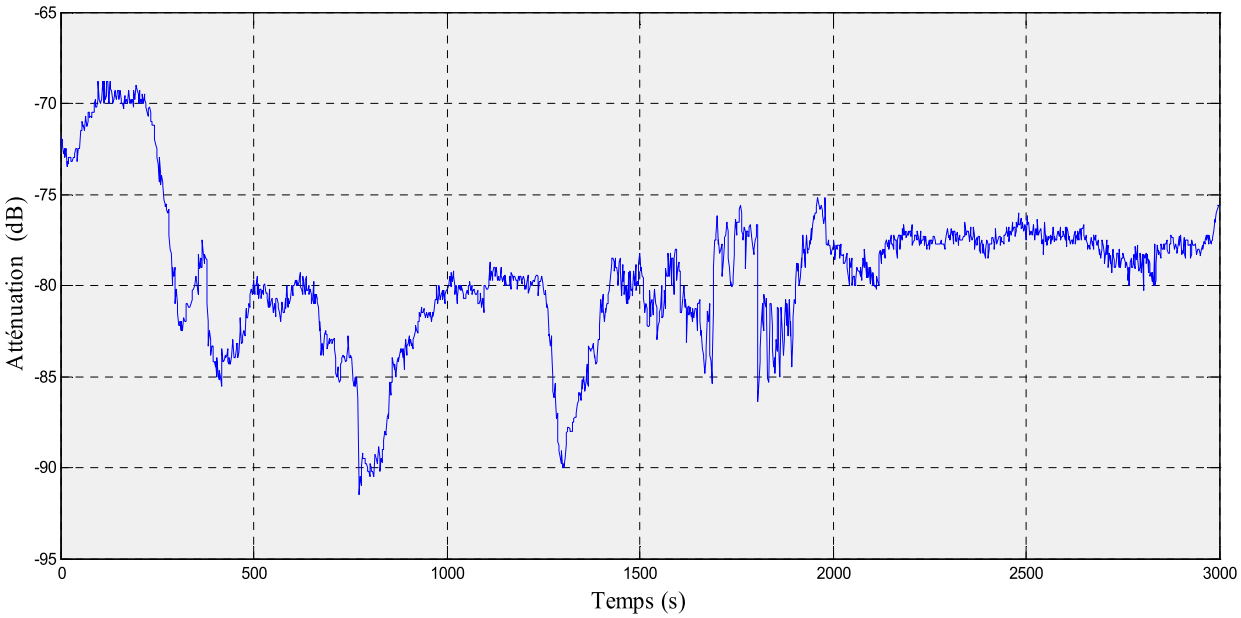


Figure IV.18. Représente l'atténuation α_{int} CLD en fonction du temps

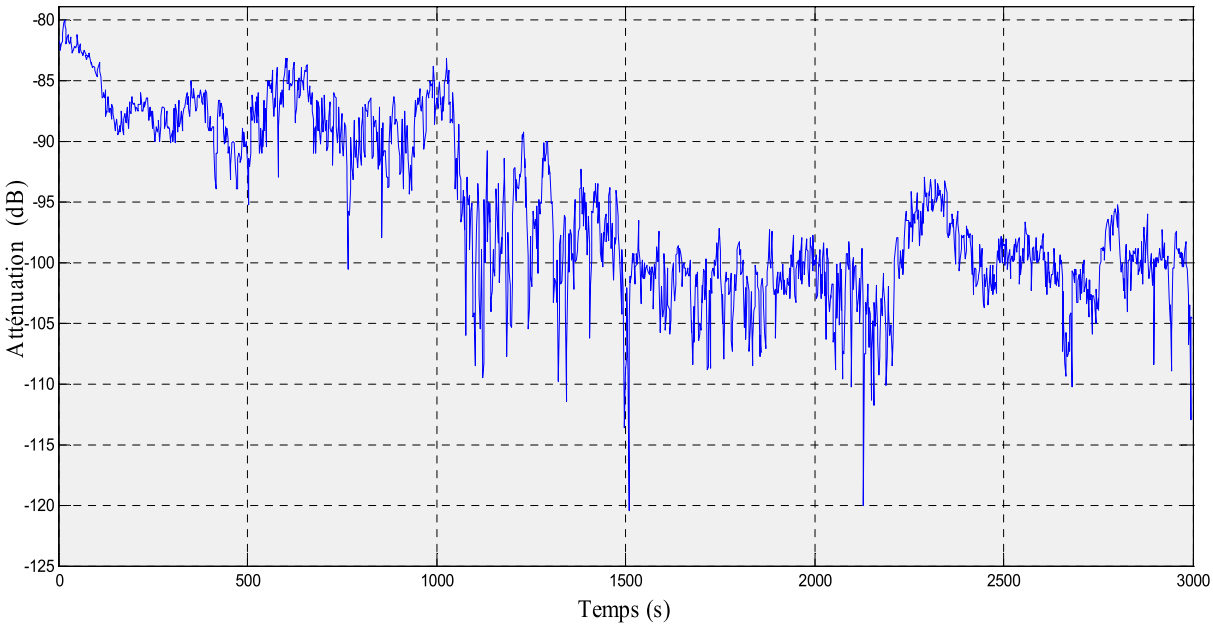


Figure IV.19. Représentation de l'atténuation α_{int} R en fonction du temps

L'atténuation intermédiaire en Cs pour la transmission en fréquence F1 diminue de -65(dB) jusqu' à -70(dB) puis reste stable dans l'intervalle de [500;3000s] avec une valeur de -70(dB). Pour la transmission en F2 l'atténuation dépasse le seuil et atteint -77(dB) pendant toute la période d'acquisition. On peut interpréter Ceci par la dégradation des performances du matériel pour le canal de propagation F1.Si on doit comparer l'atténuation pour les deux canaux F1 et F2 on constate qu'elle est plus élevée pour la propagation F2. Cela peut être dû a des interférences a la réception, ces interférences sont causés par la réception d'une même onde, propagée selon des chemins différent appelé "trajet multiples", et les brouillages provenant des sources externes telles que les radars ou d'autres liaisons radioélectriques ou provenant de sources internes qui sont directement liées à la conception des équipements qui ont une influence très importante sur la qualité de transmission. L'atténuation intermédiaire en mode CLD peut aller jusqu' à -86(dB), pour le canal F1 et -92(dB) pour le F2 mais a partir de la période 1400s le champ varie entre -73(dB) et 77(dB) pour le canal F1, et entre -75(dB) et -85(dB) pour F2

,nous réalisons que la marge a était dépassée car en temps couvert la propagation des ondes radioélectriques en espace libre subit plusieurs influences dû a l'atténuation créée par les gaz (vapeur d'eau contenues dans l'atmosphère..), mais les différentes variations peut être expliquées par le fait que le signal est affecté par un phénomène de réflexion lorsque les ondes réfléchissent sur la terre ou sur la couche de l'ionosphère par exemple.

L'atténuation intermédiaire en R est très élevée pour les deux sites tel que ça atteint environs -120 (dB), ceci, dépasse la marge d'affaiblissement, ce qui signifie que la liaison est sensible aux intempéries.

IV.3.7. Représentation de l'atténuation totale

Les figures (IV.20), (IV.21), présentent les graphs de l'atténuation totale pour la transmission du site A vers le site B avec une fréquence F1 .Les figures (IV.22), (IV.23), présentent les graphs de l'atténuation total pour la transmission du site B vers le site A avec une fréquence F2.

Dans le but de simplifier la représentation, nous considérons l'atténuation totale définit comme suit :

$\alpha_{\text{tot}} = \alpha\,(\text{dB}) - \alpha_{(\text{Cs})}(\text{dB})$ avec $\alpha\,(\text{dB})$: $\alpha_{(\text{CLD})}(\text{dB}), \alpha_{(\text{R})}(\text{dB})$

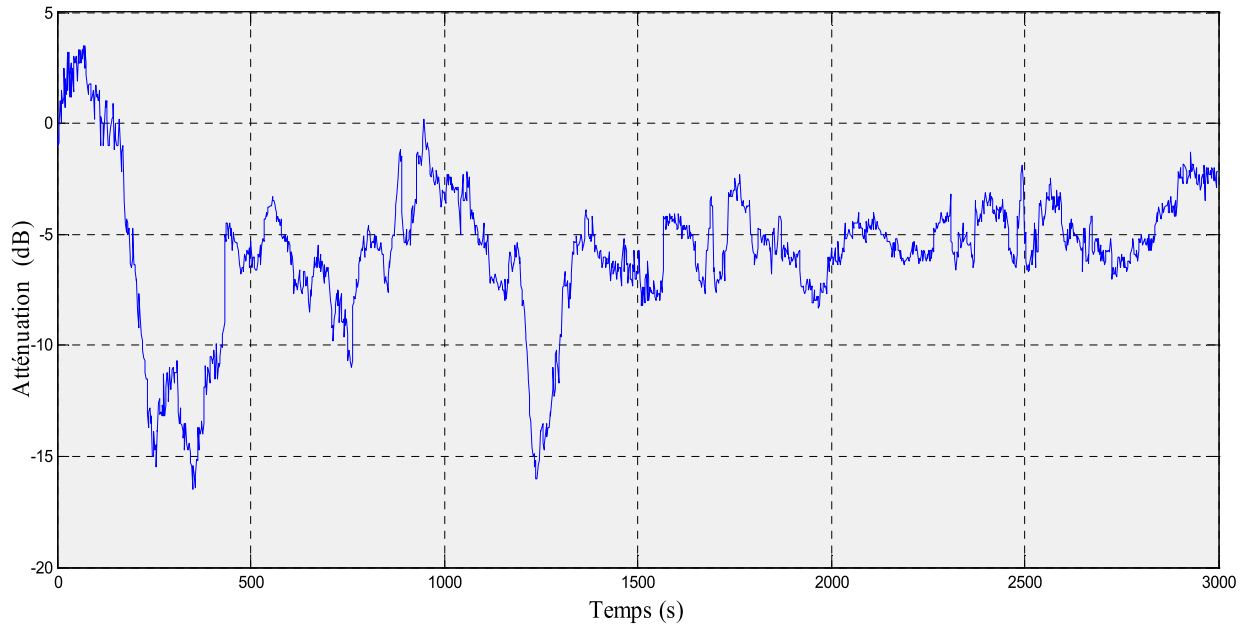


Figure IV.20. Représentation de l'atténuation α_{tot} en CLD en fonction du temps

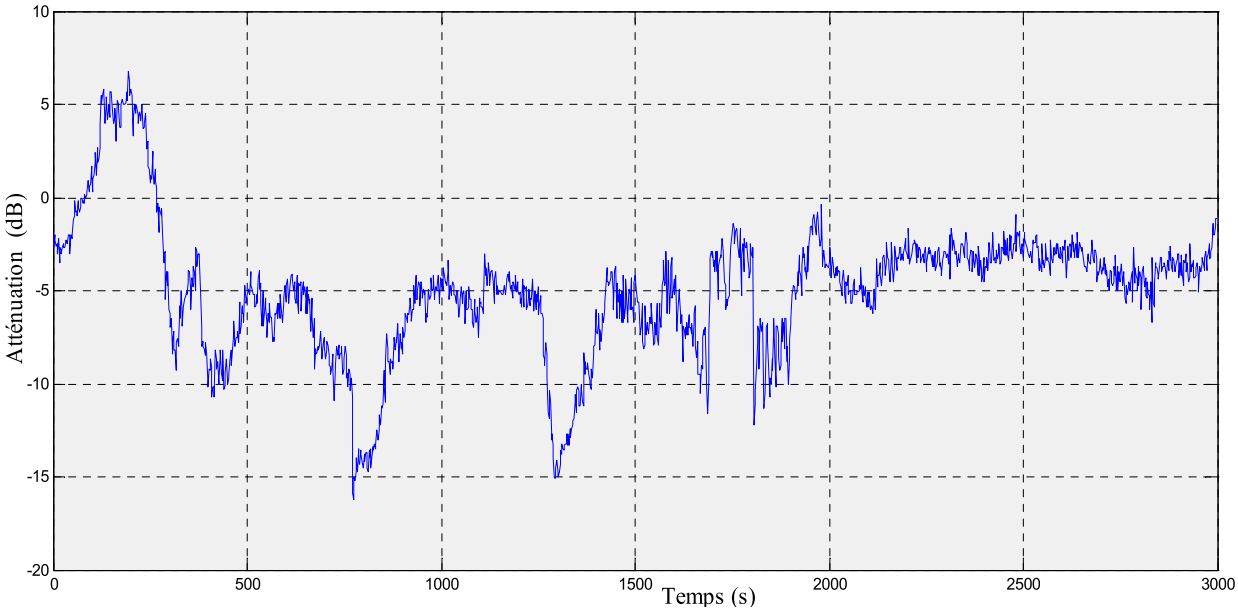


Figure IV.22. Représentation de l'atténuation α_{tot} en CLD en fonction du temps

Nous avons pris le temps clair (Cs) comme référence, pour mieux visualiser les perturbations qui existent en temps couvert ainsi qu'on temps pluvieux .En comparant l'atténuation totale en CLD pour les deux sens de transmission de la liaison, nous constatons que le signal est correcte d'une valeur qui va de 5(dB) jusqu'à -15 (dB) de ce fait il ne dépasse pas le seuil donc notre liaison reste opérationnelle malgré qu'on ciel couvert les conditions atmosphérique sont brouillé.

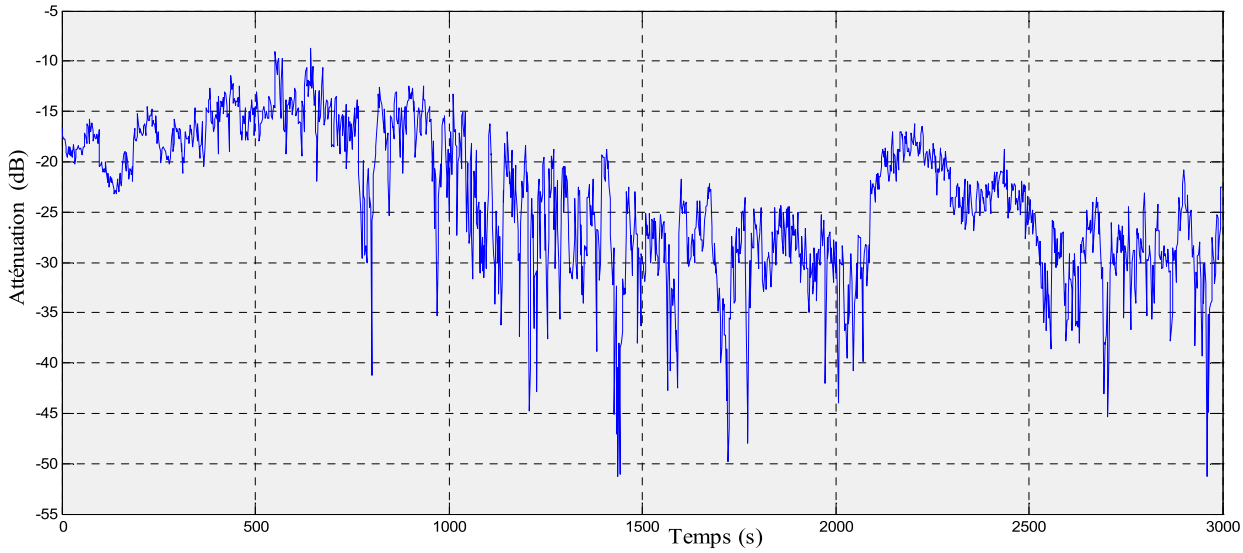


Figure IV.21. Représentation de l'atténuation α_{tot} R en fonction du temps

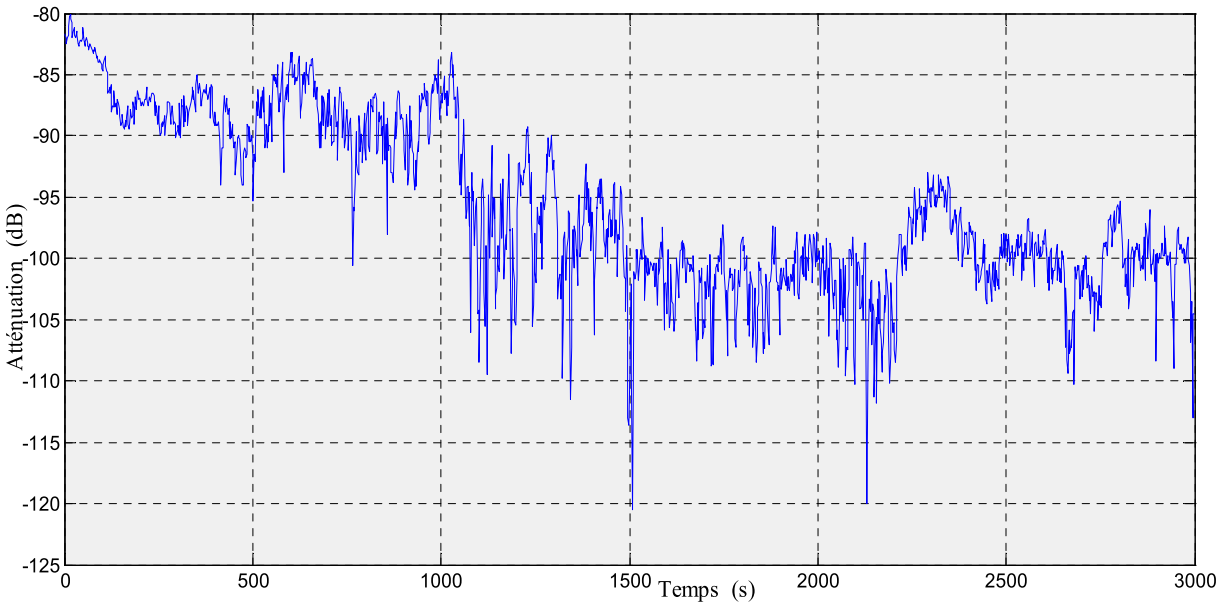


Figure IV.23. Représentation de l'atténuation α_{tot} en R en fonction du temps

En temps pluvieux on remarque que le signal reste correcte entre -9 (dB) et -51(dB) pour le voie F1 cela peut être expliqué par le fait que la marge a était augmenter pour réduire les effets d'affaiblissement ce qui a permit d'obtenir un signal acceptable et donc la liaison fonctionne normalement ,par contre dans la voie F2 une distorsion et une réduction de l'atténuation des signaux reçus sur le trajet en visibilité directe est observé et, en conséquence, provoque une dégradation de la qualité de fonctionnement des faisceaux hertziens, ce qui peut entrainer la coupure de la liaison et cela a cause des différentes perturbations (la neige, la grêle, le brouillard et surtout la pluie…) qui sont responsables des évanouissements de l'onde propagée. Pour cela des contre-mesures sont mise en œuvre telles que la réception en diversité et l'égalisation adaptative peuvent être employées pour réduire les effets des évanouissements par trajets multiples , réflexions, réfractions et diffusions des ondes électromagnétiques dans des environnements contenant de nombreux obstacles (milieu indoor par exemple) sur la qualité de fonctionnement des systèmes .

IV.4. Interprétation des résultats pour la liaison satellitaire: cas de la liaison (Dar El Beida à BOUZEREAH)

IV.4. 1 . Représentation Tx pour la liaison montante (VSAT vers satellite)

La figure (IV.24) illustre la variation de la puissance d'émission Tx du terminal (VSAT) au niveau de Dar El Beida vers le satellite Eutelsat AB3 : 5°W en fonction du temps.

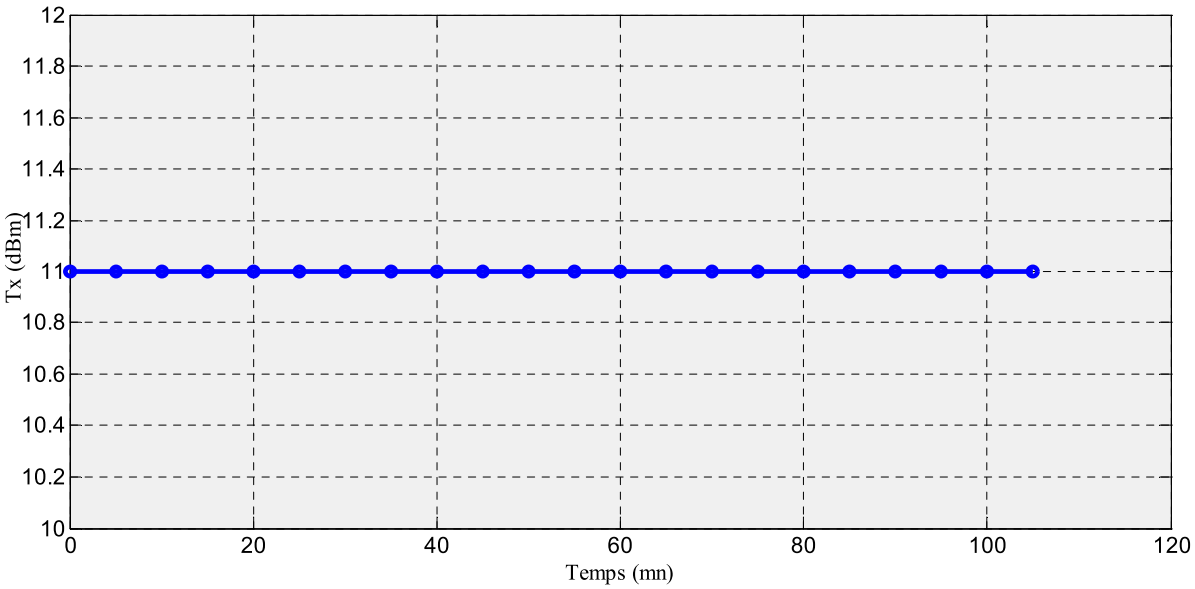


Figure . IV.24. Représentation de Tx en Cs, CLD, R en fonction du temps

Nous constatons que la puissance d'émission du terminale VSAT reste constante tous le long de notre acquisition que se soit en temps clair, couvert ou pluvieux cela peut être expliqué par le fait que les différentes pertes existantes au niveau d'un VSAT peuvent être négligeable et cela grâce aux spécifications techniques tel que la fréquence d'émission (montante) est de 14,375 GHz ainsi dans ce cas l'équipement

présente une protection efficace c'est pour cela que nous obtenons de bonne performances.

IV.4. 2. Représentation de Rx pour la liaison descendante (Satellite vers le HUB)

La figure (IV.25) représente la variation de la puissance de réception au niveau du Hub qui est situé à BOUZAREAH à partir d'un satellite EUTELSAT.

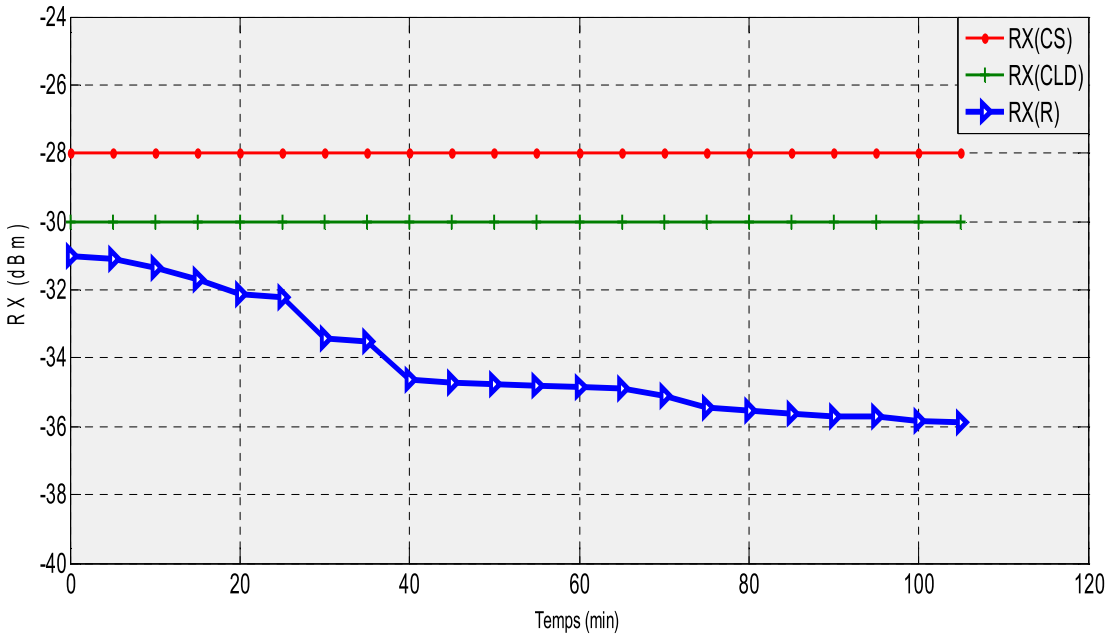


Figure. IV.25. Représentation de Rx en Cs, CLD, R en fonction du temps

La puissance reçu est de -28 (dBm) en Cs, et de -30 (dBm) en CLD par rapport à Tx qui était a 11(dBm) , ainsi les signaux restent stable pendant tout la durée de l'acquisition. En temps clair la propagation des ondes radioélectriques ne subie pas d'influence par contre en temps couvert les perturbations agissent mais dans notre cas elle reste négligeable ceci grâce aux performances optimale de l'installation.

Pour Rx en R nous constatons une diminution, qui atteint -36 (dBm) , en effet, les signaux transmis par satellite se déplacent dans l'atmosphère, et la présence d'une cellule pluvieuse à n'importe quel point du parcours affaiblit l'intensité d'une transmission. Cependant, la pluie n'existe que dans la troposphère qui s'élève à 11km au-dessus du sol, tandis que les satellites d'Eutelsat sont en orbite géostationnaire à 37316 km de la terre: le signal qui traverse une cellule pluvieuse ne sera affaibli que pendant une courte partie de sa trajectoire. Les transmissions terrestres à hyperfréquences risquent davantage d'être affaiblies par la pluie parce que le parcours intégral se situe dans la troposphère, et parce que le signal traverse parfois un foyer de pluie entier. Ceci mis en évidence les contraintes de l'instabilité de la liaison dû à l'intensité de la pluie.

IV.4.3. Représentation de l'atténuation intermédiaire

La figure(VI.26) illustre la variation de l'atténuation intermédiaire en Cs, CLD, R en fonction du temps.

Par définition l'affaiblissement ou l'atténuation est le rapport de la puissance à la sortie du système Rx sur la puissance à son entrée Tx qui est calculée par l'équation suivante :

$$\alpha_{\mathrm{int}}\,(\mathrm{dB}) = \mathrm{R_x}\,(\mathrm{dBm}) - \mathrm{T_x}(\mathrm{dBm})$$

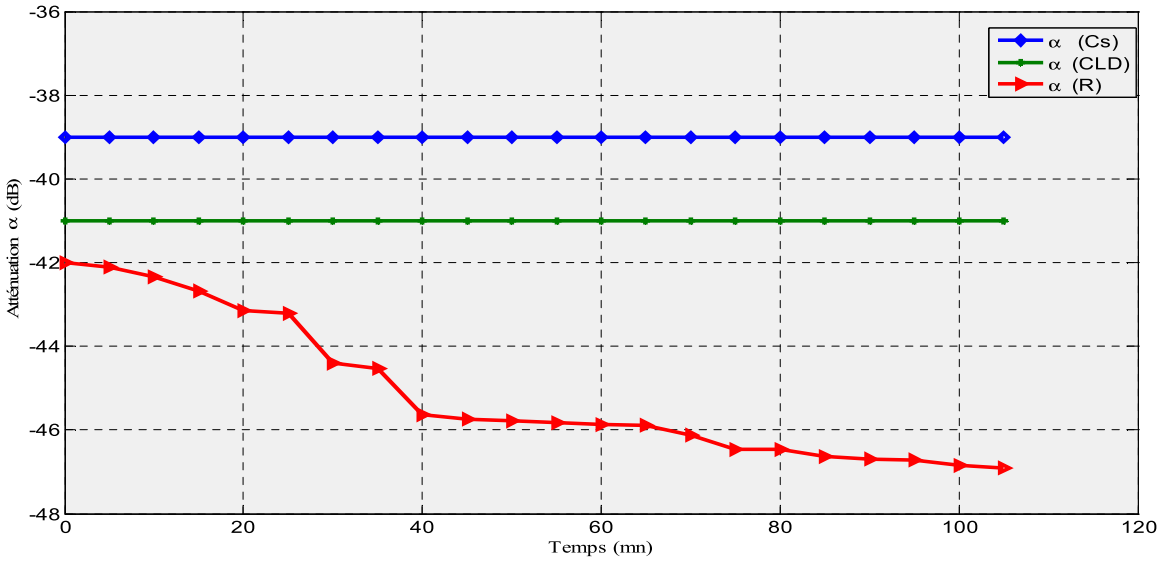


Figure IV.26. Représentation de l'atténuation α_{int}(dB) en Cs, CLD, R en fonction du temps

L'atténuation obtenues pour notre liaison en mode R peut aller jusqu' à -47 (dB), ce qui semble très élevé par rapport à l'atténuation en Cs qui est de -39(dB) et en CLD qui est de -41(dB) on peut interpréter cela par le fait que L'intensité de chute de pluie n'est pas une valeur unique, mais qui varie en fonction du temps . Plus les précipitations sont fortes, plus l'atténuation est importante dans toute la bande de fréquence. Les fréquences les plus élevés sont les plus sensibles. En présence de pluie ou de nuage (plus ou moins denses) la liaison est donc dégradée. Il faudra en tenir compte dans le bilan de liaison.

IV.4.4. Représentation de l'atténuation totale

La figure (VI.27) représente l'atténuation totale en fonction du temps.

Dans le but de simplifier la représentation, nous considérons l'atténuation totale définit comme suit :

$$\alpha_{tot} = \alpha\,(\mathrm{dB}) - \alpha_{(Cs)}(\mathrm{dB})$$

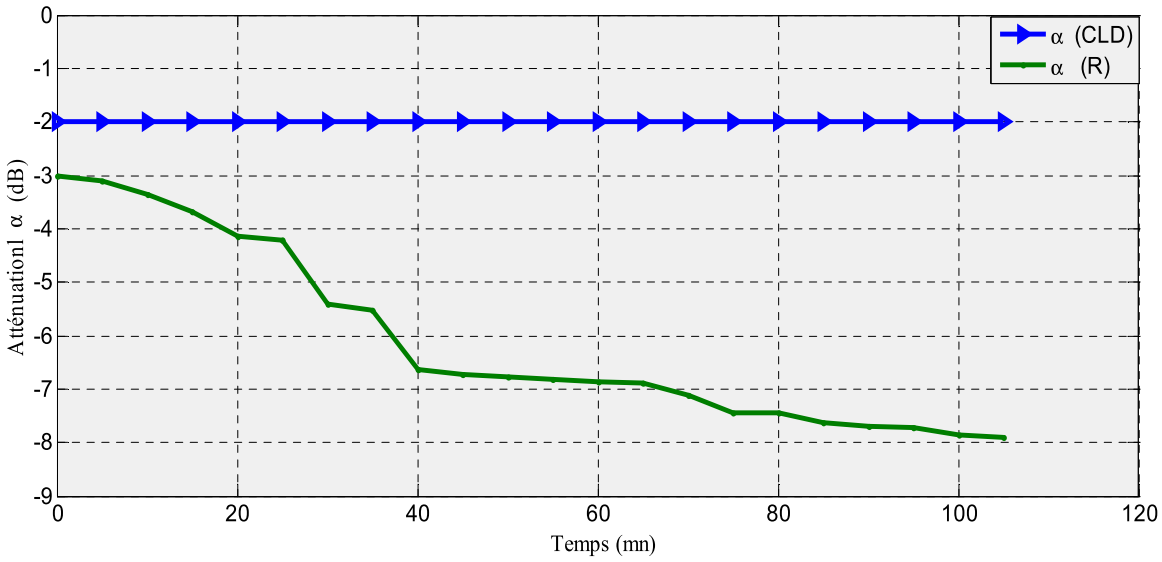


Figure . IV.27. Représentation de l'atténuation $\alpha_{tot(dB)}$ en fonction du temps

Nous remarquons que l'atténuation totale représente la valeur exacte des différentes atténuations intermédiaires. Cette atténuation varie plus dans le deuxième graphe qui commence de -3dB à -8dB environs par rapport au premiers qui reste stable avec une valeur de l'atténuation de -2(dB) et cela a cause des caractéristiques de propagation de l'atmosphère qui influencent le plus fortement en temps pluvieux et peuvent être négligeable en temps couvert. La pluie sur un chemin de radio par satellite provoque l'affaiblissement et donc l'évanouissement sur une liaison montante ou descendante qui va faire disparaître le canal.

Les chemins de radio reliant les stations mobiles terrestres avec des satellites sont souvent bloqués ou masquées par le terrain, des arbres ou des bâtiments. Cela provoque l'atténuation et, souvent, propagation par trajets multiples (généralement appelée simplement «multiples») dans lesquels les signaux atteignent le récepteur par plusieurs chemins indépendants. Enfin on conclut que les perturbations hydrométéores ainsi que les pertes provoquées par les terminaux d'émissions ou de réceptions et les pertes produites par le satellite sont une cause majeure de dégradation de notre liaison.

IV.5. Conclusion

Après analyse,des données nous constatons que l'affaiblissement pour les liaisons FH et satellites sont fortement atténué.

L'atténuation du signal par transmission satellite est inférieur par rapport à la transmission par FHN et ceci revient au long trajet qui est traversé par les champs éléctromagnétiques dans la couche troposphére qui posséde les éffets d'absorption.

Conclusion générale

L'étude d'une liaison hertzienne et satellitaire est une étape très importante dans la réalisation d'une interconnexion dans un réseau de télécommunications. Dans ce travail nous avons mis en évidence l'apport d'une telle étude pour une meilleure visibilité concrète et assez détaillée de la qualité du signal et les performances d'une liaison sans fils pour une exploitation optimale. Les faisceaux hertziens restent aujourd'hui le moyen le plus rapide et le moins onéreux pour installer un réseau de télécommunication par rapport aux installations filaires (terrestre) et même satellitaires vue la bande passante réduite.

Dans le cadre d'une collaboration avec l'entreprise ORASCOM TELECOM ALGERIE (DJEZZY), une étude a été initiée pour comprendre le comportement des liaisons point à point exploitées par le réseau de téléphonie mobile. Un stage a été effectué sur les systèmes des liaisons FHN et VSAT pour une maitrise des outils d'exploitation et de supervision. Dans ce cadre nous nous sommes intéressés à l'acquisition des données de puissances émises et reçues Tx et Rx des liaisons point à point pour une liaison satellite VSAT et pour une liaison FHN présentes dans le sud. L'acquisition a été réalisée pour différents états de l'atmosphère, à savoir, en ciel clair, en ciel couvert et en présence de la pluie. Après analyse de ces données, nous avons constaté que le signal est très atténué par la pluie pour les deux types de liaisons. Toutefois, les liaisons FHN sont beaucoup plus affectées par ces atténuations par rapport à la liaison satellite étudiée car le faisceau hertzien se propage à l'intérieur de la basse atmosphère sur un trajet horizontal à proximité du sol et le signal, dans ce cas, subi plus de dégradations par l'effet d'absorption et des trajets multiples.

Malgré les efforts que nous avons développés, ce travail reste à compléter par plus amples études sur une plus large base de données. En effet, la base de données que nous avons collectée est très réduite, et d'autre part, pour mieux caractériser les phénomènes perturbateurs, une étude statistique avancée, sur une base de données plus exhaustive, est plus que nécessaire.

ANNEXES

Annexe I:

I-1 Handover : Transfert des communications

Le handover définit la capacité de maintenir une communication ou un service de transmission lors du changement de cellules par le MS. Cette technique impose au mobile d'être synchroniser en permanence avec plusieurs BTS. C'est le MSC qui a le contrôle de l'opération.

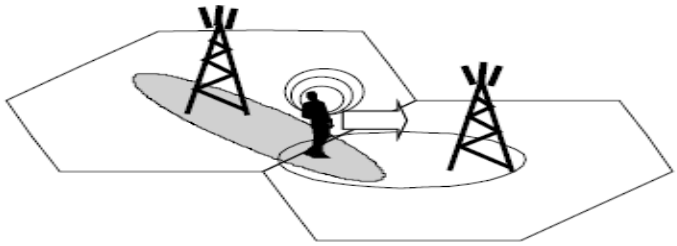


Figure I.1 . La représentation de technique Handover

Annexe II :

II.1. Les types de propagation

Entre une antenne d'émission et une antenne de réception, situées au voisinage de la terre, une onde électromagnétique peut suivre quatre chemins différents :

- Elle peut se propager en ligne (à peu près) droite d'une antenne à une autre : on parle alors de propagation troposphérique puisque l'onde se déplace dans la troposphère.
- Elle peut se déplacer suivant le relief du sol : on parle alors de propagation superficielle (ou propagation par ondes de surface ou de sol) .
- Elle peut être réfléchie par l'une ou l'autre des couches ionisées de l'atmosphère : on parlera donc de propagation ionosphérique.
- Elle peut être diffractée au niveau de la troposphère et on parle alors de diffraction troposphérique .

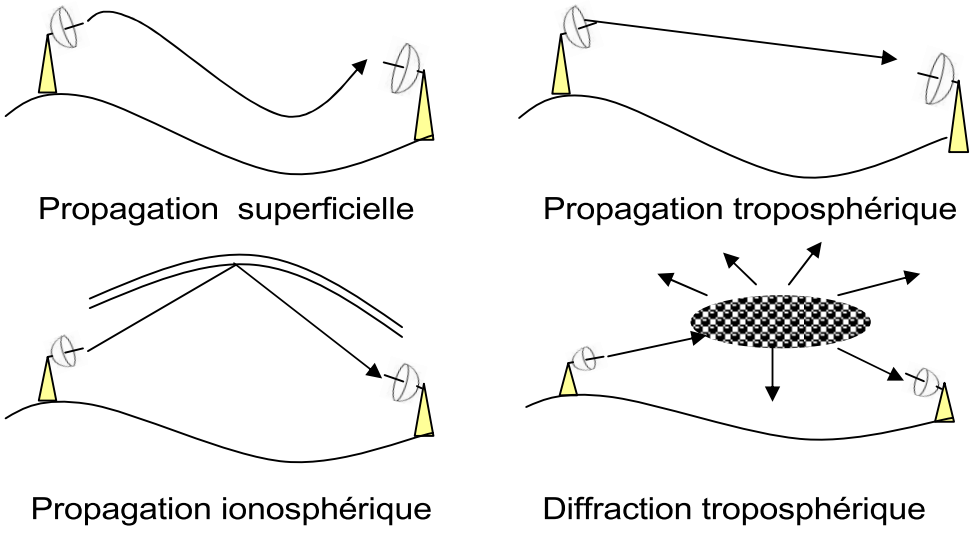


Figure II.1.différents types de propagation

II.2.Les systèmes de transmission FHN en visibilité directe avec :

1- La diversité d'espace

2- La diversité de fréquence

3-Choix de la diversité

a-Diversité spatiale : on place deux antennes sur chaque site; on émet simultanément avec les deux antennes d'émission et on choisit à chaque instant l'antenne de réception qui reçoit le plus grand signal.
L'évanouissement n'affectera pas alors simultanément les quatre canaux possibles de transmission.

Figure II.2. Diversité d'espace verticale

b-Diversité fréquentielle : on n'utilise qu'une antenne par site, mais on travaille à deux fréquences.

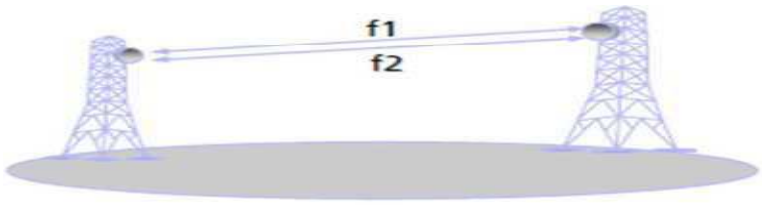


Figure II.3. Diversité de la fréquence

c-Choix de la diversité

La diversité de fréquence présente l'avantage de ne nécessiter qu'une seule antenne. Les efforts sur les structures portantes sont donc moindres , leur taille peut également être moindre. En revanche, une fois données les hauteurs d'antenne, l'écart optimal en fréquence est fixe. Cette exigence n'est pas toujours compatible avec les plans de fréquence imposés par ailleurs. Elle présente également un rendement spectral faible. La diversité d'espace nécessite deux antennes mais leur taille est souvent moindre.

Par ailleurs, la méthode présente l'avantage d'une plus grande souplesse, et de performances généralement supérieures. Elle est de plus économe en fréquences.

II.3. Phénomènes de guidage

Pendant un certain temps, les conditions atmosphériques peuvent entraîner un guidage du faisceau, généralement en super réfraction. Le résultat est alors similaire à un dépointage d'antenne. La probabilité d'occurrence, sur le mois quelconque, de ces «évanouissements non sélectifs» est donnée par un paramètre statistique appelé facteur PL .Ce phénomène de guidage est dimensionnant dans l'ingénierie des liaisons dont la bande fréquence est inférieure à 15GHz. Il réduira la longueur possible du bond pour des exigences de disponibilité données.

- **dépointage des antennes**

Sur les liaisons Terre-satellite les antennes de stations terriennes de grand diamètre comportent toujours un dispositif de pointage automatique qui tient compte des variations de réfraction atmosphérique et, pour les antennes de petit diamètre, les variations de réfraction ont un effet négligeable si l'angle d'élévation est supérieur à une dizaine de degrés, par contre en FH les antennes sont fixes et l'effet de la réfraction est important.

II.4. Structures des Trames SDH

La structure de multiplexage s'articule autour d'une trame de base STM-1 (Synchronous Transport Module) correspond au premier niveau dans la hiérarchie numérique synchrone qui est organisée en octets et possède les caractéristiques suivantes :

Longeur totale $= \mathbf{9 * 270 = 2340\ octets}$.

fréquence de répétition$= \mathbf{8KHz}$.

durée$= \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{8KHz}} = \mathbf{125s}$.

débit$= (\mathbf{2340 * 8bits})\ /\mathbf{125s = 155,520\ Mbit/s}$.

Cette trame se présente sous la forme d'une matrice de 9 rangées de 270 octets dont la transmission s'effectue de gauche à droite et de haut en bas. Chaque octet correspondant à un canal de 64 kbit/s, on obtient un débit global de 155 Mbits/s.

La trame est composée d'une zone de surdébit de section SOH (Section Overhead) contenant des informations pour les reegénérateurs et les multiplexeurs sur la route empruntée par la charge utile, appelée Unité Administrative AU (Adimistrative Unit).

Dans une trame STM-1, la charge utile est placée dans des conteneurs

adaptés à leur débit. Ces conteneurs peuvent être vus comme une structure hiérarchisée de groupage. A chaque conteneur est associé un surdébit dénommé POH(Path OverHead) qui sert à gérer ce niveau de groupage. Le conteneur et son surdébit forment un conteneur virtuel VC (Virtual Container).

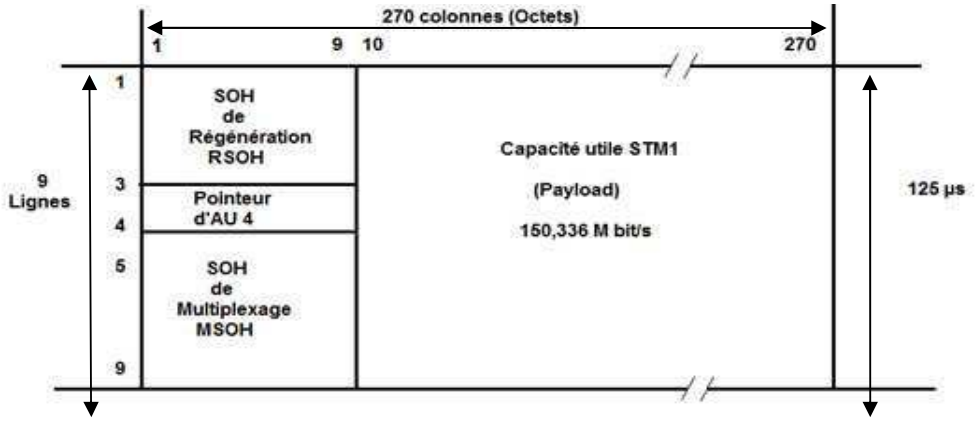


Figure II.4. Structures de la trame STM-1

II- 5- Le modèle OSI

Le modèle OSI (Open Systems Interconnexion) définit de quelle manière les ordinateurs et les périphériques en réseau doivent procéder pour communiquer ainsi , il spécifie les règles de communication constituent les protocoles normalisés. Le modèle OSI est normalisé par l'ISO.

II-5-1- Description du modèle:

Le modèle OSI se décompose en 7 parties appelées couches :

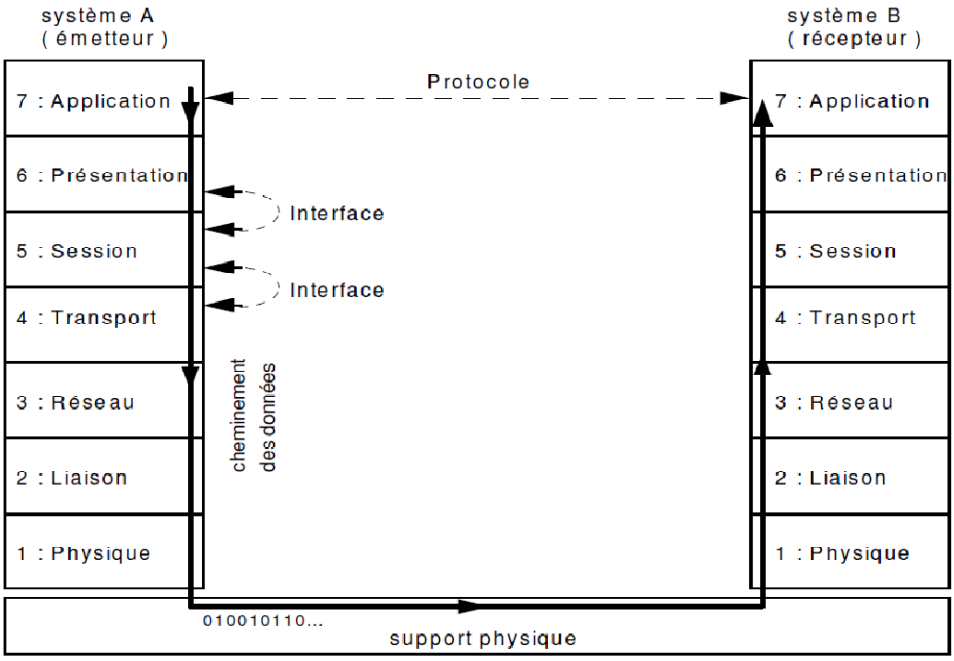


Figure II. 5 . la représentation des couches physique de modèle OSI

COUCHE	ROLE
1. PHYSIQUE	Envoi et réception des séquences de bits
2. LIAISON	Organisation des données en trames et transmission
3. RESEAU	Acheminement des paquets de données : routage, contrôle des flux;
4. TRANSPORT	- Découpage du message en paquets (et inversement : réassemblage des paquets en message dans le bon ordre) -Gestion de plusieurs connexions sur la même voie de communication
5. SESSION	Etablissement, contrôle, terminaison d'une connexion entre deux systèmes
6. PRENTATION	Formatage, conversions, (compression et cryptage; des données
7. APPLICATION	Fourniture de services réseaux aux applications

TABLEAU .II .1 . Le résumé de rôle des couches OSI

II.6 . Différents type de dB

On définie le décibel (dB) et sous toutes ses variantes : dB, dBm, dBi, dBµV:

a- dB

Pour la mesure des niveaux sonores, des puissances des matériels de radiodiffusion, et plus généralement de tous les systèmes qui présentent un gain (en courant, tension, puissance…), c'est à dire une amplification entrée la sortie et l'entrée, il a été choisi une unité très particulière, et non linéaire : le décibel. Cette unité donne une grande amplitude aux amplifications comprises entre 0 et1, et une petite amplitude aux grandes valeurs d'amplification. Quand la valeur en sortie (courant, tension, puissance…) est de niveau inférieur à l'entrée, le système ne produit pas réellement une amplification, mais une atténuation, qui donne une valeur négative en dB.

b- dBm

Défini par rapport à une référence de 1mW. Attention à l'impédance de mesure 600Ω en téléphonie, 50W en HF.

$$\mathbf{P_{dBm} = 10Log\left(\frac{p}{1mW}\right)}$$

c- dBW

dB Watt : Défini par rapport à une référence de 1W. Impédance de mesure : généralement 50Ω. Généralement utilisé pour les amplificateurs HF de puissance.

$$\mathbf{P_{dBW} = 10Log\left(\frac{P}{1W}\right)}$$

d- dBi

Le dBi exprime en dB le gain d'une antenne par rapport à une antenne isotrope qui émet la même quantité d'énergie dans toutes les directions. Ce type d'antenne n'existe physiquement pas, ce n'est qu'une conception

théorique, destinée à donner une référence en termes de gain.

e- dBµV

dB microvolt : Défini par rapport à une tension de référence de 1µV. Généralement utilisé pour définir les niveaux d'entrées des récepteurs radio.

$$\mathbf{V_{dB\mu V} = 20Log\left(\frac{V}{1\mu V}\right)}$$

ANNEXES

II. 7. Les Ondes électromagnétiques en fonction des fréquences :

Onde électromagnétique	Fréquence	Longeur d'onde	Application
Rayons X	>3000 THz	<100 nm	Imagerie médicale Radiographie
Rayons UV	750 à 3000 THz	400 nm à 100 nm	Banc solaire
Lumière visible	385 THz à 750 THz	780 à 400 nm	Vision humaine, photosynthèse
Infrarouges	0,3 THz à 385 THz	1 mm à 780 nm	Chauffage
Fréquences extrêmement hautes (EHF)	30 GHz à 300 GHz	0.01 m à 1 mm	Radars, communication par satellite
Fréquences superhautes (SHF)	3 à 30 GHz	0.1 m à 0.01 m	Radars, alarmes anti-intrusion, télévision par satellite
Fréquences ultrahautes (UHF)	0.3 à 3 GHz	1 à 0.1 m	Télévision, radars, téléphones mobiles, fours à micro-ondes, hyperthermie médicale
Très hautes fréquences (VHF)	30 à 300 MHz	10 à 1 m	Télévision, radio FM
Hautes fréquences (HF)	3 à 30 MHz	100 à 10 m	Soudage, collage
Fréquences moyennes (MF)	0.3 à 3 MHz	1 km à 100 m	Radiodiffusion MO-PO, diathermie médicale
Basses fréquences (LF)	30 à 300 KHz	10 à 1 km	Radiodiffusion GO, fours à induction
Très basses fréquences (VLF)	3 à 30 kHz	100 Km à 10 km	Radio-communications
Fréquences audio (VF)	0.3 à 3 kHz	1000 Km à 100 km	Transmission de données vocales, métallurgie, chauffage par induction
Extrêmement basses fréquences (EBF-ELF)	3 Hz à 300 Hz 50 Hz	100 000 à 1000 km 6000 Km	Transport et distribution de l'électricité, électroménager
Champ magnétique terrestre	0 Hz (continu)	infinie	Boussole

Fréquences utilisées en radio/télévision

Tableau .II. 2. Classification des ondes électromagnétiques

II.8. Différentes versions du coffret IDU/ODU sont proposées selon la configuration du système :

La version économique (Light) convient pour une configuration 1+0 et une capacité jusqu'à 4x2Mbit/s.

La version classique autorise toutes les configurations (1+0, 1+1, avec une capacité jusqu'à 16xMbit/s ou 34 +2 Mbit/s).

Figure II.6. Différentes versions du coffret IDU/ODU

a-Configuration avec protection :

Deux types de problème peuvent affecter la disponibilité d'une liaison hertzienne : des défauts d'équipement et des problèmes de propagation. Les configurations de protection 1+1 permettent d'augmenter la disponibilité

de la liaison par rapport à la configuration 1+0, en ajoutant des fonctions redondantes à l'IDU et à l'ODU afin :

- de sécuriser la liaison en cas de défaut fugitif (alarme provisoire) ou définitif (panne d'équipement) ;
- d'améliorer les performances de propagation des équipements (dans certaines configurations du coffret ODU uniquement).
- Les configurations 1+1 prévoient le basculement automatique sans erreur du récepteur.

Si la liaison est protégée, le trafic auxiliaire et les voies auxiliaires sont également automatiquement protégés.

Différentes configurations de protection sont disponibles pour les applications suivantes :

CONFIGURATION DE L'ODU		APPLICATIONS	
	9400 UX		
1+0	**1x ODU** **1 antenne simple polarisation**	**Sans protection**	
1+1 HSB	**2 ODU à la même fréquence** **1 coupleur** **1 antenne simple polarisation**	**Protection contre les défauts**	
1+1 HSB SD	**2 ODU à la même fréquence** **2 antennes simple polarisation**	**Protection contre les défauts**	**Amélioration des performances en cas de propagations multiples**
1+1 FD	**2 ODU à des fréquences différentes** **2 antennes simple polarisation (ou 1 antenne double polarisation)**	**Protection contre les défauts**	**Amélioration des performances en cas de propagations multiples**

SD: Diversité d'espace

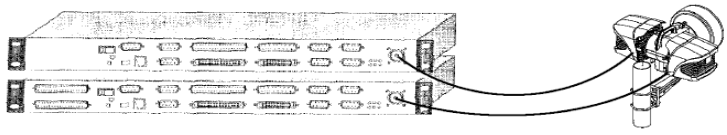
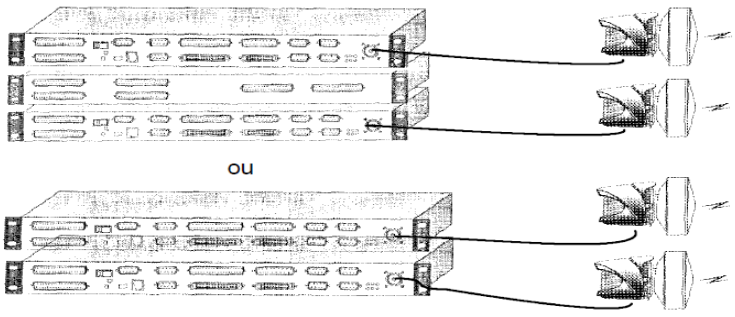
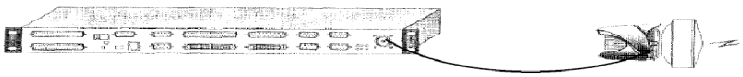
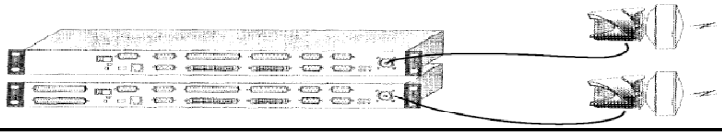
FD: Diversité de fréquence

ANNEXES

Ces configurations de l'ODU s'utilisent avec l'une des configurations suivantes de l'IDU

CONFIGURATION DE L'IDU		APPLICATIONS	
1+0	**IDU Classique** **IDU Light**	**Sans protection**	
1+0 EXT	**IDU Classique** **IDU Light**	**Sans protection**	**Possibilité d'insérer des cartes d'extension de voies de service**
1+1 protection de base	**IDU Principal (classique)** **IDU extension (sans l'option MUX)**	**Commutation automatique : choix du meilleur canal de réception et du récepteur (cas de HSB)**	
1+1 avec protection MUX	**IDU PRINCIPAL** **IDU extension (avec l'option MUX)** **IDU accès (34 Mbit/s uniquement)**	**Commutation automatique : choix du meilleur canal de réception et du récepteur (cas de HSB)**	**Protection des accès affluents dont le mux -démux redondant**

Exemples de configurations matérielles:

Configuration 1+1 HSB utilisant un coupleur HSB et une antenne intégrée	
Configurations 1+1 HSB avec protection du multiplexeur	
Configuration 1+0 de base antenne intégrée	
Configuration 1+0 avec antenne séparée	
Configuration 1+1 HSB ou FD avec deux antennes	

ANNEXES

FigureII.7. Choix de la polarisation de l'antenne

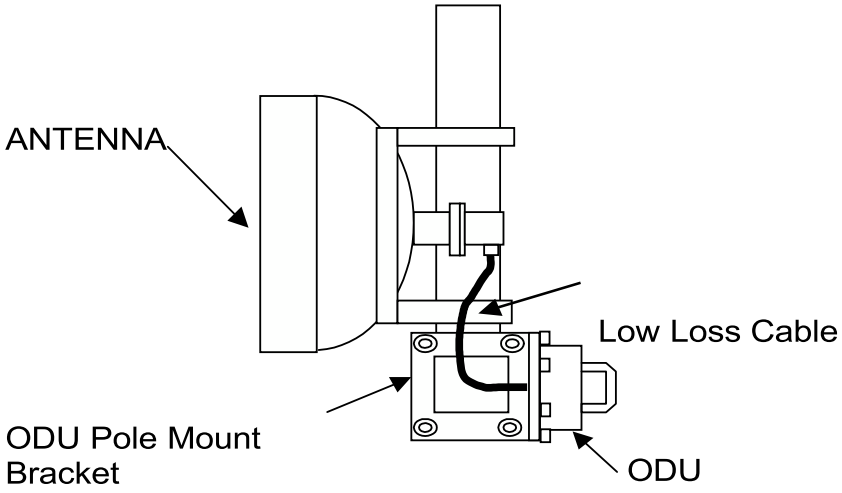


Figure.II.8. 7/8 GHz Remote Mounting of 1+0 PASOLINK ODU (7/8) GHz ODU has Waveguide Interface as Optio

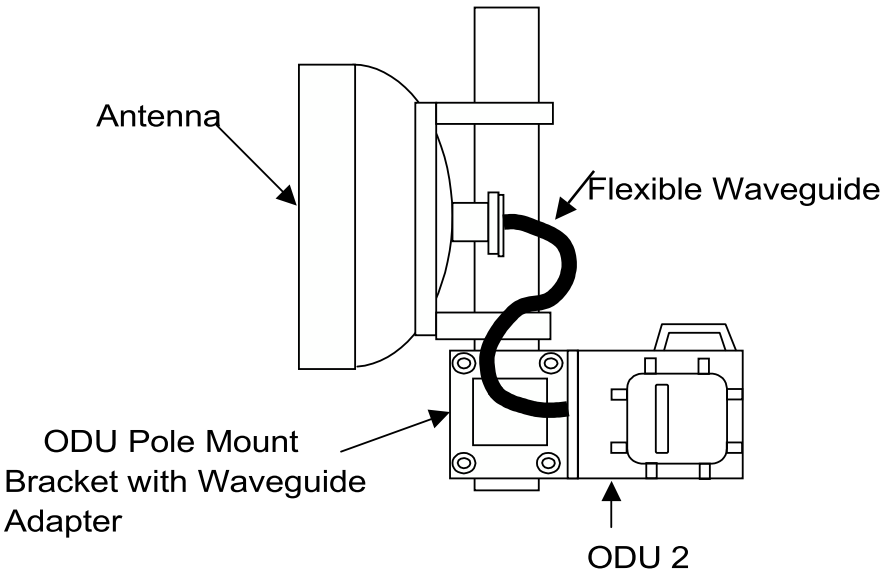
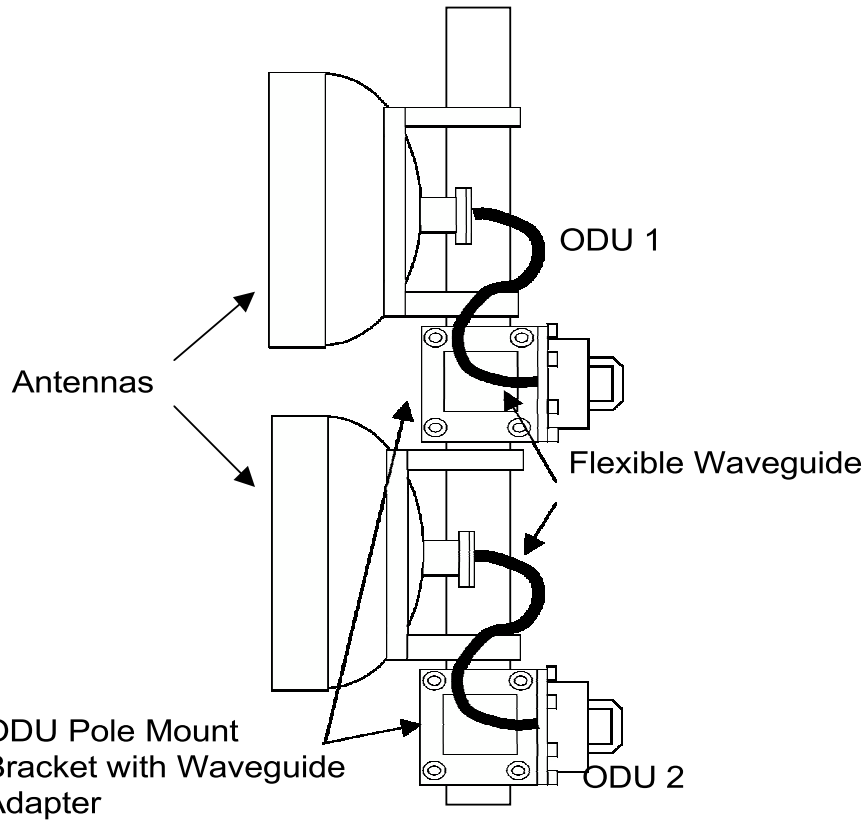


Figure II.9. 13-38 GHz Remote Mounting of 1+1 PASOLINK ODU



FigureII.10. 13-38 GHz Remote Mounting of 1+1 PASOLINK ODU with two antenna

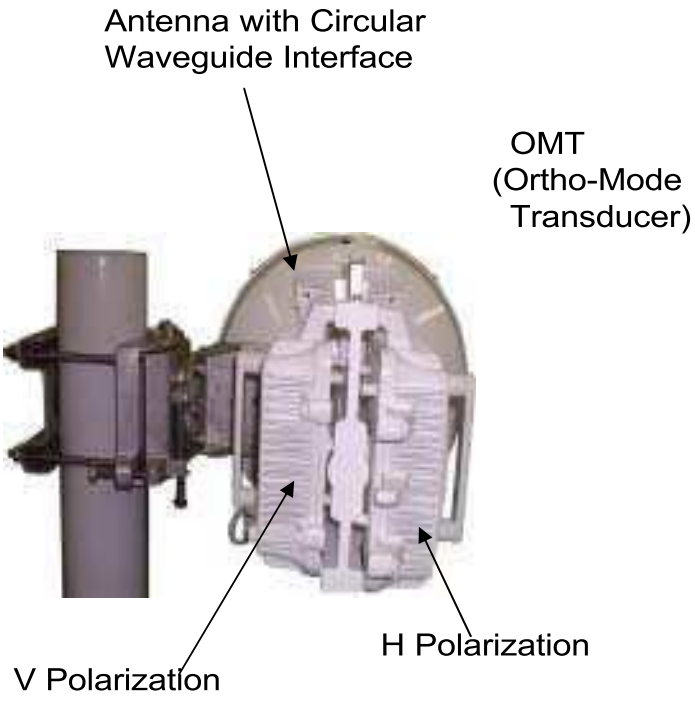


Figure II.11. 7/8 GHz Mounting of 1+1 PASOLINK ODU with two antennas

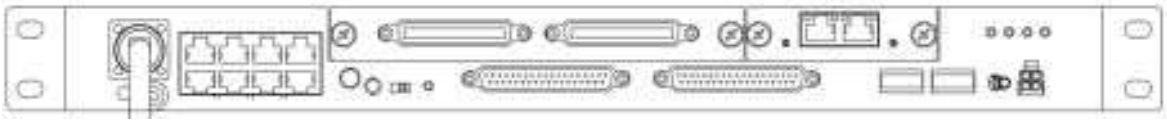


Figure II.12. Front View 1+0 IDU 1U with LAN interface 4/8/16/32x2 MB free rate

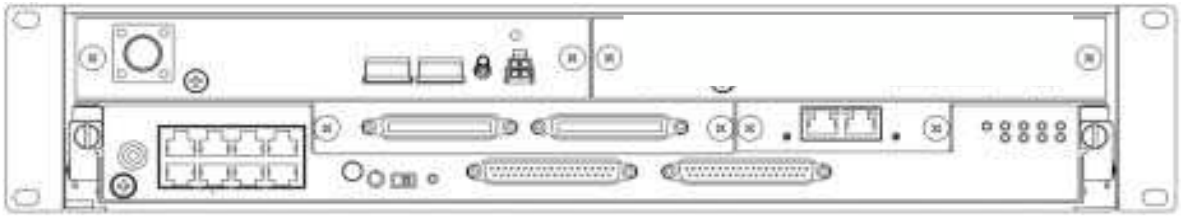


Figure II.13. Front View 1+0 Expandable IDU 2U with LAN interface 4/8/16/32x2 MB free rate

Annexe III :

III-1- Composition d'un système VSAT :

a- La partie indoor:

a -1 L'interconnexion avec le réseau terrestre:

La station VSAT est connectée au reste du réseau terrestre par l'intermédiaire de l'ensemble des équipements d'interconnexion présents dans la salle télécoms. Nous y trouvons notamment un multiplexeur chargé

de concaténer les données de types variés provenant du réseau filaire dans des trames circulant sur un PVC (Permanent Virtual Circuit).

En effet, le système VSAT permet une liaison spécialisée sur support électromagnétique.

Figure .III. 1. Multiplexeur

a-2 Le modem satellite:

Les modems satellites utilisent notamment les modulations de phase (BPSK, QPSK, 8-PSK, etc.) choisies en fonction de la bande passante et/ou de la puissance désirées. C'est aussi à ce niveau que sont introduites les procédures de codage (Viterbi, Turbo Code...) pour la correction d'erreur et le gain en efficacité spectrale. Le choix du modem est évidemment conditionné par les besoins du client.

Figure .III. 3 . modem satellite

b :La partie outdoor

b-1 : L'équipement RF:

L'équipement Radiofréquence, a deux fonctions essentielles dans la transmission par satellite, le but initial étant de minimiser les pertes lors de la transmission. Dès lors, cette partie du système va se charger d'une part, d'amplifier le signal pour pourvoir être traité par les équipements, et d'autre part, de convertir les fréquences de travail du satellite en fréquences intermédiaires.

b- 1-1 Le convertisseur de fréquence:

A l'émission, il y a un upconverter charger de convertir la fréquence intermédiaire en fréquence radio satellitaire (6 GHZ ou 14 GHz). Cette fonction est assurée, soit par un équipement isolé upconverter, soit par un BUC (Block UpConverter), soit par un transceiver. A la réception on a soit un downconverter indépendant soit un transceiver et un LNB (Low Noise Block Converter) ou LNC (Low Noise Converter), des dispositifs combinant la conversion de fréquences et l'amplification du signal.

Figure .III .4 . RF Transceiver

Figure .III. 5. BUC

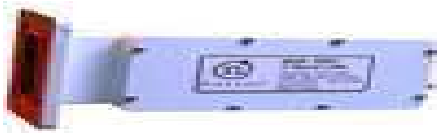


Figure .III. 6. LNB

b-1-2 L'amplification

Le signal reçu et celui émis par le satellite doit être d'une puissance suffisante pour pouvoir être correctement traité par le transpondeur spatial ou le modem terrestre avec le moins d'interférences possible. Ainsi sur la chaîne d'émission et celle de réception, il est impératif d'amplifier le signal grâce à un amplificateur indépendant ou bien le transceiver, le BUC ou le LNA/LNB/LNC.

b-2 La source

b-2 -1 La polarisation

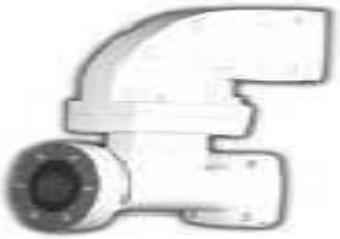


Figure .III .7 .L'OMT

Le signal provenant du transceiver ou du BUC entre directement dans le diplexeur ou OMT (OrthoMode Transducer) ou s'effectue la polarisation. La polarisation du signal est effectuée pour séparer les fréquences d'émission et celles de réception. En général, en polarisation linéaire, l'émission se fait en polarisation horizontale et la réception en verticale. La polarisation circulaire est aussi utilisée.

b-2-2 La source (feed)

Le cornet d'alimentation, situé au point focal du réflecteur parabolique, qui rayonne l'énergie RF vers le réflecteur d'antenne ou recueille l'énergie RF reçue du réflecteur

d'antenne et redirige le signal Tx vers les réflecteurs de l'antenne qui le transmettent vers le satellite. L'antenne aura un diamètre variant entre 0.6m et 3.8m.

Figure .III. **8 .** Antenne parabolique

Figure. III. 9 . Cornet

Nous appellerons source ou feed l'ensemble composé du diplexeur et du cornet.

2- Equipement de supervision

Afin de superviser les terminaux passifs, non munis d'interface IP, tels que les modems, on peut utiliser un terminal server. Ce dernier doit, d'un côté être connecté au réseau filaire par l'intermédiaire du multiplexeur ou d'un switch grâce à une interface Ethernet 10baseT, et de l'autre aux modems satellites grâce aux ports asynchrones.

Figure. III **.10.** Terminal Server

Ce Terminal Server une fois bien configurée permet au technicien de vérifier et configurer le système à distance grâce à des applications IP de base telles que les PING ou les sessions TELNET. Aussi, grâce au logiciel HPOpenView, les techniciens ont un aperçu en temps réel de l'état des équipements.

GLOSSAIRE

GSM: Global System for Mobile communication.

GPRS: General **P**acket **R**adio **S**ervice.

GMSC: Gateway MSC.

HLR: Home Location Register.

GPS : Géo-**P**ositionnement par **S**atellite.

IT: Intervalle de Temps.

LOS: Line Of Sight.

MIC : Modulation par Impulsions codées.

MS: Mobile Station.

MSC: Mobile Switching Center.

NSS: Network Sub System.

OSS: Operating Sub-System.

QAM: Quadrature Amplitude Modulation.

QPSK: Quadrature Phase Shift Keying.

RF: Radio Fréquence.

Intervalle De Temp (IT) : ou Time Slot en Anglais

Time Slot (TS): Créneau temporal ou intervalle de temps

Le Time Slot est l'unité temporelle principale utilisée dans le multiplexage des canaux GSM. Chacun de ces TS dure 576,9 µs.

Trame TDMA : La trame TDMA est composée de 8 Time Slots numérotés de 0 à 7 ; ces 8 TS sont gérés par le même TRX.

PDH : Plesiochronous **D**igital **H**ierarchy ou hiérarchie numérique plésiochrone

C'est une technologie utilisée dans les réseaux de télécommunications afin de véhiculer les voies téléphoniques numérisées.

PIRE : Puissance **I**sotrope **R**ayonnée **E**quivalente, c'est la Puissance qu'il faudrait appliquer à une antenne isotrope pour obtenir le même champ dans cette direction.

Latitude : Distance angulaire à l'équateur comptée vers le nord ou vers le sud, dans un système de coordonnées sphériques.

Longitude : Distance angulaire, comptée sur l'équateur ou sur un cercle parallèle, vers l'est ou vers l'ouest, à partir d'une méridienne origine, dans un système de coordonnées sphériques.

Altitude : L'altitude d'un point est la cordonnée par laquelle on exprime l'écart vertical de ce point à une surface de référence proche du géoïde.

Handover: passage d'une cellule à l'autre afin d'assurer la meilleure qualité de la communication.

HDB-3 : High **D**ensity **B**ipolar-3, dérivée du code HDBn pour n=3. Ce code a été développé pour remédier aux problèmes de restitutions de l'horloge bit dans un système de transmission numérique où le nombre de transition (passage de 0 à 1 et vis versa) est insuffisant.

Fading: Fading – Evanouissement

Le fading ou évanouissement sélectif du signal est la conséquence des trajets multiples des ondes émises par la BTS, qui amène le signal à s'atténuer fortement en certains points.

Feeders: Feeders – Câbles d'alimentation

Pour les GSM, les feeders sont les câbles coaxiaux blindés qui assurent le transit des signaux (Tx & Rx) entre les antennes et la BTS.

FHN : Faisceau Hertzien Numérique

Un FHN est une liaison hertzienne assurée par deux antennes en visibilité directe et à très faible.

ANT : Antenne.

Gain : Dès qu'il y a une amplification et que la puissance de sortie d'un appareil est plus importante que la puissance d'entrée, il y a un gain. Il est exprimé en dB.

BP : Bande Passante.

Downlink : Lien descendant.

Eb/No : Rapport énergie par élément binaire / densité spectrale de bruit.

Feed : Source.

FM : Modulation de Fréquence.

GEO : Orbite géostationnaire d'un satellite.

IP : Internet Protocol – Protocole de couche réseau du modèle OSI.

LEO : Orbite Basse d'un satellite.

MEO : Orbite Moyenne d'un satellite.

LNB : Low Noise Block downconverter - LNA + Convertisseur Abaisseur de Fréquence (Dispositif qui abaisse la fréquence de la porteuse. De manière typique, le dispositif transforme une radiofréquence (RF) en une fréquence intermédiaire (FI).

PSK : Phase Shift Keying - Modulation de Phase (ex. BPSK, QPSK, 8-PSK).

RF : Radio Fréquence - Fréquence du signal entre un émetteur et un récepteur dans un système de communications où le satellite sert de répéteur.

RS : Code de correction d'erreur Reed-Salomon.

RTC : Réseau Téléphonique Commuté.

Rx : Réception.

Tx : Emission.

Uplink: Lien montant.

WAN: Wide Area Network.

X.25 : Protocole de transmission de paquets.

BUC: Block Up Converter.

IDU: Indoor Unit.

ODU: Outdoor Unit.

Indoor: À l'intérieur

Une micro cellule indoor est une cellule dont la zone de couverture principale est située à l'intérieur d'un bâtiment.

BER : Bit Error Rate.

VSAT: Terminal à très petite ouverture, micro station.

UIT : Union Internationale des Télécommunications.

EUTELSAT : European Télécommunications Satellite Organization.

Bibliographie

[1] C. DEMOULIN, M. VAN DROOGENBROECK, 2004 « Principes de base du fonctionnement du réseau GSM ». Revue de l'AIM, pages 3.18, N04.

[2] CHAMEK Lynda, année universitaire 2010-2011, « localisation des mobiles par une stratégie de prédiction », mémoire de magister, Université M'HAMED BOUGARA de BOUMERDES.

[3] Gérard Barué « Télécommunications et infrastructures (Liaisons hertziennes, spatiales et optiques)», éditions Ellipses.

[4] Julien Delmas, Mai 2006, « Les relais GSM».

[5] L.Reynier« Liaisons hertziennes 1», « Liaisons hertziennes 2 », « Liaisons hertziennes 3».

[6] Alexandre Boyer, Septembre 2011, « Canaux de transmission bruités» Institut Nationale Des Sciences Appliquées De Toulouse « Support De Cours ».

[7] C. Baillet, 2004, « Atmosphère terrestre ».

[8] Documentation d'ORASCOM TELECOM ALGERIE.

[9] Les recommandations de l'ITU-R.

[10] Sebastian Büttrich, Septembre 2005, « Calcul du bilan de liaison radio».

[11] Dominic Grenier, Hiver 2013, « Antennes et Propagation radio », Département de génie électrique et de génie informatique Université Laval Québec, Canada.

[12] OULMOKHTAR Farida et OUGHACHE Lila, promotion 2011, « Etude d'une liaison FHN point à point utilisant le multiplexage SDH du réseau Algérie Télécom » thèse d'ingénieur, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou(ELN).

[13] M. TAHANOUT, 2003, « ETUDE D'UN EMETTEUR DE RADAR FM-CW POUR L'OBSERVATION DE LA BASSE ATMOSPHERE: Mise au point d'un générateur de chirp à 3 GHz ». Mémoire de Magister, FAC. Génie Electrique et Informatique, USTHB.

[14] KHELIL-CHORFI Mohamed et BELABBAS Mohamed, Année 2000/2001, « Calcul de qualité en Radiocommunication FHN & TPS » thèse d'ingénieur, Institut des télécommunications AB El-hafidh BOSSOUF - Oran.

[15] LONGUESPE Hugo et NEVEU Adeline, Juin 2001, « Rapport d'Avant Projet : Modulation MIC avec Transmission AM ».

[16] JEBRI Elies, Année 1999/2002, « Cours de Système De Communication », Ministère de l'Enseignement Supérieur Direction des ISET, ISET Nabeul.

[17] W. PIRARD, Novembre 2001, « Etude Des Risques Liés à L'Exposition Aux Champs Electromagnétiques Rayonnés Par Les Faisceaux Hertziens Utilisés Par Les Opérateurs De Téléphonie Mobile», Institut Scientifique de Service Public.

[18] M Julien Fasson, 2004, « ÉTUDE D'UNE ARCHITECTURE IP INTÉGRANT UN LIEN SATELLITE GÉOSTATIONNAIRE », Thèse pour le doctorat en Réseaux et Télécommunications de l'Institut National Polytechnique de Toulouse.

[19] Michel Terré, « Satellites », version 2.1.

[20] SEMINAIRE AOTS, 2000, « COMMUNICATIONS SATELLITES ».

[21] Vincent Daglia, 2002, « Transmission de données par satellite ».

[22] Allouche Benjamin ; Chabal Silvère, 2004-2005, « La communication de données par satellites ».

[23] Fleury Sébastien, GIROD Jean-Marc, Watanabe Ryo, « Les satellites et la technologie VSAT ».

Sites web

[24] www.techniques-ingenieur.fr

[25] www.memoireonline.com

[26] www.Djezzy.com :« catalogue d'interconnexion OTA »

[27] terre@cnam.fr

[28] www.DVB.org.

[29] http://www.efort.com