

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية
Université Saad DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire du MASTER

Filière Télécommunication

Spécialité Réseaux et télécommunications

Présenté par :

AZIBI Mohamed

LAGRA Fethi

DIMENSIONNEMENT D'UNE LIAISON FH DANS UN RESEAU TETRA

Encadré par :

Mr : HEBIB SAMI

Année universitaire : 2019-2020

Remerciement

Nous remercions avant tout Dieu le tout puissant de nous avoir donné la foi, la volonté et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à notre promoteur Monsieur **Hebib Sami** pour nos avoir conseillé, dirigé pendant la réalisation de ce travail

Sans omettre bien sûr de remercier profondément à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation du présent travail.

Nous adressons nos remerciements à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

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 à notre formation.

Enfin, nous remercions à tous les amis et collègues pour leur soutien moral tout au long de cette préparation

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mes parents pour leur soutien

A ma petite famille, ma femme pour son encouragement

A mes chers enfant Sara ,Amira ,Rassim

Mohamed

Dédicace

Je dédie ce mémoire :

*A mes parents pour leur amour inestimable, leur confiance,
leur soutien, leurs sacrifices et toutes les valeurs qu'ils ont su
m'inculquer*

*A mes très chères sœur; frères; belles sœurs, beaux-frères
et beau parent*

A mes nièces et neveu

A mes amis et collègues

*A toute la famille LAGRA , BENZINA , BEKKARI et
RASSOUL*

Fethi

Résumé

Terrestrial Trunked Radio (ou réseau TETRA) est un système de radio numérique mobile professionnel bidirectionnel (comme des talkie-walkie évolués), spécialement conçu pour des services officiels tels que services de secours, forces de polices, ambulances et pompiers, services de transport public et pour l'armée.

L'objectif de ce projet de fin d'études est de dimensionner une liaison FH, pour les réseaux de type TETRA. En se basant sur les informations relatives aux deux sites à relier, un premier dimensionnement sera réalisé via le calcul de bilan de liaison (Link budget). Ensuite, l'utilisation d'un outil dédié de planification radio permettra de faire un dimensionnement beaucoup plus précis en prenant en considération le relief ainsi que les différents phénomènes de propagation. Enfin, une Configuration de la radio sur sites permettra de maitre en service la liaison FH proposée.

ملخص

(Terrestrial Trunked Radio) أو شبكة (TETRA) هو نظام راديو رقمي محمول ثنائي الاتجاه (مثل أجهزة الاتصال المتقدمة) ، و هو مصمم خصيصا للخدمات الرسمية مثل خدمات الإنقاذ و قوات الشرطة و سيارات الإسعاف ورجال الإطفاء و خدمات النقل العام وللجيش الهدف من هذا مشروع هو تحديد حجم ارتباط الحزمات الهertzية الخاص بشبكات من نوع TETRA. بناءً على معلومات متعلقة بالموقعين المراد ربطهما، سيتم تنفيذ البعد الأول من خلال حساب ميزانية الارتباط (ميزانية الارتباط). بعد ذلك ، سيسمح استخدام أداة مخصصة للتخطيط الراديوي بإجراء أبعاد أكثر دقة من خلال مراعاة التضاريس وكذلك ظواهر الانتشار المختلفة. أخيرًا، سيسمح تكوين الراديو في الموقع لوصلة FH المقترحة بأن تكون في الخدمة.

Abstract

Terrestrial Trunked Radio (or TETRA network) is a professional two-way mobile digital radio system (like advanced walkie-talkies), specially designed for official services such as rescue services, police forces, ambulances and fire brigades, public transport services and for the army.

The objective of this end of studies project is to size an FH link For TETRA type networks. Based on the information relating to the two sites to be linked, an initial dimensioning will be carried out via the calculation of the link budget (Link budget). Then, the use of a dedicated radio planning tool will make it possible to make a much more precise dimensioning by taking into account the relief as well as the various propagation phenomena. Finally, an on-site radio configuration will allow the proposed FH link to be in service.

TABLE DES MATIERES

Introduction Generale	1
Chapitre I : Réseaux TETRA	3
I.1 Introduction.....	4
I.2 Les PMR.....	4
I.2.1 Un réseau sécurise.....	4
I.2.2 Un réseau privé.....	5
I.2.3 Les autres réseaux.....	5
I.2.4 Positionnement dans le monde de la radio.....	5
I.2.5 Le marché de la PMR.....	6
I.2.6 Les utilisateurs.....	7
I.2.6.1 Les usagers.....	7
I.2.6.2 Les opérateurs.....	7
I.2.6.3 Le dispatcher.....	7
I.2.7 Les services de phonie.....	7
I.2.7.1 Les communications de groupe.....	7
I.2.7.2 Les communications individuelles (ou privées).....	8
I.2.7.3 Les communications de detresse (ou d'urgence).....	9
I.2.7.4 Le mode direct (ou mode talkie-walkie).....	9
I.2.7.5 L'enregistrement.....	10
I.2.8 Services de données des réseaux bande étroite.....	10
I.2.9 Services de données des réseaux large bande et broadband.....	11
I.2.10 Mobilité.....	11
I.2.11 Interopérabilité.....	11
I.2.12 Qualités d'un réseau PMR.....	12
I.3 La norme TETRA.....	12
I.3.1 L'architecture d'un réseau TETRA.....	13
I.3.1.1 Console d'administration de réseau (console de service).....	15
I.3.1.2 Le dispatching.....	15
I.3.1.3 Les Switch (TSC).....	15
I.3.1.4 Station de base (TBS).....	16
I.3.1.5 Les micros station de base (micros TBS).....	16
I.3.1.6 Le mobile TETRA (TMS).....	17

I.3.2	L'interface radio TETRA.....	18
I.3.2.1	Méthode d'accès.....	18
I.3.2.2	La modulation utilisée.....	19
I.3.2.3	Structure des trames.....	19
I.3.2.4	Canaux logiques.....	21
I.4	Conclusion.....	24
Chapitre II	:Liaisons FH.....	25
II.1	Introduction.....	26
II.2	Historique.....	26
II.3	Les supports de transmission.....	27
II.4	Faisceaux hertziens.....	27
II.4.1	Schéma de principe d'une liaison hertzienne.....	27
II.4.2	Condition de bon fonctionnement d'une liaison hertzienne.....	28
II.4.3	Caractéristiques d'une liaison de transmission par faisceau hertzien.....	28
II.4.4	Les fréquences porteuses qui sont utilisées dans le faisceau hertzien.....	29
II.4.4.1	Les bandes basses (inférieures à 15 GHz), adaptées aux liaisons « longue distance».....	29
II.4.4.2	Les bandes hautes (supérieures à 23GHz), adaptées à des liaisons de « courte distance ».....	29
II.4.5	Avantages et inconvénients d'une liaison hertzienne.....	30
II.4.5.1	Avantages.....	30
II.4.5.2	Inconvénients:.....	30
II.5	Techniques de modulation FH.....	30
II.5.1	Principe général de la modulation.....	30
II.5.2	Modulations analogiques en faisceaux hertziens.....	32
II.5.3	Modulation numérique en faisceau hertzien.....	32
II.5.3.1	Modulation QPSK (Quadrature Phase Shift Keying).....	34
II.5.3.2	Modulation QAM.....	34
II.6	La propagation des ondes électromagnétiques.....	35
II.6.1	Rappel sur les ondes.....	35
II.6.2	Caractéristiques d'une onde électromagnétique.....	35
II.6.3	Le trajet multiple des ondes électromagnétiques.....	36
II.6.4	Propagation dans l'environnement.....	37
II.6.5	Propagation en visibilité.....	38

II.6.6	Propagation en non visibilité.....	38
II.7	Antennes	39
II.7.1	Définition d'une antenne.....	39
II.7.2	Les caractéristiques principales d'une antenne	39
II.7.2.1	Les caractéristiques d'adaptation	39
II.7.2.2	Les caractéristiques de rayonnement.....	40
II.7.3	Diagramme de Rayonnement.....	40
II.7.4	Directivité, gain et rendement d'une antenne	41
II.7.4.1	Gain	41
II.7.4.2	Directivité	42
II.7.4.3	Rendement.....	42
II.8	Puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE)	42
II.9	Conclusion	42
Chapitre III	Etude Et Simulation D'une Liaison FH Entre Blida Et Chéra.....	43
III.1	Introduction	44
III.2	Recommandation UIT-R P.530-17	44
III.3	Présentation de l'outil de simulation Pathloss 5.1	46
III.3.1	Définition	46
III.3.2	Applications proposées par Pathloss	46
III.4	Simulation de la liaison entre Chéra et Blida Ville avec Pathloss.....	48
III.4.1	Choix des options de calculs	49
III.4.2	Introduction des coordonnées GPS sur Pathloss	50
III.4.3	Génération du profil du terrain	51
III.4.4	Détermination des hauteurs des antennes	52
III.4.5	Visualisation des signaux réfléchis	53
III.4.6	Vérification du dégagement du parcours pour la zone de Fresnel.....	55
III.4.7	Calcul des différents types de pertes	56
III.4.8	Génération du profil de la liaison	57
III.5	Etablir le bilan de la liaison de Blida vers Chéra avec Pathloss 5.1	57
III.5.1	Définition	57
III.5.2	Notions utiles pour élaborer le Bilan des liaisons.....	58
III.5.2.1	Expression de la puissance reçue.....	58
III.5.3	Choix de l'antenne	59
III.5.4	Choix de la radio:	59

III.5.5	Choix de la fréquence	60
III.5.6	Influence de la pluie.....	60
III.5.7	Le Rapport final de la liaison.....	63
III.6	Conclusion.....	64
Chapitre IV : Configuration Et Mise En Service De La Liaison Blida Vers Chréa Avec		
	Le Logiciel Portal.....	65
IV.1	Introduction.....	66
IV.2	Présentation de la radio ECLIPSE.....	66
IV.3	Configuration de la liaison avec le logiciel portal.....	68
IV.3.1	Logiciel PORTAL.....	68
IV.3.2	Introduction des Paramètres radio sur le module RAC 6XE (radio Access 6XE).....	69
IV.3.3	Choix de la modulation.....	69
IV.3.4	Saisie de la fréquence.....	70
IV.3.5	La performance de la liaison radio.....	70
IV.3.6	Création des circuits.....	71
IV.3.7	Configuration de l'adresse IP de la radio.....	72
IV.3.8	Lecture des alarmes.....	73
IV.4	Conclusion.....	73
Conclusion Générale.....		74
R�f�rences Bibliographiques.....		75

LISTE DES ABREVIATIONS

AM: modulation d'amplitude.

AI: Air interface.

AMSF : d'accès multiple à sauts de fréquence.

BCCH: broadcast common control channel.

CS: Consol service.

CCCH: common control channel

DMO: Direct Mode Operation.

DECT: Digital Enhanced Cordless Telecommunications.

DQPSK: Differential Quadrature Phase Shift Keying.

DIMRS: Digital integrated mobile radio system.

ETSI: European Telecommunications Standards Institute

ECCH: associated control channel.

EDACS: Enhanced Digital Access Communications System.

EDACS: Enhanced digital access communications system.

FACCH: fast associated control channel.

FM: modulation fréquence.

FHA : faisceaux hertzien Analogique.

FHN : faisceaux hertzien numérique.

FH: faisceaux hertzien.

FDMA : fréquence Division Multiple Access.

GPS: Global Positioning System.

GSM: Global System for Mobile.

IDU: Indoor Unit.

IDRA: Integrated dispatch radio system.

ISI: Inter-System Interface.

LMR: Land Mobile Radio.

MAQ-16 M: modulation d'amplitude en quadrature-16 M.

MDFG: modulation par déplacement de fréquence gaussien.

MTU: Mobile Terminating unit.

MDP-4 C: modulation par déplacement de phase cohérente à 4 états.

MF4C: modulation de fréquence à 4 niveaux constante.

NMS: Network Management system.

ODU: Outdoor Unit.

PMR: private mobile radio communications.

PAMR: Public Access Mobile Radio.

PEI: Peripheral Equipment Interface.

PTT: push to talk.

PDO: Packet Data Optimized.

PM: modulation phase.

PDH: Plesiochronous Digital Hierarchy.

PIRE: Puissance isotrope rayonnée équivalente.

QPSK: Quadrature Phase Shift Keying.

SMS: short Message Service.

SACCH: slow associated control channel.

STCH: stealing channel.

SDH : Synchronous Digital Hierarchy.

SRTM: Shuttle Radar Topography Mission.

T2: TETRA 2 interfaces.

TETRA: Terrestrial Trunked Radio.

TBS: TETRA Base Station.

TSW: Tetra switch center.

TEDS: TETRA Enhanced Data Service.

TSC: TETRA Switch Center.

TDMA: Time Division Multiple Access.

TCH: traffic channels.

TCH/S: speech traffic channel.

TCH/D: Data Traffic Channel.

T.E.B: taux d'erreur par bit.

UMTS: Universal Mobile Telecommunications System.

UWB: Ultra-wideband.

UIT : l'Union internationale des télécommunications.

WIMAX: Worldwide Interoperability for Microwave Access.

WI-FI: Wireless Fidelity.

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : positionnement des PMR par rapport aux autres technologies radio.....	6
Figure I.2 : types d'appels avec TBS.....	9
Figure I.3 : Mode direct sans répéteur	10
Figure I.4 : services offerts par rapport à la largeur de bande.....	11
Figure I.5 : architecture d'un réseau.....	14
Figure I.6 : modele d'un Switch.....	16
Figure I.7 : La micro TBS répéteur	17
Figure I.8 : Mobile TETRA	17
Figure I.9 : Structure canal au niveau TETRA.....	18
Figure I.10 :Constellation modulation $\pi/4$ -DQPSK.....	19
Figure I.11 :Construction de la multi-trame.....	20
Figure II.1 :Historique des radiocommunications.....	26
Figure II.2 :Constitution d'une liaison hertzienne.....	28
Figure II.3 :Différents types de modulations.....	31
Figure II.4 :Schéma d'un système de transmission numérique.....	32
Figure II.5 :Distribution des composantes de modulation.....	34
Figure II.6 :Propagation d'une onde	35
Figure II.7 :Propagation d'onde dans l'environnement.....	37
Figure II.8 :Représentation d'une liaison entre deux antennes.....	39
Figure II.9 :Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne.....	41
Figure III.1 : choix de l'option Pathloss link standalone.....	48
Figure III.2 : Fenêtre principale de Pathloss Link standalone.....	49
Figure III.3 : Choix des options de calculs.....	49
Figure III.4 : Introduction des coordonnées GPS.....	50
Figure III.5 : Choix du DEM (digital élévation model).....	51
Figure III.6 : Choix du clutter model.....	51
Figure III.7 : Données du parcours entre les deux sites.....	52
Figure III.8 : Choix des hauteurs d'antennes.....	52
Figure III.9 : Les multi trajet et signaux réfléchis à partir du site de Blida vers Chréa.....	53
Figure III.10 : Les multi trajet et signaux réfléchis à partir du site de Chréa vers Blida.....	53
Figure III.11 : Schéma du signal après le choix des hauteurs d'antennes a partit De Blida vers Chréa	54

Figure III.12 : Schéma du signal après le choix des hauteurs d'antennes partit De Chréa vers Blida.....	54
Figure III.13 : La zone de Fresnel.....	55
Figure III.14 : Calcul des différents types de pertes.....	56
Figure III.15 : Génération du profil de la liaison.....	57
Figure III.16 : Choix des antennes.....	59
Figure III.17 : Choix de la radio.....	59
Figure III.18 : Choix de fréquence.....	60
Figure III.19 : Monogramme pour calculer les atténuations dues à la pluie.....	61
Figure III.20 : Définition de la zone hydrométéorologique.....	62
Figure III.21 : Calcul de pluie.....	62
Figure IV.1 : Exemple d'une configuration de la plateforme ECLIPSE.....	66
Figure IV.2 : ECLIPSE ODU 600.....	67
Figure IV.3 : ECLIPSE de type INUe.....	67
Figure IV.4 : Fenêtre d'accès du logiciel portal.....	68
Figure IV.5 : Fenêtre principal de la radio ECLIPSE.....	68
Figure IV.6 : Introduction Des Paramètres Radio Sur Le Module RAC 6XE.....	69
Figure IV.7 : Choix de la modulation.....	69
Figure IV.8 : Saisie de la fréquence.....	70
Figure IV.9 : Chemin pour afficher la performance.....	70
Figure IV.10 : Le tableau performance.....	71
Figure IV.11 : Chemin d'accès au menu circuit.....	71
Figure IV.12 : La création du circuit.....	72
Figure IV.13 : Configuration réseau de la radio.....	72
Figure IV.14 : Lecture des alarmes.....	73

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Paramètres radio de la norme TETRA.....	21
Tableau I.2 : Comparaison entre les différents réseaux PMRs.....	23
Tableau II.1 : Modulation 4-QAM	34
Tableau III.1 : Rapport final de la liaison.....	64

INTRODUCTION GENERALE

Le secteur des télécommunications connaît une évolution exponentielle avec l'avènement de systèmes numériques dû à l'augmentation des abonnés et des demandes en capacité de plus en plus accrues. Cette évolution se traduit par le développement des différents systèmes offrant de plus en plus de services à l'utilisateur, une meilleure qualité de fonctionnement et de gestion. Ainsi les systèmes de radio mobiles vont connaître le plus grand essor dans le domaine des télécommunications et en contrepartie, cela entraînera l'avènement de nouvelles techniques permettant le transport de l'information d'où l'importance et la nécessité de nouveaux systèmes des transmissions.

Au stade actuel du développement des télécommunications, les systèmes de transmissions les plus utilisés sont les transmissions à base des faisceaux hertziens et ceux à base de fibres optiques. Dans le souci de permettre aux populations de communiquer et d'échanger partout et en temps réel, bon nombre d'opérateurs téléphoniques s'interrogent sur les infrastructures et technologie qui permettront de répondre à ces exigences. Ainsi, la nécessité d'avoir une connaissance sur les différents équipements utilisés, une maîtrise de la chaîne de transmission et des techniques de transport utilisées dans les systèmes de transmission sont d'une importance capitale.

Dans le but d'harmoniser les moyens de télécommunications en Europe, ETSI a développé un standard de radiocommunication numérique bidirectionnel appelé TETRA. Les systèmes de radiocommunication à ressources partagées sont utilisés principalement par des groupes d'utilisateurs fermés comme les services de transports (Taxis, entreprises de transport, les aéroports etc.), les entreprises d'énergie et les organes de sécurité (par exemple, la police, les pompiers, les services sanitaires, l'armée, la protection civile, le corps des gardes-frontières, etc.). Ces groupes d'utilisateurs disposent de leur propre système privé de radiocommunication à ressources partagées ou utilisent les services d'un opérateur de radiocommunication à ressources partagées.

C'est dans ce cadre que s'inscrit notre mémoire de fin d'études, dont l'objectif de dimensionnement et planification avec le logiciel « PATHLOSS 5.1 » qu'il est basé sur la configuration des liens de transmission et le calcul de Bilan de la liaison de ces liens.

Nous avons choisi deux sites à créer : le site 1 situé à la wilaya de Blida, et le site 2 situé à Chréa. Pour une meilleure présentation de ce travail nous avons structuré le présent mémoire en quatre chapitres.

- Le premier chapitre une brève description de l'architecture de réseau TETRA, et leurs différentes caractéristiques. Cette partie présente aussi les différentes composantes ne nécessite pas l'abondance des éléments de l'ancien réseau.
- Dans le deuxième chapitre, nous allons préciser les faisceaux hertziens comme un support important pour la transmission et pour le déploiement des sites du réseau TETRA
- Le troisième chapitre est consacré pour faire l'étude de la liaison FH de Blida vers Chréa, avec le logiciel Pathloss 5.1, à partir du site Survey jusqu'à la délivrance du rapport final de la liaison
- Finalement, le dernier chapitre est réservé à l'application des résultats de simulation du troisième chapitre, avec logiciel. «Portal », relative au type d'équipement utilisé.

1^{er} Chapitre

I- Réseaux TETRA

I.1 Introduction

Le système TETRA est un système de radiocommunication mobile de hautes performances conçu essentiellement pour des utilisateurs professionnels: services d'urgence, transports publics, etc. L'ensemble des spécifications du système TETRA assure une capacité radio intégrée et complète pour des communications directes de mobile à mobile avec ou sans partage des ressources avec diverses options: communications vocales, transmission de données en mode circuit, transmission de brefs messages de données et services en mode paquet. Le système TETRA offre une gamme tout particulièrement large de services supplémentaires, dont un grand nombre de fonctions exclusives.

TETRA est une norme de l'ETSI (Européen Télécommunications Standards Institute) décrivant un système de radiocommunications mobiles professionnelles (PMR), Moins connus du grand public que les réseaux cellulaires, les PMR constituent pourtant la forme la plus ancienne de communications mobiles.

Dans ce chapitre on va parler des PMR en général, puis on va détailler un peu la norme européenne TETRA.

I.2 Les PMR

Le système de radiocommunication professionnelle PMR est généralement simple voir très simple en terme d'équipement et de gestion, il offre de nombreux avantages par rapport aux réseaux cellulaire tant du point de vue autonomie de gestion que par les services offerts. Ce dernier n'a pas connu d'évolution technique majeure jusqu'aux années 1970. Le principe sur lequel est basé le PMR consiste à allouer une seule fréquence pour un ensemble d'utilisateurs, ce qui a mené à une utilisation moins optimale du spectre radio.

L'augmentation de la demande sur le spectre radio a accélérée l'introduction de la technique Trunk qui augmente l'efficacité spectrale en mettant plusieurs canaux pour un groupe d'utilisateurs. Les systèmes basés sur cette technique sont appelées « réseaux radio à ressources partagés (3RP) »

I.2.1 Un réseau sécurisé

Les réseaux PMR (ou LMR dans la dénomination anglo-saxonne) sont des réseaux de radiocommunication sécurisés, essentiellement axés sur des services de phonie et de mini messagerie, qui ont la particularité d'être conçus et exploités par leurs propres utilisateurs. Ils s'adressent à des entités qui ont des besoins forts en matière de confidentialité et de permanence de service, en particulier aux forces de Sécurité Publique.

Le réseau PMR est celui qui doit continuer à fonctionner quand tout va mal ! En cas de crise majeure affectant les moyens de communication classiques radio et filaires, le réseau PMR est celui qui doit rester opérationnel pour organiser les secours et assurer un service minimal de communication. Priorité est donnée à la robustesse du système et c'est la raison pour laquelle les réseaux PMR sont basés sur des techniques éprouvées réputées fiables. Toutes les transactions sont sécurisées par des moyens d'authentification et de chiffrement afin d'assurer la confidentialité et l'intégrité du réseau.

I.2.2 Un réseau privé

Le réseau PMR appartient à son utilisateur qui en finance le déploiement et qui en assure l'exploitation. Le réseau est adapté à ses besoins en termes de capacité de trafic, de couverture et de services. Un réseau PMR représentant un investissement lourd, il arrive qu'un même réseau soit partagé par plusieurs utilisateurs, qu'on appelle des « organisations », qui en sont en quelque sorte copropriétaires.

I.2.3 Les autres réseaux

Toute règle ayant bien sûr son exception, il existe aussi des réseaux PMR à couverture nationale qui appartiennent à des opérateurs qui vendent des services à des organisations trop petites pour avoir leur propre réseau. Ces réseaux portent le nom de PAMR. La majorité se trouve en Amérique du nord. En France, il n'y a eu que deux réseaux de ce type : RADIOCOM 2000 (fermé en 2000) et DOLPHIN lancé - et fermé - au début des années 2000. Après la fermeture de Dolphin, des petits réseaux privés se sont développés dans des bandes de fréquence avec ou sans licence. Déployés à l'échelle d'une ville ou d'un département, ils sont administrés par des exploitants gérants de fréquences puis sous-loués aux utilisateurs finaux. Ces petits réseaux de PAMR portent le nom de RPX et utilisent les anciennes fréquences du réseau Dolphin. Après cette digression sur les RPX et autres réseaux PAMR, concentrons-nous sur les réseaux PMR.

I.2.4 Positionnement dans le monde de la radio

Pour situer la PMR par rapport aux autres technologies radio, essayons de la positionner dans un repère à deux dimensions :

- ❖ En abscisses, la dimension des réseaux :
 - PAN : réseau à l'échelle de la personne ou de la maison,
 - LAN : réseau à l'échelle de l'entreprise,
 - MAN : réseau à l'échelle de la ville,
 - WAN : réseau à l'échelle nationale ou plus.

- ❖ En ordonnées le débit, réparti en trois catégories :
 - Réseaux à bande étroite (narrowband) : débit de quelques kbits/s,
 - Réseau à large bande (wideband) : débit de quelques centaines de kbits/s,
 - Réseau broadband : débit de quelques Mbits/s et plus.

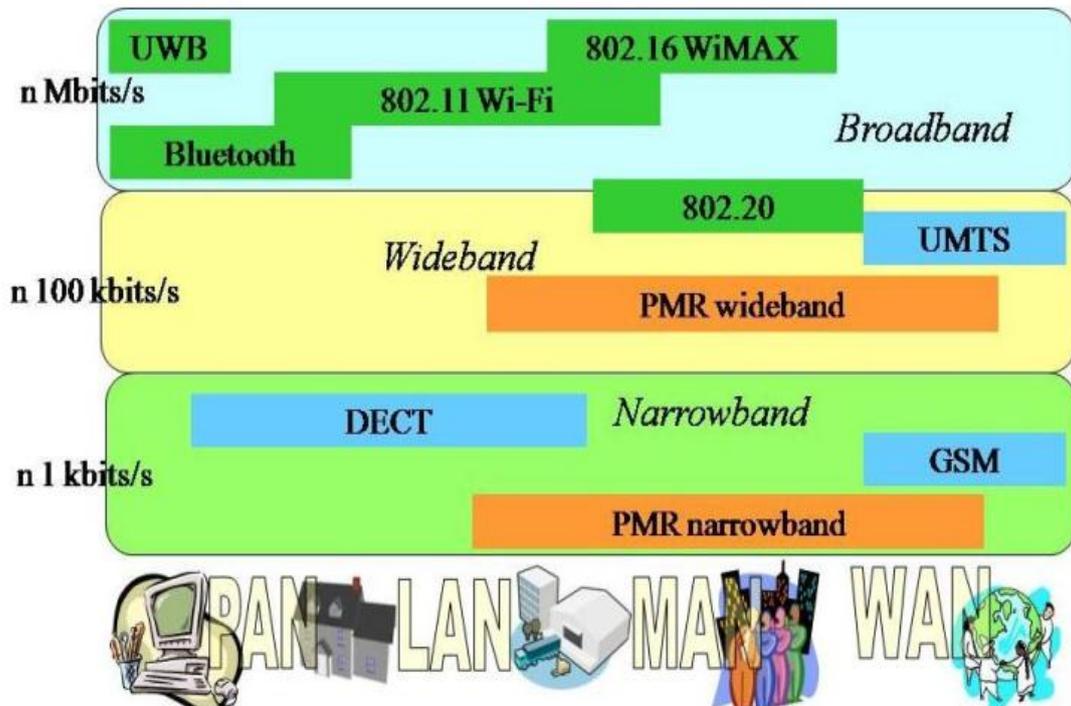


Figure I.1 : positionnement des PMR par rapport aux autres technologies radio [1]

I.2.5 Le marché de la PMR

Près de la moitié des utilisateurs sont les forces de Sécurité Publique (police, gendarmerie, pompiers...). Le reste se répartit entre les transports, l'industrie, les services (eau, gaz, électricité...) pour des parts allant de 10 à 20%. Une part à peu près égale rassemble des utilisateurs divers : centres commerciaux, prisons, garde rapprochée...

La motivation des utilisateurs est la **sécurité**. Comme nous l'avons dit plus haut, le réseau PMR est celui sur lequel on peut compter quand rien ne va plus. Ceci passe par deux contraintes:

- **La permanence de service** : En cas de défaillance partielle ou totale du réseau, il est indispensable qu'un service minimal soit assuré.
- **La confidentialité** : Il est impératif que les communications ne puissent être écoutées par des tiers non autorisés. De même, un usager non autorisé ne doit pas pouvoir s'introduire sur le réseau.

I.2.6 Les utilisateurs

Les réseaux PMR offrent des services de phonie, de données et de configuration à leurs utilisateurs qui se répartissent entre deux grands groupes:

I.2.6.1 Les usagers

Les usagers nomades sont équipés de terminaux radio portatifs ou mobiles. Les usagers à poste fixe sont équipés de terminaux radio fixes avec alimentation secteur et combiné. Chaque terminal du réseau peut être associé à un terminal de données. Certains usagers peuvent appartenir à un autre réseau radio ou filaire qui inter opère avec le réseau PMR : usager d'un autre réseau PMR, poste téléphonique, terminal d'un réseau informatique.

I.2.6.2 Les opérateurs

Il y a plusieurs fonctions d'opérateurs, même si dans certains réseaux une même personne remplit plusieurs d'entre elles :

- **L'opérateur technique** : il est chargé du maintien du réseau en conditions opérationnelles.
- **L'opérateur tactique** : il est chargé de la configuration des usagers et des missions, c'est-à-dire de l'organisation des communications sur le terrain et de la supervision opérationnelle du réseau. Il y en a un par organisation utilisatrice du réseau.

I.2.6.3 Le dispatcher

Il peut y en avoir plusieurs et son rôle est de coordonner les usagers sur le terrain. C'est par exemple celui qui depuis son poste de commandement dirige et coordonne une mission terrain. Il dispose de toutes les fonctions des postes d'usagers, plus certains services qui lui sont propres. Il dispose également d'un certain nombre des fonctions de l'opérateur tactique.

I.2.7 Les services de phonie

La communication de phonie est la fonction la plus utilisée sur le terrain. Un impératif est que la phonie soit de bonne qualité. Un ordre mal reçu et mal interprété peut avoir dans ce domaine des conséquences particulièrement fâcheuses.

Dans un réseau PMR, les usagers communiquent au sein de groupes de communication, la communication privée entre deux individus étant exceptionnelle.

I.2.7.1 Les communications de groupe

La communication de groupe, couramment nommée **talkgroup**, est une fonctionnalité fondamentale et indispensable des réseaux PMR. Elle concerne un ensemble d'individus engagés sur une même mission tactique, ou rattachés à un même service (par exemple le commissariat d'un arrondissement de Paris).

Ces communications s'établissent quasi instantanément par une manœuvre simple, sur le modèle du canal ouvert. Rappelons que le **canal ouvert** est une forme très simple de communication qui définit un canal radio sur lequel tout le monde peut parler et s'entendre. Les réseaux PMR améliorent le mode du canal ouvert en faisant une sélection des participants en fonction de groupes. En fait, le modèle de la communication de groupe met en œuvre:

- une population, définie par son appartenance à un ou plusieurs groupes,
- une zone géographique, définie par un ensemble de cellules,
- éventuellement des paramètres supplémentaires (priorité...).

Les communications de groupe sont définies par les opérateurs tactiques et/ou les dispatchers en fonction des besoins opérationnels.

Toutes les communications PMR s'effectuent à l'alternat (half duplex) : un seul parle tandis que les autres participants ne peuvent qu'écouter.

L'alternat est une contrainte tant opérationnelle que technique. Une communication de groupe pouvant impliquer un nombre important de participants, sa bonne compréhension implique que plusieurs personnes ne puissent pas parler en même temps.

Un autre impératif est l'activation immédiate des communications. Pour parler, l'utilisateur n'a qu'une seule manœuvre à faire : appuyer sur la commande de prise d'alternat de son terminal (push to talk – PTT) ; les autres passent automatiquement en réception.

I.2.7.2 Les communications individuelles (ou privées)

Elles sont proposées par les réseaux PMR sans être vraiment indispensables. Ce sont des communications point à point de type téléphonique avec sélection du demandé par numérotation et décroché/raccroché. Elles peuvent faire intervenir un interlocuteur externe au réseau PMR, par exemple un usager téléphonique.

Le plan de numérotation est propre au réseau et représentatif de l'organisation tactique. Là encore, par tradition, ces communications se déroulent à l'alternat, bien que certains réseaux proposent aussi des communications individuelles en full duplex. Le full duplex est surtout apprécié lorsque la communication implique un usager téléphonique qui par nature ne dispose pas de commande d'alternat. Contrairement à la communication de groupe dont les participants sont prédéfinis, les participants de la communication individuelle sont définis à base de communication par l'appelant (comme en téléphonie).

Certains standards permettent à un usager d'appeler un groupe et, de cette manière, de se joindre dynamiquement à une communication de groupe à laquelle il n'appartient pas.

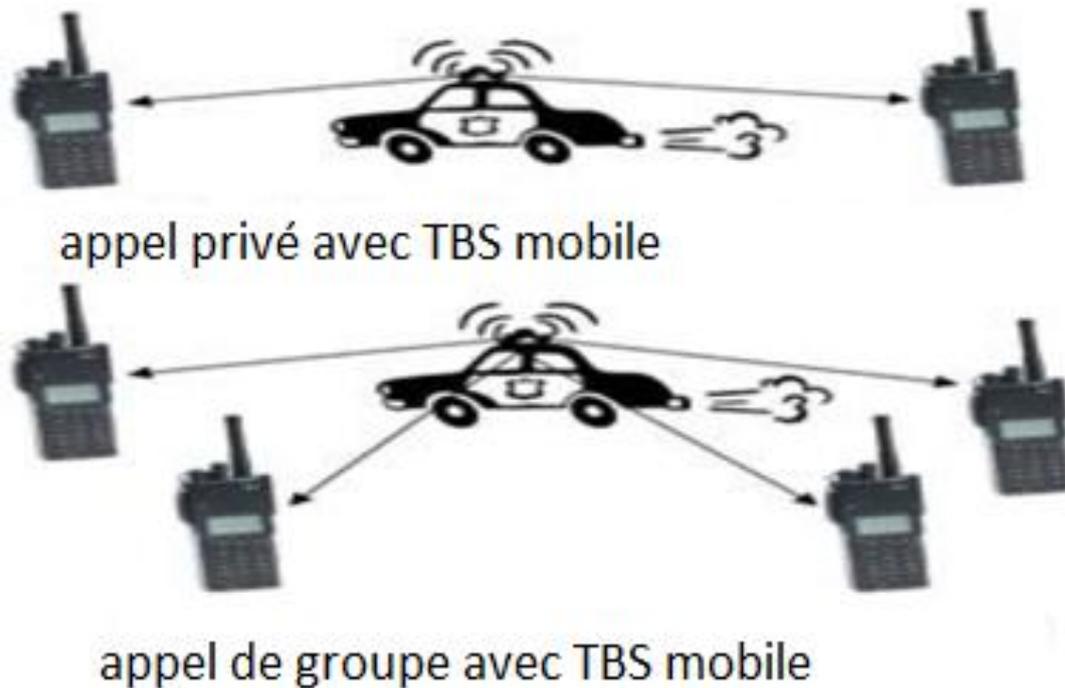


Figure I.2 : types d'appels avec TBS [2]

I.2.7.3 Les communications de détresse (ou d'urgence) [2]

Exigées par les utilisateurs PMR, il s'agit de communications de groupe ou individuelles de très haute priorité et **préemptives**, déclenchées en cas d'urgence par une manœuvre simple. Elles doivent être acheminées quel que soit l'état du réseau.

I.2.7.4 Le mode direct (ou mode talkie-walkie)

Le mode direct est une spécificité et une exigence très forte de la PMR, vital au même titre que l'appel de détresse, qu'il doit d'ailleurs supporter. Il désigne un mode sans infrastructure où les terminaux communiquent seulement grâce à leurs capacités intrinsèques et dans leur limite de portée.

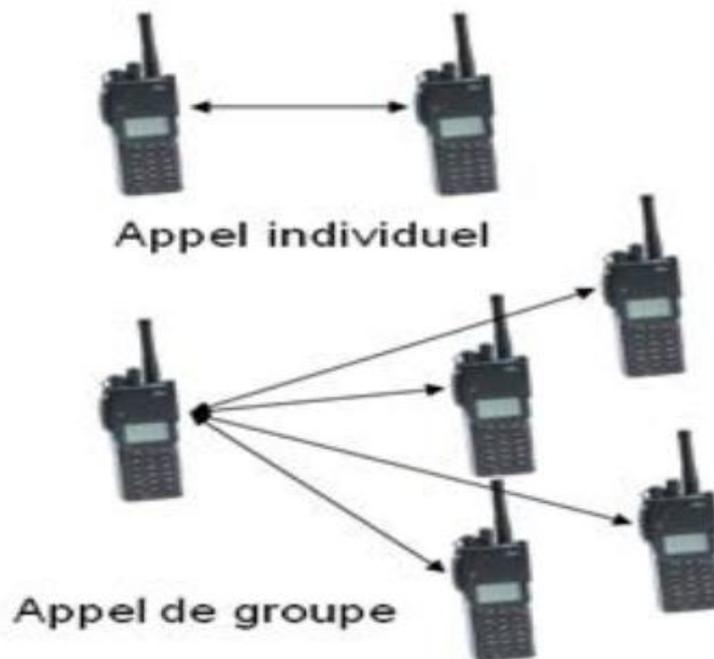


Figure I.3 : Mode direct sans répéteur [2]

I.2.7.5 L'enregistrement [2]

Nous citerons aussi un besoin récurrent de la Sécurité Publique qui est l'enregistrement des communications, pour réécoute immédiate et pour archivage (témoignage).

I.2.8 Services de données des réseaux bande étroite

Ils sont assez modestes, bridés par les faibles débits des réseaux PMR. Les services voix et données utilisent le même terminal et sont également disponibles sur la même couverture radio. Le plus ancien concerne l'envoi de statuts, soit un octet d'information avec une signification convenue (exemple 1 = j'arrive sur les lieux, 2 = demande de renfort, etc.). La mini messagerie de type SMS est également utilisée. Statuts et SMS sont émis et reçus directement sur le terminal, comme en GSM. D'autres services nécessitent le raccordement d'un équipement informatique (ordinateur portable, tablette...) au terminal qui fait en gros office de modem. Il s'agit de services de transfert de données (exemple : transfert d'une photo d'identité comprimée) et de consultation de bases de données (exemple : consultation du fichier des cartes grises). A cause du faible débit de la liaison radio, les transactions ne portent que sur de faibles quantités d'information.

I.2.9 Services de données des réseaux large bande et Broadband

Le besoin s'est fait ressentir de débits plus élevés pour transférer davantage de données. Les différents acteurs de la PMR se penchent actuellement sur cette nouvelle demande et travaillent pour définir des réseaux PMRs large bande (wideband) et Broadband.

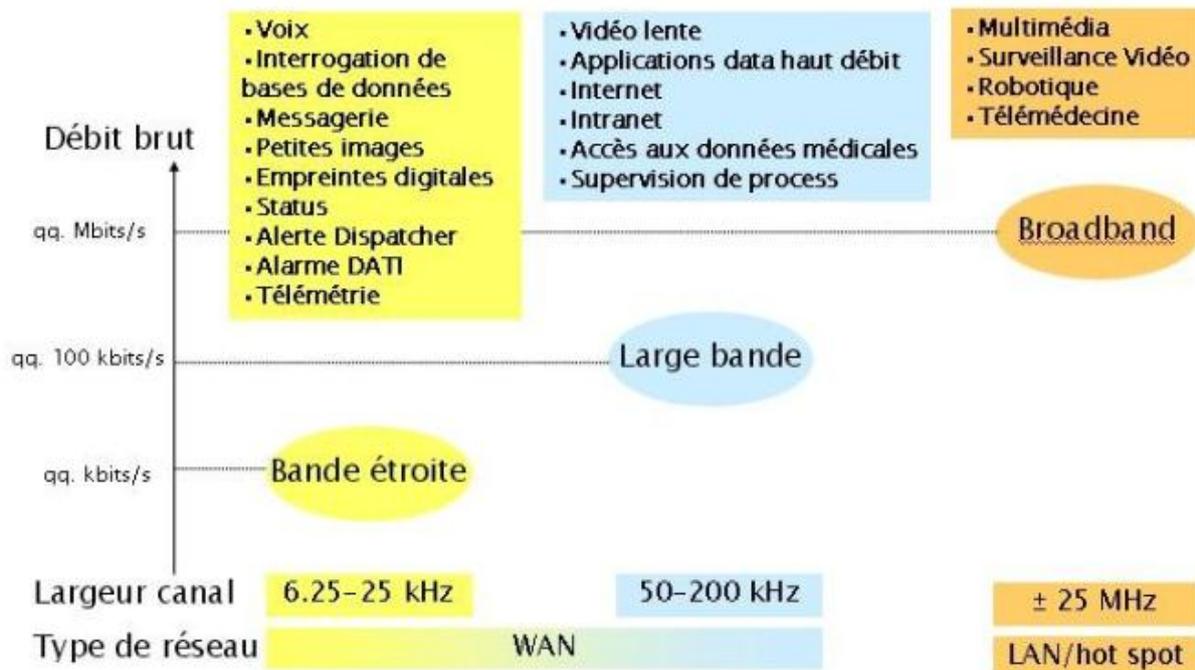


Figure I.4 : services offerts par rapport à la largeur de bande [1]

I.2.10 Mobilité [2]

Comme dans tout réseau radio, les utilisateurs exigent de disposer de l'ensemble des services du réseau quelle que soit leur localisation (roaming) et de conserver leur communication lors de leurs déplacements. Ce dernier point est assuré par des fonctions de resélection de voie balise (ou resélection de cellule), le handover étant un luxe que n'offrent que quelques standards.

I.2.11 Interopérabilité

Le réseau PMR n'est pas un monde à part et un usager PMR doit pouvoir communiquer avec des usagers d'autres réseaux : autre réseau PMR, réseau téléphonique, réseau de transmission de données. Cet interfonctionnement est assuré par le biais de passerelles (gateways).

I.2.12 Qualités d'un réseau PMR

Pour résumer, nous mettons ici en évidence les caractéristiques d'un réseau PMR :

- Haut niveau de sécurité : confidentialité, permanence de service.
- Bonne qualité de la phonie: les communications doivent être parfaitement audibles.
- Bandes de fréquences réservées (et sous licence):
 - pour éviter tout risque d'interférence et de collision avec d'autres réseaux,
 - l'attribution d'une largeur de spectre radio aux réseaux est faite selon leurs besoins de trafic afin d'éviter les risques d'encombrement réseau.
- Optimisation des coûts: l'utilisateur va chercher à réduire le nombre de relais radio qui sont des éléments chers de son réseau dont il est le seul utilisateur.
 - cellules étendues pour une bonne couverture de zones rurales avec peu de relais,
 - bonne efficacité spectrale pour optimiser l'utilisation des fréquences dont la licence est chère.
- Interface air éprouvée sur des technologies qui ont fait leurs preuves:
 - résistance aux brouillages,
 - bonne pénétration dans les bâtiments (couverture indoor) ; ce point va aussi dans le sens de la Réduction des coûts en évitant des équipements spécifiques pour les parties couvertes.
- Services voix et données intégrés sur le même équipement (terminal et infrastructure)
- Modularité – Extensibilité: l'accroissement des besoins d'un utilisateur ne doit pas remettre en cause l'investissement.

I.3 La norme TETRA

TETRA est une norme de l'ETSI décrivant un système de transmission radio en technologie numérique. Autour de cette norme reconnue par l'ensemble des Pays Européens, TETRA est un système de radiocommunication mobile de hautes performances conçu essentiellement pour des utilisateurs professionnels comme les services d'urgence, transports publics, ...etc.

L'ensemble des spécifications du système TETRA assure une capacité radio intégrée et complète pour des communications directes de mobile à mobile avec ou sans partage des ressources avec diverses options de communications vocales, transmission de données en mode circuit, transmission de brefs messages de données et services en mode paquet [3].

Le système de transmission de données par paquets optimisées (PDO–*Packet Data Optimized*) repose sur la plate-forme radioélectrique physique du système TETRA (voix plus données).

Avec la version 2 de TETRA (TETRA 2), de nouvelles fonctionnalités importantes ont été ajoutées à la norme dès 2006, par exemple TEDS (*TETRA Enhanced Data Service*). TEDS repose sur la technique multi-porteuse adaptative comprenant 8 sous-porteuses de 25 kHz ainsi que sur une modulation QAM linéaire. Avec des modes de modulation supérieurs et la commutation de 6 canaux de radiocommunication au maximum pour une largeur de bande de transmission de 150 kHz (soit en tout 48 sous porteuses), on obtient des débits allant jusqu'à 134 kbit/s par intervalle de temps, voire supérieurs à 500 kbit/s en occupant 4 intervalles, TETRA a donc muté d'un système NB (à bande étroite) à un système WB (à large bande).

Les premiers réseaux compatibles TEDS ont été mis en service fin 2013 [4].

I.3.1 L'architecture d'un réseau TETRA

La structure des réseaux TETRA est normalisée. Ces derniers reposent sur une architecture maillée commune à tout type de réseaux de communication. Les terminaux mobiles se connectent au réseau via des points d'accès sans-fil, appelés stations de base (TBS) qui sont à leurs tour interconnectées via Switch TSC (*TETRA Switch Center*). Ceci permet notamment l'interception du flux audio en de multiples points du réseau. La chaîne complète de transmission, entre l'acquisition du signal sur le terminal mobile et la réception du flux sur le réseau, se décompose selon plusieurs traitements.

Un réseau TETRA est généralement formé à partir de cinq types d'équipements :

- Console d'administration de réseau (ou console de service) ;
- Dispatching;
- Switch TSC (*TETRA Switch Center*);
- Station de base TBS (*TETRA Base Station*) ;
- TMS (*TETRA Mobile Station*).

Chaque station de base est rattachée à un TSC et les TSC sont interconnectés entre eux, chaque TSC dispose d'une console d'administration. Un TSC peut être connecté à plusieurs dispatchings et à plusieurs autocommutateurs téléphoniques. Un réseau régional est formé d'un TSC avec sa console d'administration et d'un ensemble de stations de base.

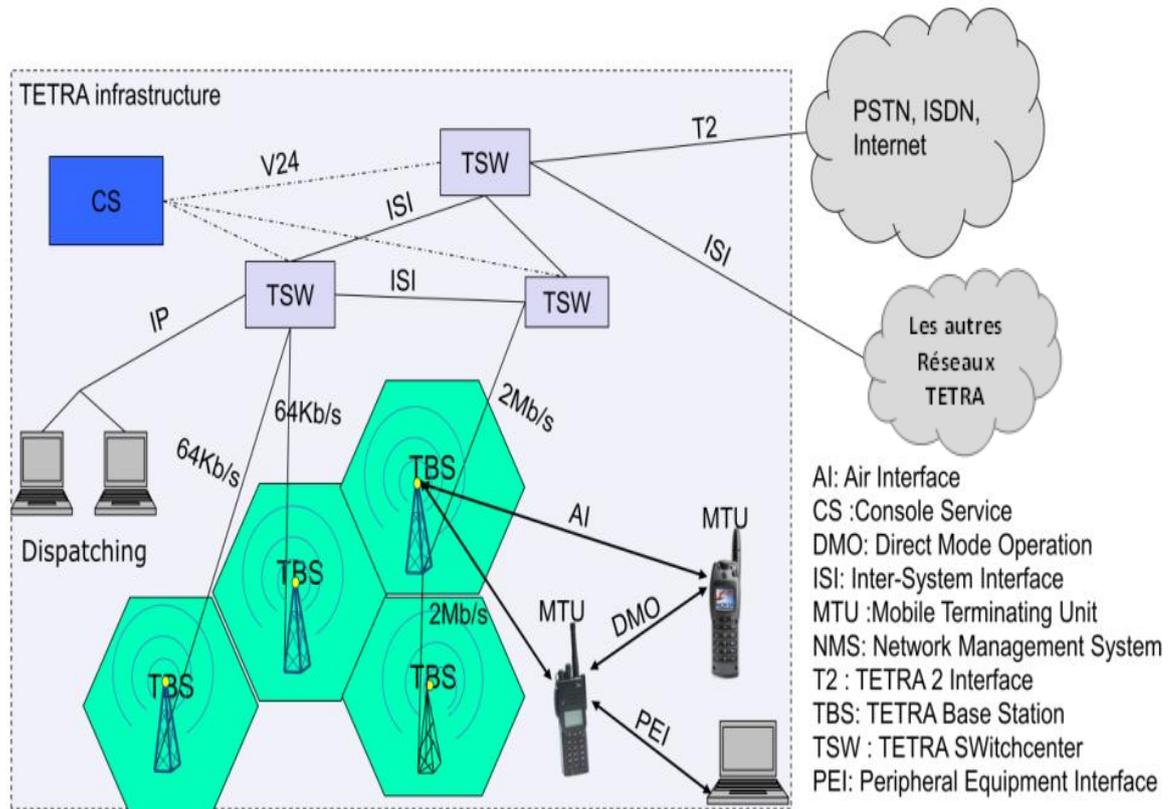


Figure I.5: architecture d'un réseau [1]

- L'interface air (AI) : est la liaison entre le terminal radio et la station de base.
- L'interface d'exploitation des terminaux (PEI) : est la liaison entre un mobile et un terminal permettant la transmission de données. Comme exemple la communication entre un PC et un mobile.
- L'interface Inter Système (ISI) : est la liaison entre les TSC ou d'autres réseaux TETRA.

Les améliorations offertes par le standard TETRA permettent entre autres :

- D'utiliser les canaux de manière plus efficace. Il est possible de mettre quatre canaux par porteuse de 25 kHz.
- De permettre une gestion poussée des groupes de communication ainsi que la gestion des services offerts.
- De fournir un service d'appels rapides.
- De permettre le chiffrement de la voix, des données et l'identité de l'utilisateur.
- De permettre de combiner la voix et le service des données.
- De fournir un service avancé de transmission de données offrant un très grand nombre de possibilités.

I.3.1.1 Console d'administration de réseau (console de service)

Parmi ses fonctions les suivantes [5]:

- Affichage synoptique en temps réel du réseau
- Surveillance d'un élément du réseau par "zoom"
- Gestion des alarmes
- Accès aux paramètres de tous les éléments du réseau
- Chargement automatique des paramètres des différents éléments du réseau
- Archive des appels.
- Créer / supprimer / recopier des mobiles et groupes de mobiles
- Déclaration des droits affectés à chaque mobile
- Droits et accès pour chaque déclaration de groupe
- Description du plan de numérotation.

I.3.1.2 Le dispatching

Un dispatching est un ensemble de postes de travail phonie et/ou données communiquant de manière privilégiée avec les mobiles. Parmi les fonctions de dispatching les suivantes [5] :

- Fusion d'appels ;
- Appel autorisé par Dispatcher ;
- Appel d'urgence ;
- Créer et ajouter des groupes ;
- Positionnement GPS de tous les abonnés sur la carte ;
- Historique de positionnement GPS ;
- Mise à jour du répertoire depuis Registre des abonnés ;
- Modifier l'autorisation dans le registre des abonnés ;
- Historié des abonnés individuels et groupes ;
- L'état et l'historique des appels vocaux ;
- Affichage des alarmes de nœud

I.3.1.3 Les Switch (TSC)

Le commutateur TSC forme le centre nerveux du réseau TETRA gérant la base de données centralisée, l'échange de données et les interfaces entre les stations de base, les réseaux de distribution et l'équipement téléphonique. Pour les réseaux plus importants, une architecture distributive peut être établie en créant des sous-réseaux chacun contrôlé par des commutateurs

supplémentaires. Des options de redondance sont disponibles en introduisant des unités de commutation dupliquées.



Figure I.6: modèle d'un Switch [6]

I.3.1.4 Station de base (TBS) [6]

La TBS est l'émetteur récepteur TETRA offrant la couverture radio d'un site. Elle est composée de porteuses TETRA, et dont le rôle principal est la gestion des liaisons avec les autres éléments de réseau et gère les problèmes liés à la transmission radioélectrique (modulation, démodulation, égalisation, codage et correction d'erreurs, Multiplexage TDMA, chiffrement) d'un réseau. Elle fournit un point d'entrée dans le réseau aux terminaux présents dans sa cellule pour recevoir ou transmettre des appels. Il existe plusieurs types de TBS conçues de manière à fonctionner tout en respectant les conditions de la norme TETRA, parmi lesquels nous citons :

I.3.1.5 Les micros station de base (micros TBS)

Les micros TBS sont des stations de base qui ont une puissance de transmission et une sensibilité faible par rapport aux TBS conventionnelles, ceci permet de mettre en place des micros cellules qui s'intègrent dans le réseau existant. Ces micros cellules ont comme caractéristique fondamentale une taille réduite (un rayon de l'ordre de 400m). Cette TBS est parfois appelée répéteur elle se divise en deux types : mobile comme la montre la figure 7, et fixe qui est fréquemment utilisé dans les tunnels et les lignes de couverture (ex : ligne de train). La micro station de base joue le rôle d'une passerelle de réseau. Elle est une solution à plusieurs problèmes de couverture radio.

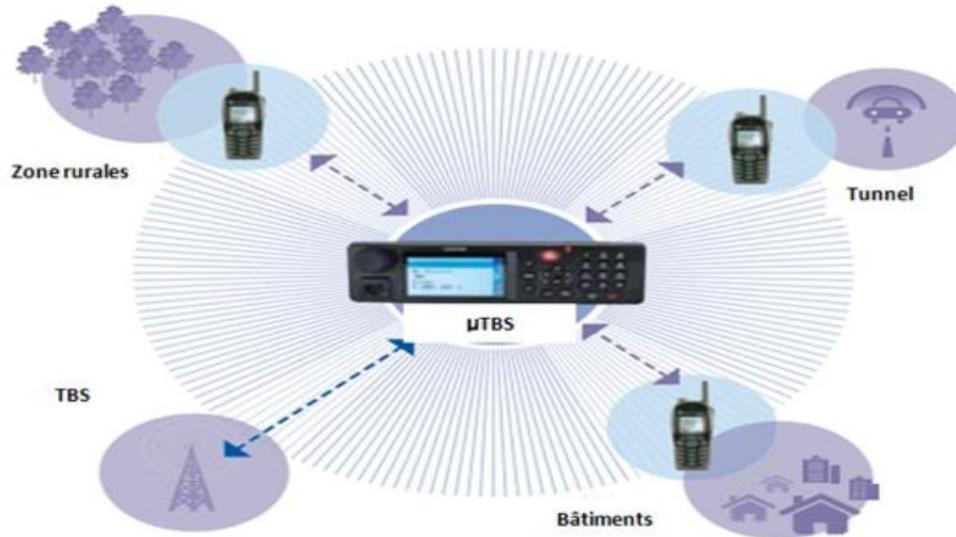


Figure I.7 : La micro TBS répéteur mobile [7]

I.3.1.6 Le mobile TETRA (TMS)

Avec ses 10 Watts de puissance RF et sa technologie de passerelle et de répéteur la plus éprouvée sur le marché, le mobile TETRA permet d'étendre la communication à d'autres domaines au-delà de la couverture réseau. Un lecteur audio de 8 W fournit un son fort et clair et le module GPS intégré permet de suivre les satellites GPS et le réseau de satellites en utilisant le dernier support GPS différentiel, la technologie CW antibrouillage afin d'offrir un plus grand degré de précision et de sécurité ces radios mobiles robustes donnent un son clair, même dans des environnements à bruit élevé [5].



Figure I.8 : Mobile TETRA [6]

I.3.2 L'interface radio TETRA

I.3.2.1 Méthode d'accès

TETRA utilise le système TDMA (*Time Division Multiple Access*). Un canal radio comporte 4 canaux physiques (intervalles de temps). Un canal physique est défini par un slot de la trame TDMA. Du fait de l'aspect duplex des canaux radio, un canal physique occupe 25 kHz dans le sens montant et autant dans le sens descendant, les deux séparés d'un écart duplex de 10 MHz.

La TBS supporte trois types de canaux physiques :

- La voie balise (Control Physical channel – CP) qui véhicule la signalisation réseau et des transmissions de données courtes en mode paquet.
- Des voies de trafic (Traffic Physical channel - TP) qui transportent la voix et des données en mode paquet ou en mode circuit.
- Des voies non allouées (Unallocated Physical Channel – P) qui ne sont jamais allouées à une communication et qui sont réservées pour des messages broadcastés.

- **Les canaux logiques de la voie balise**

La voie balise (ou Control Channel CCH) supporte plusieurs canaux logiques, multiplexés sur la multitrame afin de constituer des sous-canaux de plus faible débit.

- **Les canaux logiques des voies de trafic**

Ils sont désignés sous le terme générique de « Voie de Trafic » (Traffic Channel – TCH).

Selon le type de flux à transporter, on distingue :

- Les canaux utilisés par la parole (Speech Traffic Channel – TCH/S)
- Les canaux utilisés par les données en mode circuit (Data Traffic Channel – TCH/D)

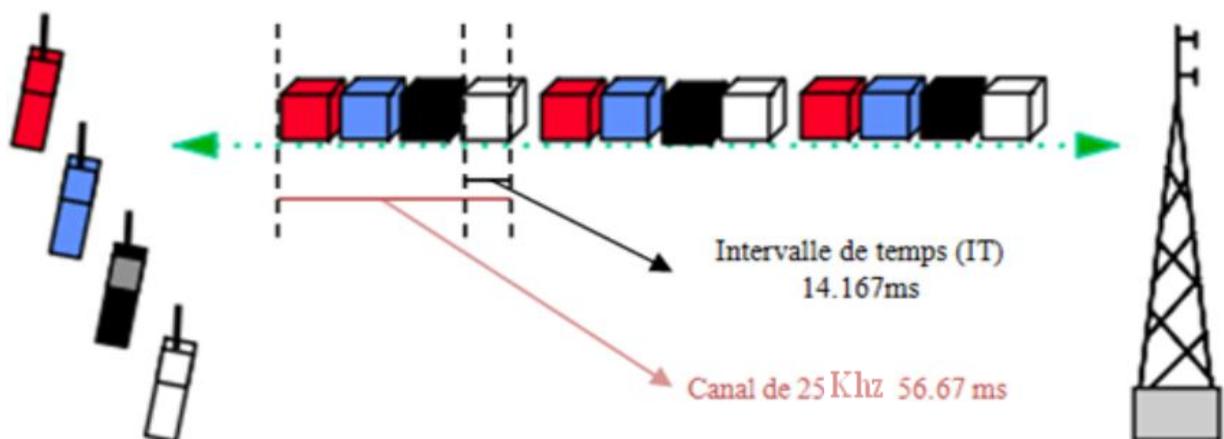


Figure I.9: Structure canal au niveau TETRA

I.3.2.2 La modulation utilisée

TETRA utilise une modulation $\pi/4$ DQPSK qui contient 2 bits par symbole. La vitesse de modulation est de 36 Kbits/s. A chaque transition, le changement de phase est :

- 00 tourne de $+\pi/4$
- 01 tourne de $-\pi/4$
- 10 tourne de $+3\pi/4$
- 11 tourne de $-3\pi/4$

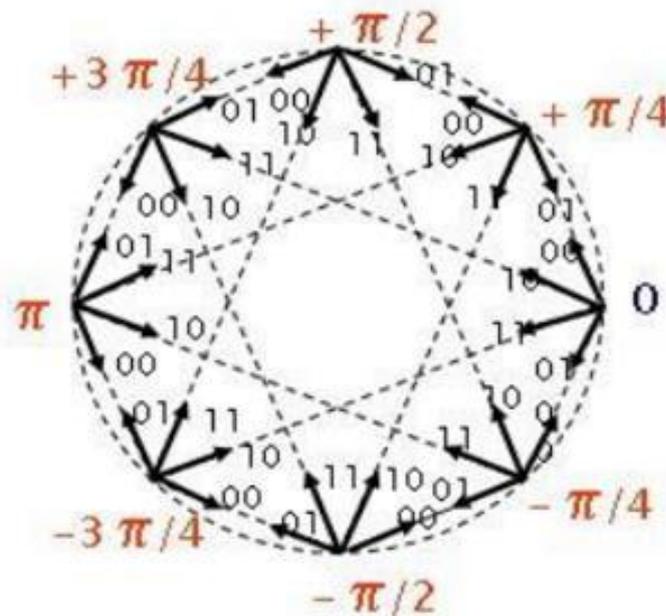


Figure I.10: Constellation modulation $\pi/4$ -DQPSK [2]

Avec une modulation $\pi/4$ -DQPSK, les débits de transmission de TETRA sur n intervalles de temps occupés ($n = 1, 2, 3$ ou 4) pour différents codages sont :

- $n \times 7,2$ kbit/s (transmission non protégée, BER = 2,5%)
- $n \times 4,8$ kbit/s (transmission protégée, BER = 0,4%)
- $n \times 2,4$ kbit/s (transmission hautement protégée, BER = 0,01%)

Les BER (taux d'erreurs binaire) indiquent la sensibilité dynamique du récepteur TETRA dans un environnement donné.

I.3.2.3 Structure des trames

Après numérisation de la phonie, codage, entrelacement et encapsulation, un bloc de 510 bits est formé et va utiliser un slot (ou Intervalle de Temps IT) de la trame TDMA.

- **Le scrambling**

Une fois constituée, la trame est modifiée par un code de scrambling. Les trames de phonie ou de données sont modifiées selon un code de scrambling transmis en début de communication.

Les trames de la voie balise et le mode direct utilisent un code propre au réseau.

Le scrambling n'est pas un moyen de chiffrement, mais un outil de filtrage d'erreurs d'aiguillage.

Le scrambling appliqué à la voie balise et propre à un réseau interdit à un mobile de tenter de s'inscrire sur un réseau qui n'est pas le sien, car il ne pourra pas en reconnaître la voie balise.

Le scrambling appliqué aux trames de phonie ou de données interdit à mobile non concerné par la communication de l'intercepter.

- **Construction de la multiframe**

TETRA définit une multiframe de 18 trames TDMA. Seules les 17 premières transportent des blocs codés, La 18ème trame est réservée pour la signalisation ou la synchronisation des différents équipements. On peut remarquer qu'après modulation, la transmission d'une trame modulée dure 14,167 ms et que les trames relatives à une même communication sont espacées de 56,67 ms, et ceci pour un échantillon initial de 60 ms. La vitesse de modulation est donc plus rapide que la vitesse de codage, ce qui permet de libérer la 18ème trame de la multiframe pour des signalisations en cours de communication, évitant ainsi le vol de trame. C'est grâce à cette 18ème trame que TETRA gère le handover. Les multiframe sont ensuite regroupées en hyperframes de 60 multiframe.

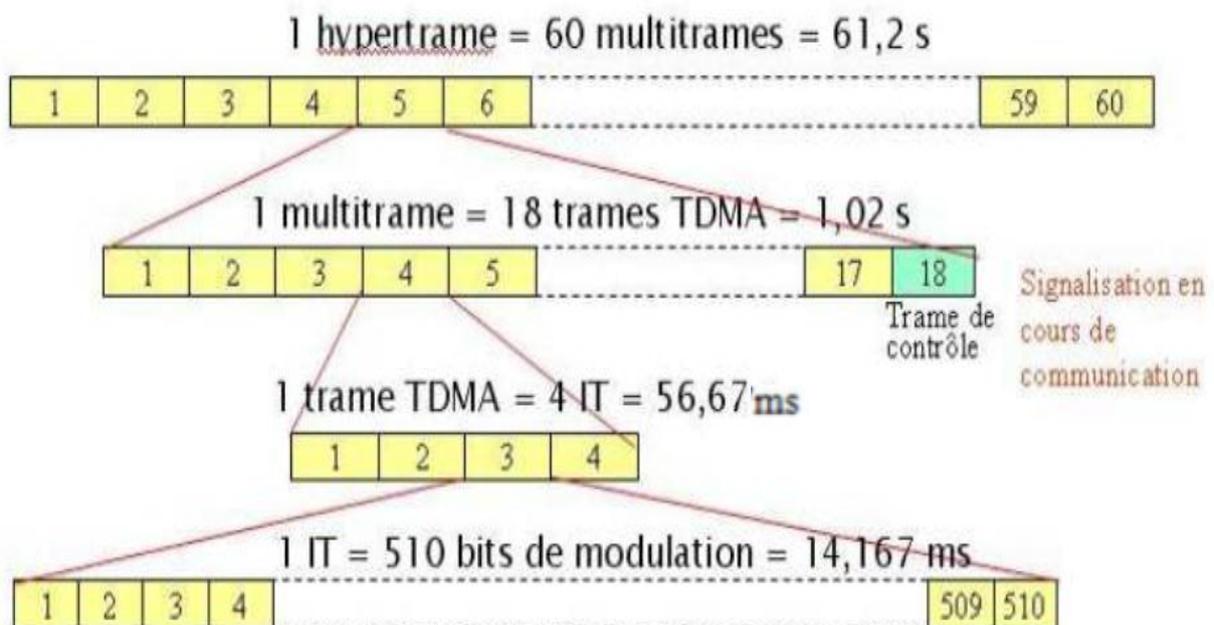


Figure I.11: Construction de la multi-trame [2]

Paramètres	Valeur
Écart entre les canaux	25 kHz
Puissance d'émission de la station de base	25 W
Puissance d'émission de l'installation mobile	1 W, 3 W, 10 W
Sensibilité du récepteur	Station Mobile= -113 dBm Station de Base= -115 dBm
Type d'exploitation	Semi-duplex, duplex
Methode d'accès au canal	TDMA
Modulation	$\pi/4$ -DQPSK
Débit binaire du canal	36 kBit/s
Débit de données maximal non protégé (grand débit)	28,8 kBit/s
Portée	Rurale : autour de 20 km Interurbaine : autour de 5 km

Tableau I.1 : Paramètres radio de la norme TETRA [8]

I.3.2.4 Canaux logiques

Les canaux logiques suivants sont définis:

- un canal commun de control (CCCH – common control channel) se composant des éléments suivants:
 - canal principal de control (MCCH – main control channel),
 - canal étendu de control (ECCH – extended control channel).

Ces canaux traitent les informations de gestion et de commande échangées avec des stations mobiles ne participant pas à une communication en mode circuit;

- un canal associé de control (ACCH – associated control channel) se composant des éléments suivants:
 - canal associé rapide de control (FACCH – fast associated control channel),
 - canal de reprise (STCH – stealing channel),
 - canal associé lent de control (SACCH – slow associated control channel).

Ces canaux traitent les informations de gestion et de commande échangées avec des stations mobiles intervenant dans une communication en mode circuit;

- un canal commun de control de diffusion (BCCH – broadcast common control channel) se composant des éléments suivants:
 - canal de synchronisation de diffusion (BSCH – broadcast synchronization channel),
 - canal de diffusion du réseau (BNCH – broadcast network channel).

Ces canaux acheminent les informations de diffusion en aval;

- des canaux de trafic (TCH – traffic channels) dont:
 - un canal de trafic vocal (TCH/S – speech traffic channel),
 - des canaux de trafic vocal ou de données (TCH/7,2; TCH/4,8; TCH/2,4 – Speech or data traffic channels). Ces canaux transportent les informations de trafic vocal ou de données en mode circuit [9].

Parmi les autres systèmes concurrents à la norme TETRA, notons EDACS (Enhanced Digital Access Communications System) développé par Ericson, TETRAPOL développé par MATRA-COM et la norme américaine APCO25 basée sur la technique FDMA. [10]

Caractéristique	Système Project 25	Système TETRA	Système IDRA	Système DIMRS	Système TETRAPOL	Système EDACS	Système AMSF
Bandes de fréquences (MHz)	130-200 360-512 800-941	380-390/390-400 ou 410-420/420-430 ou 450-460/460-470 ou 870-888/915-933	Actuellement utilisées: 1 453-1 477/1 501-1 525 Utilisation prévue: 905-915/850-860	806-821/851-866	70-520 746-870 870-888/915-933	136-174 380-512 806-821/851-866 896-901/935-940	806-821/ 851-866 896-901/ 935-940
Séparation duplex	Variable ou nulle (bande des 150 MHz) 3 et 5 MHz (bande des 400 MHz) 39 et 45 MHz (bande des 800 MHz)	5-10 MHz (bande des 400 MHz) 10-45 MHz (bande des 800/900 MHz) selon la conception du système	48 MHz (bande des 1,5 GHz) 55 MHz (bande des 800 MHz)	45 MHz (bande des 800 MHz)	Comme nécessaire (bande des 80/160 MHz) 5 ou 10 MHz (bande des 400 MHz) 45 MHz (bande des 900 MHz)	Variable (bande des 160 MHz) Variable (bande des 400 MHz) 45 MHz (bandes des 800 et 900 MHz)	45 MHz (bande des 800 MHz) 39 MHz (bande des 900 MHz)
Espacement des porteuses RF (kHz)	12,5 pour 8K10F1E (MF4C) 6,25 pour 5K76G1E (MDP-4C)	25	25	25	12,5-10 Evolution 6,25	25/12,5	25
Rayon de couverture (Km) – mobile/milieu rural	35	17,5	20-40	40	28	Selon la conception	>50
Méthode d'accès	AMRF	AMRT	AMRT	AMRT	AMRF	AMRF	AMSF (AMRT/AMSF)
Débit de transmission (kbit/s)	9,6	36	64	64	8	9,6	36,9
Modulation	Type MDP-4-c	MDP-4 D (déphasage $\pi/4$)	MAQ-16 M (M = 4)	MAQ-16 M (M = 4)	MDMG	MDFG	MDP-4 S (déphasage $\pi/4$)

MDP-4 C: modulation par déplacement de phase cohérente à 4 états

MF4C: modulation de fréquence à 4 niveaux et à enveloppe constante

MDFG: modulation par déplacement de fréquence avec filtrage gaussien

MDP-4: modulation par quadrature de phase

MDP-4 D: MDP-4 différentielle

MAQ-16 M: modulation d'amplitude en quadrature-16 M

MDMG: modulation par déphasage minimal avec filtrage gaussien

Tableau I.2 : comparaison entre les différents réseaux PMR

I.4 Conclusion

La norme TETRA peut être considérée comme une "boîte à outils", car elle offre aux planificateurs des systèmes de nombreuses possibilités permettant d'adapter le réseau de façon optimale aux besoins des utilisateurs (urgence, industrie, société privé..). La norme ne contient pas d'implémentation spéciale pour la construction du réseau. Les spécifications définissent simplement les interfaces nécessaires pour garantir l'interopérabilité, l'interfonctionnement et la gestion du réseau entre les différents éléments du réseau. En tant que standard ouvert, la norme TETRA est sans cesse vouée à évoluer. Ainsi, pour la version 2 de TETRA, les améliorations porteront principalement sur le débit, qui sera multiplié par 10. Dans ce chapitre, nous avons étudié les caractéristiques de la norme TETRA qui répond à des nouveaux besoins.

2^{em} Chapitre
II- Liaisons FH

II.1 Introduction

Les systèmes radio sont des supports de transmission qui utilisent la propagation des ondes radio électriques pour véhiculer les informations d'un point à un autre, on les appelle généralement faisceaux hertzien **FH**. Dont un faisceau hertzien est un système de transmission numérique ou analogique, entre deux points fixes par ondes électromagnétique de l'espace. Les ondes radio sont transmises en faisceaux sur une fréquence porteuse dans la gamme des micro-ondes (généralement entre 1 et 40 GHz) par le biais d'antennes directives. Les antennes utilisées, le plus souvent des paraboles, ont une directivité élevée. Elles sont installées sur des emplacements convenables afin de couvrir de longues distances (visibilité directe quasi optique). Malgré de grandes largeurs de bande, une bonne directivité des antennes permet une utilisation économe du spectre des fréquences à disposition.

II.2 Historique

La figure ci-dessous dresse l'historique des découvertes et inventions liées aux radiocommunications et aux antennes. Le développement des radiocommunications est basé sur la théorie de l'électromagnétisme, mise au point au XIXe siècle et améliorée au XXe siècle. Les ondes électromagnétiques, support des radiocommunications, ont été prévues de manière théorique dans le cadre des équations de Maxwell et mises en évidence expérimentalement par Hertz à la fin du XIXe siècle. Peu de temps après, les premières applications de transmission radio sont apparues. Le XXe siècle est ensuite ponctué d'innovations majeures, qui répondaient à des besoins précis. Aujourd'hui, le monde est couvert par un réseau d'antennes qui permettent des communications pouvant relier les différents continents. Le domaine d'application de la propagation radio s'est élargi à la transmission des données météorologiques, des données GPS, etc. [11]

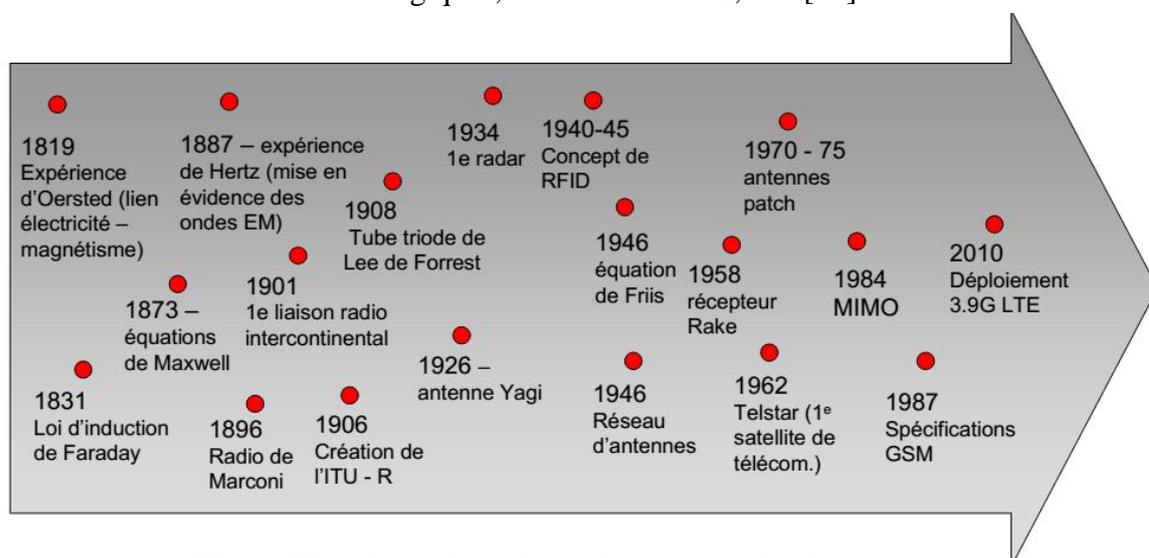


Figure II.1 : Historique des radios communications [11]

II.3 Les supports de transmission

Dans les télécommunications, on distingue actuellement trois grandes familles de supports de transmission de l'information numérique :

- Les liaisons filaires.
- Les liaisons hertziennes.
- Les liaisons optiques.

Il existe deux types de liaisons optiques :

- liaison par fibre optique (optique guidée).
- liaison optique en espace libre (exemple : liaison infrarouge télécommande-téléviseur).

Nous n'étudierons en détail dans ce chapitre que les liaisons hertziennes, car notre interconnexion se fera par faisceaux hertziens [12].

II.4 Faisceaux hertziens

Ce type de liaisons radio point à point (actuellement numériques) est utilisé pour des liaisons voix et données. Il utilise comme support les ondes radioélectriques, avec des fréquences porteuses de 1 GHz à 40 GHz très fortement concentrées à l'aide d'antennes directives. Ces ondes sont sensibles aux masquages (relief, végétation, bâtiments...), aux précipitations, aux conditions de réfractivité de l'atmosphère et présentent une sensibilité assez forte aux phénomènes de réflexion. [13] Cependant les bilans de liaison réalisés préalablement permettent de réaliser des études de faisabilité et d'établir des liens avec des taux d'indisponibilité extrêmement faibles. Les domaines d'applications sont multiples : Raccordement d'abonnés en zone rurale, déport de relais radio GSM, déport de relais radio publiques (Gendarmerie, Pompiers, Police, Armées). [14]

II.4.1 Schéma de principe d'une liaison hertzienne

Le système de transmission par faisceaux hertziens est constitué par :

- Des stations terminales utilisant les émetteurs et des récepteurs dirigeant dans le même sens.
- Des stations relais : utilisant les émetteurs et les récepteurs dans le sens contraire [14].

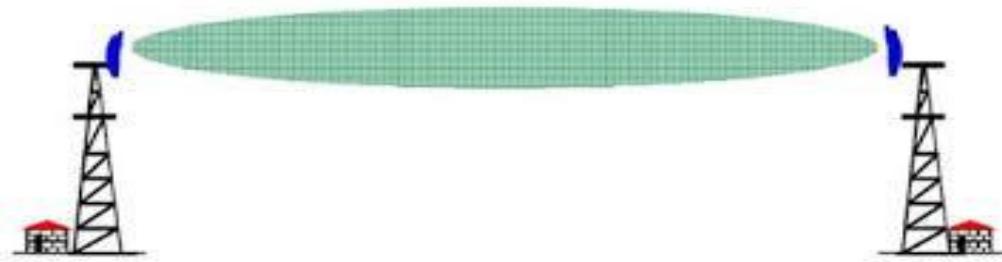


Figure II.2 : Constitution d'une liaison hertzienne [14]

II.4.2 Condition de bon fonctionnement d'une liaison hertzienne

Le bon fonctionnement des liaisons FH est conditionné par les caractéristiques des bonds radioélectriques entre les stations et par celle des antennes utilisées. Ces bonds en visibilité directe donc dégagées de tout obstacle et avec des réflexions, des phénomènes de réfraction et de diffraction négligeables. On peut classer les FH en deux catégories :

1. Les FH analogiques utilisés principalement pour :
 - La transmission des multiplex analogiques dont la capacité va de quelque voie téléphonique à 2700 voies téléphoniques.
 - La transmission des images TV, et des voies de sons qui leur associées et aussi d'autres signaux tels que les données.
2. Les FH numériques qui acheminent principalement :
 - Des multiplex numériques dont les débits vont de 2Mbit/s à 140 Mbit/s.
 - Des données à grande vitesse.
 - Le visiophone.
 - La télévision codée, etc.

II.4.3 Caractéristiques d'une liaison de transmission par faisceau hertzien

Les faisceaux hertziens présentent certaines caractéristiques :

- La sécurité : la liaison par faisceau hertzien doit donner une sécurité, c'est ainsi qu'on l'équipe de station avec des matériels radios de très grandes fiabilité c'est-à-dire de très haute fréquence et on utilise des antennes extrêmement directives à des gains qui peuvent atteindre plusieurs dizaines de dB ;
- Duplex : la transmission se fait dans les deux sens (bilatérales, elles doivent se faire simultanée, donc elle suppose l'emploi de deux fréquences distinctes dans les deux sens
- Une succession des stations relais ayant pour chaque sens de transmission des émetteurs, des récepteurs et des antennes ;

- Un rapport signal bruit(S/B) élevé ;
- Le réglage se fait à l'aide des appareils de mesure appropriés avec une procédure bien établie [14].

II.4.4 Les fréquences porteuses qui sont utilisées dans le faisceau hertzien

Les faisceaux hertziens utilisent des fréquences supérieures à 1,5 GHz (ondes centimétriques). Et entre 2 et 11 GHz, l'établissement des liaisons ne pose pas des problèmes majeurs (conditions de propagation), mais au-delà de 11 GHz, il faut tenir compte de l'absorption par les hydrométéores. Cette absorption croît avec la fréquence et devient très importante aux alentours de 22GHz. Ce qui limite les fréquences porteuses à 21 GHz mais certaines bandes des fréquences généralement comprises entre 2 et 1,5 GHz. Cette large gamme de fréquence est subdivisée en plusieurs parties appelées bande de fréquence. Sur la base des éléments présentés ci-dessus, on peut classer les bandes de fréquences en trois catégories : [15]

II.4.4.1 Les bandes basses (inférieures à 15 GHz), adaptées aux liaisons « longue distance »

Ce phénomène concerne plus particulièrement les bandes de fréquences 6 GHz et 13 GHz particulièrement utilisées pour le réseau cœur des opérateurs mobiles. La bande 8 GHz a constitué la bande cible des liaisons de transport audiovisuel dans le cadre du passage au tout numérique de la diffusion télévisuelle; elle est également la bande privilégiée pour le transport audiovisuel radiophonique. Enfin, la bande 1,5 GHz est utilisée par les opérateurs de réseaux indépendants pour leurs besoins de connectivité à bas débit et par les opérateurs de réseaux ouverts au public (ROP) pour le raccordement d'abonnés isolés ou de stations radioélectriques éloignées. Elle est caractérisée par sa faible capacité, adaptée uniquement à des liaisons de très bas débit.

II.4.4.2 Les bandes hautes (supérieures à 23GHz), adaptées à des liaisons de « courte distance »

Avec la bande 23 GHz, la bande 38 GHz accueille le plus grand nombre de faisceaux hertziens (environ 50% du nombre total de liaisons se fait dans ces deux bandes de fréquences); elle offre néanmoins encore une capacité disponible importante. La bande 38 GHz est majoritairement utilisée par les opérateurs mobiles de ROP notamment pour la mise en œuvre de leurs réseaux capillaires et, dans une moindre mesure, par les opérateurs de RI. La bande 26 GHz est utilisée à la marge par les opérateurs de RI et pour les réseaux de

collecte des réseaux mobiles. La bande 70/80 GHz, ouverte récemment, est aujourd'hui quasi inutilisée (deux liaisons).

II.4.5 Avantages et inconvénients d'une liaison hertzienne

II.4.5.1 Avantages

L'intérêt principal des liaisons hertziennes est qu'elles ne nécessitent pas de support physique entre l'émetteur et le récepteur de l'information. C'est le moyen de communication idéal pour les liaisons avec les objets mobiles: piétons, automobiles, bateaux, trains, avions, fusées, satellites, etc... Les liaisons hertziennes sont intéressantes dans le cas de la diffusion (radio diffusion et télédiffusion), où l'on a un émetteur et plusieurs récepteurs. En effet pour couvrir une ville, il est plus simple et moins cher d'installer un émetteur et une antenne chez chaque particulier, plutôt que de relier par câble chaque particulier !

II.4.5.2 Inconvénients:

Les inconvénients principaux des liaisons hertziennes (par rapport aux autres supports) sont aussi liés à l'absence de support physique : Comment faire pour que tout le monde puisse communiquer en même temps ?

Ce problème n'existe pas par rapport à une liaison filaire : chacun son câble ! Dans le cas des liaisons hertziennes, ceci impose une gestion stricte des fréquences : Chaque système de transmission radio dispose d'une certaine bande de fréquence qui lui est allouée.

Comment garantir la confidentialité de transmission entre l'émetteur et le récepteur ?

N'importe quel « espion » peut intercepter une communication puisque l'information est transmise en « espace libre ».

Cet inconvénient est corrigé par l'utilisation de cryptage de l'information entre l'émetteur et le récepteur. Internet : Liaison Wi-Fi (réseau Internet sans fil à l'intérieur d'une maison ou d'une petite entreprise).

II.5 Techniques de modulation FH

Les équipements radio analogiques et numériques sont différents fondamentalement par le type de modulation qu'ils utilisent. Pendant que les FHA utilisent la modulation de fréquence, les FHN utilisent les modulations par sauts de phase ou multi états (multi niveaux) ou modulation sur fréquence porteuse [16].

II.5.1 Principe général de la modulation

L'objet de tous les efforts de modulation est de permettre à une puissante porteuse d'émettre par voie aérienne des informations utiles. Quel que soit le procédé utilisé, ces trois étapes sont incontournables :

- Génération d'une porteuse pure au niveau de l'émetteur,
- Modulation de cette porteuse par les informations à transmettre
- Détection et démodulation de signal au niveau du récepteur, pour récupérer l'information

La dégradation du signal impulsionnel de la bande de base est rapide, la distance franchissable est limitée à quelques km. Le signal sinusoïdal est plus résistant, d'où l'idée de substituer au signal Impulsionnel, un signal sinusoïdal et de modifier l'un de ses paramètres en fonction du signal d'origine : c'est la modulation. On module une porteuse dont la fréquence est beaucoup plus élevée que le message à transmettre. Cette nouvelle fréquence est plus favorable à la transmission. Un signal sinusoïdal est de la forme :

$$S(t) = (w_0 t + \varphi_0) \text{ avec } w_0 = 2\pi f_0 \dots\dots\dots(\text{II.1})$$

Un grand nombre de méthodes différentes permettent de moduler un signal, mais seuls trois éléments de base du signal sont modifiables dans le temps :

- l'amplitude A , c'est la modulation d'amplitude (AM) ;
- la fréquence f_0 , c'est la modulation de fréquence (FM) ;
- la phase φ_0 , c'est la modulation de phase (PM).

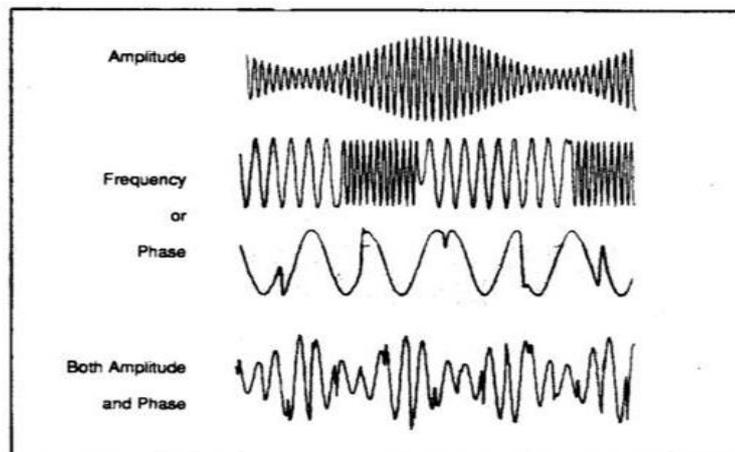


Figure II.3 : Différents types de modulations [16]

En modulation d'amplitude (AM), c'est l'amplitude du signal d'une porteuse haute fréquence qui est modifiée, proportionnellement à l'amplitude instantanée du signal du message à transmettre. En modulation de fréquence (FM), l'amplitude de la porteuse est maintenue à une valeur constante, tandis que sa fréquence est modifiée par le signal du message à transmettre. On peut moduler l'amplitude et la phase simultanément et séparément, mais ce procédé est difficile à générer et particulièrement difficile à détecter. Par conséquent, dans les systèmes réalisés en pratique, le signal est dissocié en une autre série de composantes indépendantes :

I (phase) et Q (quadrature). Les équipements radio analogiques et numériques sont différents fondamentalement par le type de modulations qu'ils utilisent. Pendant que les FHA utilisent la modulation de fréquence, Les FHN utilisent les modulations par sauts de phase ou multi niveaux ou modulation sur fréquence porteuse.

II.5.2 Modulations analogiques en faisceaux hertziens

En modulation d'amplitude, l'information utile est véhiculée par l'amplitude du signal porteur. Or en réception, les éléments traversés par le signal présentent parfois des non linéarités en amplitude, ce qui altère la qualité du signal après démodulation. La propagation de la porteuse dans l'atmosphère entraîne des variations du niveau de réception d'où après la démodulation, le signal présente des parasites. En tenant compte de ces phénomènes, le choix s'est porté sur la modulation de fréquence pour les FHA car cette modulation ne présente pas les défauts ci-dessus cités et en plus les modulations et démodulations de fréquence sont de réalisations plus faciles

II.5.3 Modulation numérique en faisceau hertzien

Les systèmes de transmission numérique véhiculent de l'information entre une source et un destinataire en utilisant un support physique comme le câble, la fibre optique ou encore, la propagation sur un canal radioélectrique. Les signaux transportés peuvent être soit directement d'origine numérique, comme dans les réseaux de données, soit d'origine analogique (parole, image...) mais convertis sous une forme numérique. La tâche du système de transmission est d'acheminer l'information de la source vers le destinataire avec le plus de fiabilité possible.

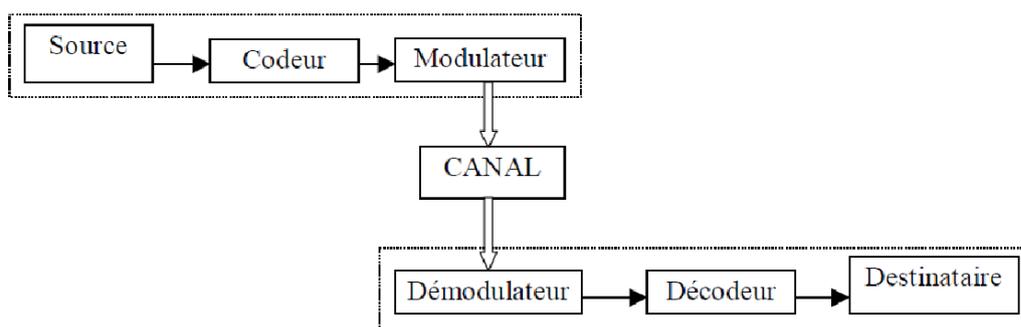


Figure II.4 : Schéma d'un système de transmission numérique.

Les ondes radio sont des ondes sinusoïdales. Les modulations possibles sont des modulations d'amplitude, de fréquence et de phase. Etant donné que les signaux à transmettre sont de signaux numériques, ils ne peuvent prendre que quelques états possibles, ce qui permet d'utiliser des techniques optimales de modulation et de démodulation [17].

L'opération de modulation a pour objet de fournir à chaque niveau du signal un état d'amplitude, de fréquence ou de phase d'une onde porteuse sinusoïdale. L'encombrement spectral autour d'une fréquence porteuse après modulation dépend du débit d'informations à transmettre et du type de modulation choisi. La transmission des signaux dans le domaine de télécommunication utilise deux types de modulation :

- Modulation de phase QPSK (**Q**uadrature **P**hase **S**hift **K**eying) pour la technologie PDH.
- Modulation QAM pour la technologie SDH.

✚ Un symbole est un élément d'un alphabet. Si M est la taille de l'alphabet, le symbole est alors dit M -aire. Lorsque $M=2$, le symbole est dit binaire. En groupant, sous forme d'un bloc, n symboles binaires indépendants, on obtient un alphabet de

$M = 2^n$ symboles M -aires. Ainsi un symbole M -aire véhicule l'équivalent de

$$n = \log_2 M \text{ bits} .$$

✚ La rapidité de modulation R se définit comme étant le nombre de changements d'états par seconde d'un ou de plusieurs paramètres modifiés simultanément. Un changement de phase du signal porteur, une excursion de fréquence ou une variation d'amplitude sont par définition des changements d'états. La "rapidité de modulation"

$$R = \frac{1}{T} \quad \text{S'exprime en "bauds"}$$

✚ Le débit binaire D se définit comme étant le nombre de bits transmis par seconde.

Il sera égal ou supérieur à la rapidité de modulation selon qu'un changement d'état représentera un bit ou un groupement de bits. Le "débit binaire" $D = \frac{1}{T_b}$ s'exprime en

"bits par seconde".

✚ taux d'erreur par bit.

$$T.E.B = \frac{\text{nombre de bits faux}}{\text{nombre de bits transmis}} \dots\dots\dots(\text{II.2})$$

L'efficacité spectrale d'une modulation se définit par le paramètre $h = \frac{D}{B}$ s'exprime en

"bit/seconde/Hz".

D : débit binaire.

B : la largeur de la bande occupée par le signal modulé.

II.5.3.1 Modulation QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)

En modulation QPSK, le transport de l'information binaire s'effectue en modifiant la phase et l'amplitude d'un signal sinusoïdal, d'un angle de 0° , 90° , 180° ou 270° .

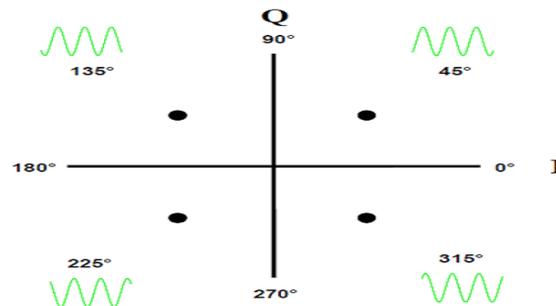


Figure II.5 : Distribution des composantes de modulation QPSK [17]

II.5.3.2 Modulation QAM

Les modulations Amplitudes-phase couplent les principes de modulation d'amplitude ASK (Amplitude Shift Keying) et de phase PSK (Phase Shift Keying).

4-QAM : ce type de modulation est identique à une QPSK, il s'agit d'une 4-QAM, en pratique on ne distingue pas ces deux modulations et on parle exclusivement de QPSK [17].

Cas général : modulation à 2^{2k} états (2^{2k} - QAM)

Pour transmettre 2Kbits pendant une période :

- ✓ 8-QAM,
- ✓ 16-QAM,
- ✓ 64-QAM,
- ✓ 128-QAM,

Modulation à 4 états : (4-QAM) : utilisation de 2 amplitudes et de 2 phases :

Bits à transmettre	00	01	10	11
Phase	0	$\pi/2$	0	$\pi/2$
Amplitude	E	E	-E	-E
Signal transmis	$E \sin 2 \pi f_0 t$	$E \cos 2 \pi f_0 t$	$-E \sin 2 \pi f_0 t$	$-E \cos 2 \pi f_0 t$

Tableau II.1: Modulation 4-QAM

II.6 La propagation des ondes électromagnétiques

II.6.1 Rappel sur les ondes [12]

Dans une liaison hertzienne, c'est une onde électromagnétique qui « porte » l'information à transmettre. Une onde électromagnétique est constituée d'un champ électrique E et d'un champ magnétique 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.

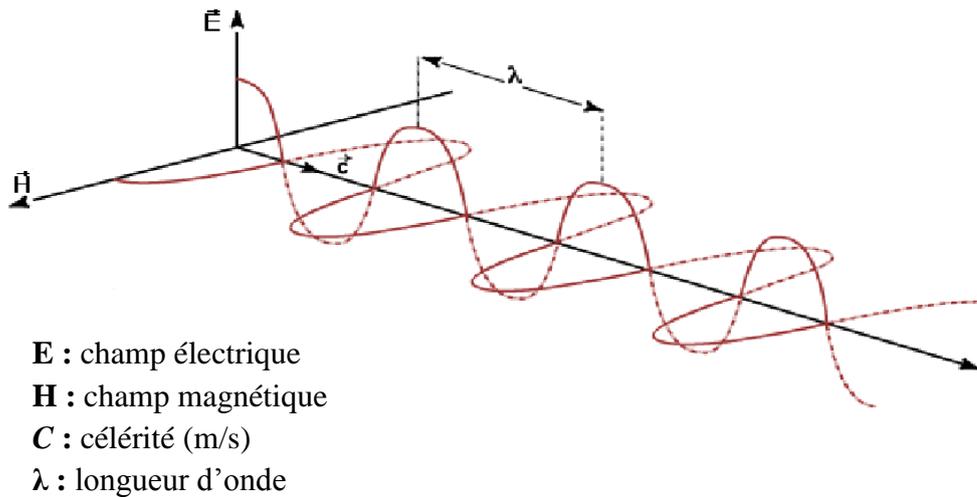


Figure II.6 : Propagation d'une onde électromagnétique. [18]

II.6.2 Caractéristiques d'une onde électromagnétique

Les caractéristiques principales d'une onde électromagnétique sont:

- **La polarisation** : C'est l'orientation du champ électrique par rapport à l'horizontale.

Si le champ E est parallèle à l'horizontale, on dit que l'onde a une polarisation horizontale.

Si le champ E est perpendiculaire à l'horizontale, on dit que l'onde a une polarisation verticale. Dans le cas général (angle quelconque du champ E), on a alors une composante horizontale et une composante verticale.

Remarque : Certaines antennes génèrent des ondes qui ont une polarisation circulaire ou elliptique : la polarisation varie au cours de la propagation. Cette notion sera revue plus loin, lors de l'étude des antennes

- **La vitesse de propagation** : Dans le vide, une onde électromagnétique se propage à la vitesse de la lumière $C = 3.10^8$ m/s.

- **La fréquence** : Étudiées sous leur aspect vibratoires, les ondes électromagnétiques sont caractérisées par leur fréquence (f : Hz) ou leur longueur d'onde (λ : m).

La fréquence d'une onde électromagnétique est le nombre de ses vibrations par seconde.

En même temps qu'elle vibre, l'onde se déplace à la vitesse de la lumière ($C=3.10^8$ m/s), sa longueur d'onde (λ) est la distance qu'elle parcourt pendant une vibration. Ces deux grandeurs sont liées entre elles par la relation suivante.

$$\lambda = \frac{c}{f} \dots\dots\dots(\text{II.3})$$

- **Puissance de rayonnement d'une onde** : L'onde électromagnétique est une forme d'énergie, l'énergie de rayonnement qui est d'autant plus les intensités des champs électriques et magnétiques sont grandes. L'expérience montre qu'une source d'onde « S », de puissance de rayonnement P_t émettant uniformément dans toutes les directions de l'espace, distribuera à une distance r une densité de puissance P_r telle que :

$$P_r = \frac{P_t}{4.\pi.r^2} \dots\dots\dots(\text{II.4})$$

- **Polarisation d'une onde** : Les ondes électromagnétiques sont polarisées en ce sens que, dans un milieu donné, les oscillations des champs électrique et magnétique se produisent chacune dans un plan déterminé. La polarisation d'une onde est le plan le quel varie le champ électrique.

II.6.3 Le trajet multiple des ondes électromagnétiques

Le multipath ou multi-trajet, en télécommunications sans fil, est un phénomène qui se produit lorsqu'un signal radio se propage par plusieurs chemins et est reçu sur une antenne. Et les causes de l'atténuation multi-trajet sont la réflexion sur l'ionosphère, réfraction, réflexion et diffraction par les obstacles naturels ou des bâtiments.

Réflexion : Lors d'un changement de milieu de propagation, une partie de l'onde électromagnétique repart vers le milieu d'origine, c'est la réflexion, et le meilleur cas le plus connu est le miroir (concerne les rayons X et les ondes radio).

Réfraction : Lors d'un changement de milieu de propagation, si le second milieu est transparent pour l'onde, celle-ci se propage au travers mais avec une direction différente. Cela concerne la lumière (lentille optique) et aussi les ondes radio.

Diffusion : Lorsqu'une onde rencontre un atome, elle se diffuse sur celui-ci, elle change de direction. On distingue la **diffusion Rayleigh**, dite « diffusion électronique », au cours de laquelle l'onde ne change pas de longueur d'onde, la **diffusion Roman** qui est une diffusion électronique avec diminution ou augmentation de longueur d'onde, et la **diffusion Compton**

dans le cas des rayons X diffusant sur des atomes légers, au cours de laquelle la longueur d'onde augmente.

Interférence : Les ondes électromagnétiques peuvent interférer entre elles, dans le cas de radiocommunication, cela provoque un parasitage du signal.

Diffraction : est le comportement des ondes lorsqu'elle rencontre un obstacle ou une ouverture ; le phénomène peut être interprété par la diffusion d'une onde par les points de l'objet.

II.6.4 Propagation dans l'environnement

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.

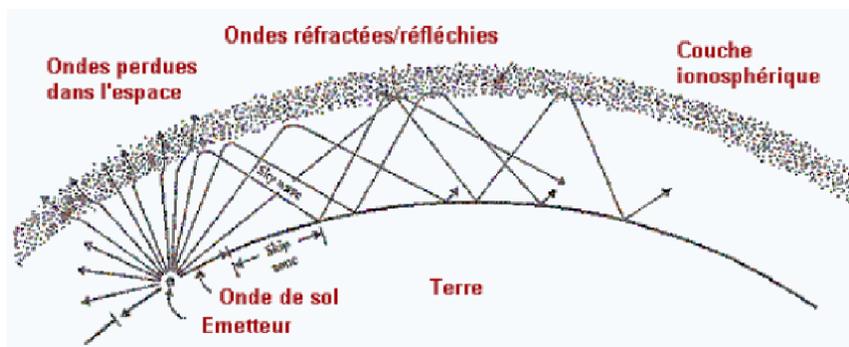


Figure II.7 : Propagation d'onde dans l'environnement [19].

La réflexion peut se faire sur la terre, sur la mer, mais parfois aussi sur les hautes couches de l'atmosphère (ionosphère). L'onde directe est celle qui parcourt le chemin le plus court (la ligne droite). L'onde réfléchie parcourt toujours une distance plus importante que l'onde directe. Les deux ondes arrivent donc déphasées au récepteur. Si le déphasage est de 180° et les amplitudes égales, les deux ondes se soustraient et la puissance reçue est nulle ! Dans le cas d'une réflexion sur le sol ou sur la mer, le niveau du signal reçu sera plus ou moins important en fonction de la fréquence d'émission et de la nature du sol car le sol ou la mer sont plus ou moins conducteurs selon la fréquence du signal. Dans le cas de réflexion sur les couches de l'ionosphère, la réflexion dépend toujours de la fréquence, mais aussi du cycle solaire, de la saison, de l'heure du jour, du champ magnétique terrestre, et de beaucoup d'autres facteurs.

Les principaux modes de propagation en fonction de la fréquence :

- Entre 3 KHz et 3 MHz : la propagation se fait par onde de sol. C'est le cas des grandes ondes.
- Entre 3 MHz et 30 MHz : la propagation se fait par réflexion sur l'ionosphère mais l'onde de sol et l'onde directe existent aussi. La propagation dépend de beaucoup de facteurs. C'est le domaine des ondes courtes.
- Entre 30 MHz et 3 GHz : la propagation se fait par onde directe mais aussi par réflexion sur le sol (trajets multiples). C'est le cas de la télévision terrestre, du téléphone mobile.
- Entre 3 GHz et 30 GHz : la propagation se fait par onde directe, il y a peu de réflexions sur le sol car les antennes sont très directives (paraboles). C'est le cas des faisceaux hertziens et de la télévision par satellite.

II.6.5 Propagation en visibilité

La présence de la terre et de l'atmosphère apporte diverses physiques :

La réflexion, la diffraction, la réfraction, l'absorption que va subir le signal sur l'obstacle. Ces phénomènes peuvent perturber notablement la propagation en espace libre dans certaines circonstances. Ils peuvent également modifier profondément le champ calculé en espace libre. Pour déterminer si la propagation se fait dans des conditions de propagation en visibilité ou non, il convient de considérer les Ellipsoïdes de Fresnel 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. On dit qu'une liaison est en visibilité si les phénomènes de diffraction par les obstacles éventuels situés au voisinage du trajet ont une influence négligeable sur le niveau de réception. Pour cela, il suffit qu'il n'existe aucun obstacle dans le Premier Ellipsoïde de Fresnel ayant pour foyer les antennes d'émission et de réception.

II.6.6 Propagation en non visibilité

On dit qu'une liaison est considérée non-visibilité lorsque le **Premier Ellipsoïde de Fresnel** n'est pas du tout dégagé. Ce cas se présente, lorsque l'une des extrémités de la liaison est par de là de l'horizon, de l'autre extrémité où les liaisons sont réalisées avec des ondes décimétriques. Dans ce cas, le signal va subir les phénomènes de réflexion, d'absorption, de diffraction sur l'obstacle. Plus le milieu de propagation comprend d'obstacles, plus l'exposant d'atténuation va être élevé et l'atténuation de l'onde en fonction de la distance sera d'autant plus importante.

II.7 Antennes

II.7.1 Définition d'une antenne

L'antenne est un transformateur d'énergie :

A l'**émission** elle transforme une énergie électrique fournie par un générateur en énergie électromagnétique en tout point de l'espace. En particulier, il est intéressant de connaître cette énergie très loin de l'antenne d'émission.

A la **réception** l'antenne transforme l'énergie électromagnétique caractérisée par le champ électromagnétique autour d'elle en énergie électrique. Il y a réciprocité entre le comportement d'une antenne à l'émission et celui à la réception. Cela veut dire principalement que les caractéristiques d'une antenne à la réception peuvent se déduire de celle d'une antenne à l'émission et réciproquement. L'antenne étant un système résonant (onde stationnaire), il faut faire en sorte que l'impédance qu'elle ramène face à la ligne (son impédance d'entrée) soit adaptée à celle-ci. La ligne est alors en onde progressive, toute la puissance est transmise à l'antenne. L'antenne sert alors de transformateur d'impédance entre l'espace libre et la ligne de transmission. La puissance rayonnée ne dépend que de la puissance acceptée et des pertes de l'antenne. [10]

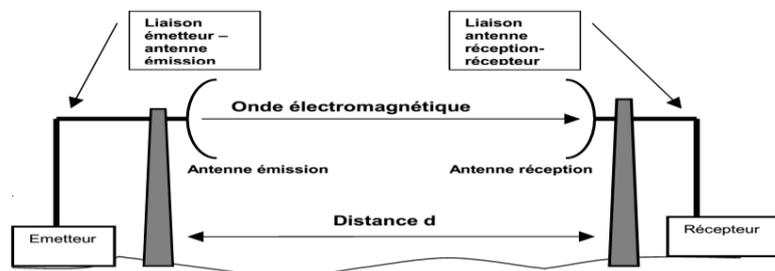


Figure II.8 : Représentation d'une liaison entre deux antennes [20]

II.7.2 Les caractéristiques principales d'une antenne

Pour une antenne il y a deux grandes catégories de caractéristiques qui sont soit à mesurer ou à calculer :

II.7.2.1 Les caractéristiques d'adaptation

Pour rayonner de l'énergie l'antenne doit d'abord en avoir accepté le maximum du générateur dans toute la bande de fréquence utile. L'antenne est alors un dipôle électrique (au sens des circuits) qui doit être adapté au générateur. [21]

II.7.2.2 Les caractéristiques de rayonnement

Lorsque l'antenne a accepté l'énergie du générateur, elle doit la rayonner aux pertes près. La façon de rayonner cette énergie dépend de la valeur des courants induits sur l'antenne. L'antenne devra avoir la capacité de concentrer l'énergie dans des directions voulues. Par exemple pour une liaison point - point, l'antenne devra être très directive ; par contre pour une liaison point - multipoint elle sera de préférence omnidirectionnelle en azimut pour arroser uniformément toutes les antennes réceptrices situées autour d'elles.

Le champ électromagnétique émis à grande distance est donc caractéristique par son amplitude de l'énergie envoyée dans chaque direction par l'antenne. Sa phase donnera des renseignements supplémentaires sur les interférences possibles, mais une caractéristique importante est sa polarisation, c'est-à-dire la façon dont est orienté dans l'espace le champ électromagnétique. [2]

II.7.3 Diagramme de Rayonnement

La répartition dans l'espace de l'énergie rayonnée ou reçue est caractérisée par le diagramme de rayonnement de l'antenne. Les antennes sont rarement omnidirectionnelles et émettent ou reçoivent dans des directions Privilégiées. Le diagramme de rayonnement représente les variations de la puissance rayonnée par l'antenne dans les différentes directions de l'espace. Il indique les directions de l'espace (θ_0, φ_0) dans lesquelles la puissance rayonnée est maximale. Il est important de noter que le diagramme de rayonnement n'a de sens que si l'onde est sphérique. On trace dans le diagramme de rayonnement la fonction caractéristique de rayonnement $r(\theta, \varphi)$ qui varie entre 0 et 1 selon la direction. Celui-ci peut se représenter sous différentes formes comme la figure 3.3 nous montre. En général, le diagramme de rayonnement d'une antenne est représenté dans les plans horizontaux ($\theta = 90^\circ$) et verticaux ($\varphi = \text{constante}$), ou bien dans les plans E et H [23].

$$\Gamma(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_0(\theta_0, \varphi_0)} \dots \dots \dots (II.5)$$

Avec :

$P(\theta, \varphi)$: Puissance rayonnée dans une direction quelconque.

$P_0(\theta_0, \varphi_0)$: Puissance rayonnée maximale.

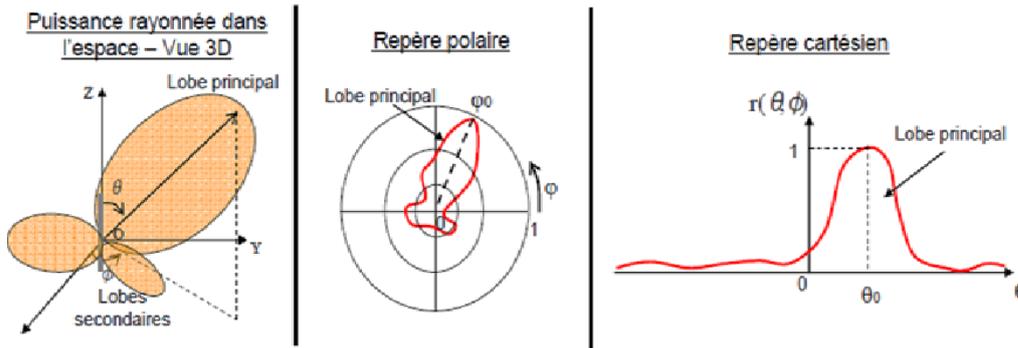


Figure II.9 : Représentation du diagramme de rayonnement d’une antenne [22].

Le diagramme de rayonnement d’une antenne est principalement relié à sa géométrie mais peut aussi varier avec la fréquence. Hormis les antennes omnidirectionnelles, les antennes ne rayonnent pas la puissance de manière uniforme dans l’espace. Dans ce cas, la fonction caractéristique de rayonnement est égale à 1 quel que soit la direction considérée. En général, la puissance est concentrée dans un ou plusieurs « lobes ». Le lobe principal correspond à la direction privilégiée de rayonnement. Les lobes secondaires sont généralement des lobes parasites.

Dans ces directions, l’énergie rayonnée est perdue donc on cherche à les atténuer [22].

II.7.4 Directivité, gain et rendement d’une antenne

Ces 3 grandeurs permettent de caractériser la façon dont une antenne convertit la puissance électrique incidente en puissance électromagnétique rayonnée dans une direction particulière. Le gain et la directivité permettent de comparer les performances d’une antenne par rapport à l’antenne de référence qui est l’antenne isotrope. [22]

II.7.4.1 Gain

Le gain $G(\theta, \varphi)$ d’une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée $P(\theta, \varphi)$ sur la puissance que rayonnerait une antenne isotrope sans pertes. En général, le gain G correspond au gain dans la direction de rayonnement maximal (θ_0, φ_0) . Cette propriété caractérise la capacité d’une antenne à focaliser la puissance rayonnée dans une direction [22]. Si l’antenne est omnidirectionnelle et sans pertes, son gain vaut 1 ou 0 dB. Le gain est généralement exprimé en dB ou en dB_i car une antenne isotrope est utilisée comme référence. On trouve aussi parfois le gain exprimé en dB_d , lorsqu’une antenne dipôle est utilisée comme référence.

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_E} \quad \Rightarrow \quad G = 4\pi \frac{P(\theta_0, \varphi_0)}{P_E} \dots\dots\dots (II.6)$$

II.7.4.2 Directivité

La directivité $D(\theta, \varphi)$ d'une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée $P(\theta, \varphi)$ et la puissance que rayonnerait une antenne isotrope. [23]

$$D(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{\frac{P_R}{4\pi}} = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_R} \dots \dots \dots (II.7)$$

II.7.4.3 Rendement

Le rendement η d'une antenne traduit sa capacité à transmettre la puissance électrique en entrée P_E sous forme de puissance rayonnée P_R . On le définit comme le rapport entre la puissance totale rayonnée par une antenne et la puissance qui lui est fournie. Le rendement est lié aux pertes dans le réseau de polarisation et dans les éléments rayonnants. [21]

$$P_R = \eta \cdot P_E \quad \Leftrightarrow \quad G = \eta \cdot D \dots \dots \dots (II.8)$$

II.8 Puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE)

La puissance isotrope rayonnée équivalente d'une antenne (PIRE ou EIRP en anglais) est un terme souvent utilisé en télécommunications (principalement dans les bilans de liaison) qui définit, dans la direction de rayonnement maximal, la puissance électrique qu'il faudrait apporter à une antenne isotrope pour obtenir la même puissance rayonnée dans cette direction [20] :

$$PIRE = G_E \cdot P_E \dots \dots \dots (II.9)$$

II.9 Conclusion

Nous avons dans ce chapitre présenté une généralité sur les faisceaux hertziens et son importance dans la transmission, ces nouvelles générations d'équipements assurent une meilleure qualité de service et une plus grande convivialité à moindre coût. Il devient possible d'utiliser des systèmes présentant un bon rapport coût-efficacité dans des bandes de fréquences de plus en plus élevées.

3^{ème} Chapitre

*III-Etude Et Simulation D'une Liaison
FH Entre BLIDA Et Chéra*

III.1 Introduction

L'étude des liaisons hertziennes avant leurs installations est une étape très importante et primordiale dans la réalisation d'un réseau de transmission. Elle permet d'apporter une vision concrète et assez détaillée de ce que va donner la liaison hertzienne en situation réelle d'exploitation.

Dans ce travail, on va utiliser un outil de simulation très puissant et connu appelé « **Pathloss 5.1** » qui permet de simuler, planifié, optimiser des liens de transmission avant leur réalisation, en tenant compte de tous les effets, dont parle la recommandation de l'UIT (**UIT-R P.530-17**), affectants le fonctionnement des faisceaux hertziens. En suit on va donner un aperçu sur la norme en vigueur, étudier et dimensionner une liaison FH entre deux sites de la wilaya de Blida, véhiculant le trafic de plusieurs stations de bases TETRA vers MSO de Blida.

III.2 Recommandation UIT-R P.530-17

La Recommandation UIT-R P.530-17 contient des méthodes de prévision des effets de propagation dont il convient de tenir compte pour concevoir des liaisons numériques fixes en visibilité directe, à la fois par temps clair et par temps de pluie. Elle contient aussi des indications sur la conception des liaisons sous la forme de procédures claires en plusieurs étapes, des techniques de limitation des brouillages étant utilisées afin de minimaliser les dégradations de la propagation. La prévision finale des interruptions sert de base à d'autres Recommandations relatives aux caractéristiques d'erreur et à la disponibilité. L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT, considérant:

- a) - que, pour planifier convenablement les faisceaux hertziens à visibilité directe de Terre, il est nécessaire que l'on dispose de méthodes de prévision et de données appropriées en matière de propagation;
- b) - que l'on a mis au point des méthodes qui permettent de prévoir certains des paramètres de propagation les plus importants qui affectent la planification des faisceaux hertziens à visibilité directe de terre;
- c) - que, dans toute la mesure possible, ces méthodes ont été testées par rapport aux données mesurées disponibles et qu'elles se sont révélées être d'une précision à la fois compatible avec la variabilité naturelle des phénomènes de propagation et adéquate pour la plupart des applications actuelles en matière de planification de systèmes, Recommande:

Que, dans les gammes de paramètres, les méthodes de prévision et autres techniques exposées dans la norme soient adoptées pour la planification des faisceaux hertziens en visibilité directe de terre.

Dans la réalisation des faisceaux hertziens à visibilité directe, on doit tenir compte de plusieurs effets de propagation, parmi lesquels:

- Les évanouissements par diffraction dus au fait que des obstacles de terrain obstruent le trajet dans des conditions défavorables de propagation;
- l'affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère;
- les évanouissements dus à la propagation par trajets multiples dans l'atmosphère ou à l'étalement du faisceau (généralement appelé «defocusing») associé à la présence de couches de réfraction anormales;
- les évanouissements dus à la propagation par trajets multiples provenant de réflexions sur la surface de la terre;
- l'affaiblissement dû aux précipitations ou à la présence de particules solides dans l'atmosphère;
- la variation, due à la réfraction, de l'angle d'arrivée au terminal de réception et de l'angle de départ au terminal d'émission;
- la réduction du découplage de polarisation croisée (XPD) dans les conditions de propagation par trajets multiples ou de précipitation;
- la distorsion du signal due aux évanouissements sélectifs et au retard de propagation dans les conditions de propagation par trajets multiples.

Cette recommandation a notamment pour but d'exposer sous forme concise et pas à pas des méthodes simples de prévision des phénomènes de propagation qu'il faut prendre en compte pour la majorité des liaisons fixes à visibilité directe ainsi que des renseignements sur leur domaine de validité. Elle a pour autre objectif de présenter d'autres informations et techniques qu'il est possible de recommander en vue de la planification des faisceaux hertziens à visibilité directe de terre.

Afin de tenir compte des effets du brouillage intra système dans les systèmes numériques, D'autres aspects relatifs au brouillage sont traités dans d'autres Recommandations, notamment:

- Les brouillages inter systèmes impliquant d'autres liaisons de Terre ou des stations terriennes dans la Recommandation UIT-R P.452; les brouillages inter systèmes impliquant des stations spatiales dans la Recommandation UIT-R P.619. [23].

III.3 Présentation de l'outil de simulation Pathloss 5.1

III.3.1 Définition

Le programme Pathloss 5.1 est un outil de conception de chemin complet pour les liaisons radio fonctionnant dans la gamme de fréquences de 30 MHz à 100 GHz.

Il s'agit d'un logiciel de planification avancé pour la conception de liaisons et de réseaux de relais radio micro-ondes.

Il est élaboré pour des simulations de transmission hertzienne afin de palier le mieux possible aux problèmes de propagation du signal en espace libre et de prévoir les caractéristiques d'équipements et les techniques à déployer pour s'assurer que le signal est reçu avec une fiabilité fixée par l'opérateur.

Il intègre plusieurs paramètres tels que les données géographiques du terrain de l'ensemble du globe. C'est un logiciel capable de situer n'importe quel point à partir de ses coordonnées GPS grâce à sa base de données fiable. Le dimensionnement revient donc à introduire les coordonnées GPS des deux points, afin d'avoir une vue approximative des données de parcours du terrain.

Une fois le parcours défini, il est aussi possible de faire varier les paramètres en ajoutant d'éventuels obstacles (arbres, immeubles, forêt,...) susceptibles de constituer l'état réel du terrain.

III.3.2 Applications proposées par Pathloss

Les applications proposées par Pathloss sont nombreuses et très diversifiées.

Nous vous proposons ici une brève description de certains modules.

- **Sommaire** (Summary) : c'est le module démarrage par défaut.

Il permet l'affichage des paramètres entrant des différents sites, les données et les applications optionnelles.

Il constitue l'interface entre les autres modules et la base de données des différents sites.

- **Données de parcours** (Terrain Data) : ce module permet de créer, d'éditer manuellement une table de valeur ou une base de données de terrain
- **Hauteur des antennes** (Antenna Heights) : le module de hauteur permet de calculer la hauteur des antennes qui satisfont à un certain nombre de critères.
- **Feuille de travail** (Worksheets) : elle permet de calculer la précision de la propagation multi-trajets et l'atténuation due à la pluie.

- **Impression du parcours** (Print Profile) : plusieurs formats sont disponibles dans ce module.

Il permet de ressortir le profil de la liaison avec les légendes correspondantes.

- **Vue du réseau sur la carte** (network map grip) : il fournit une représentation graphique des sites et de tout le réseau.
- **Ellipsoïde de Fresnel** : le premier ellipsoïde de Fresnel est indispensable.

Il nous permet de voir que les rayons directs entre antennes en regard ne percutent pas une élévation quelconque.

- **Configurations des antennes** : c'est également un paramètre important dans la mesure il faudra définir la fonction de l'antenne c'est-à-dire si l'antenne fonctionnera par exemple comme un émetteur et un récepteur ou d'autres.

Il s'agira de choisir entre les différentes fonctions d'antenne ci-dessous :

- ✓ **TR** : L'antenne est utilisée pour émettre et recevoir
- ✓ **TX** : L'antenne est utilisée pour émettre uniquement
- ✓ **RX** : L'antenne est utilisée pour recevoir uniquement
- ✓ **DR** : L'antenne reçoit uniquement mais sur un site dans lequel on a prévu une configuration en diversité d'espace
- ✓ **TH** : L'antenne émet et reçoit mais sur un site dans lequel on a prévu une configuration en diversité mixte (diversité d'espace horizontale et verticale)
- **Diffraction (Diffraction)** : le module de diffraction est utilisé pour calculer la perte sur les canaux de transmission (dispersion du signal) causée par la diffraction et la couche atmosphérique qu'est la troposphère. Il fournit les résultats sur la hauteur des antennes, la fréquence et le facteur K servant à calculer le rayon fictif de la terre.
- **Réflexion (Reflection)** : le module réflexion analyse les effets d'une réflexion quelconque sur un circuit.

Cette analyse ne s'effectue que lorsque l'utilisateur définit la zone de transmission comme une zone regorgeant de cours d'eau ou de surface miroitantes.

III.4 Simulation de la liaison entre Blida Ville et Chéra avec Pathloss 5.1

Avant d'entamer la simulation sur le logiciel, Une autre phase cruciale doit être effectuée, c'est le Site Survey, qui consiste à faire une sortie sur le terrain pour faire un prélèvement des coordonnées des deux sites à interconnecter à l'aide d'un récepteur **GPS**, ainsi que vérifier le dégagement du trajet entre eux à l'aide des binocles (LOS : Line Of Sight).

Plusieurs options de simulation sont disponibles sur Pathloss, et comme on va étudier une seule liaison FH, on a choisi d'utiliser l'option Pathloss Link Standalone.

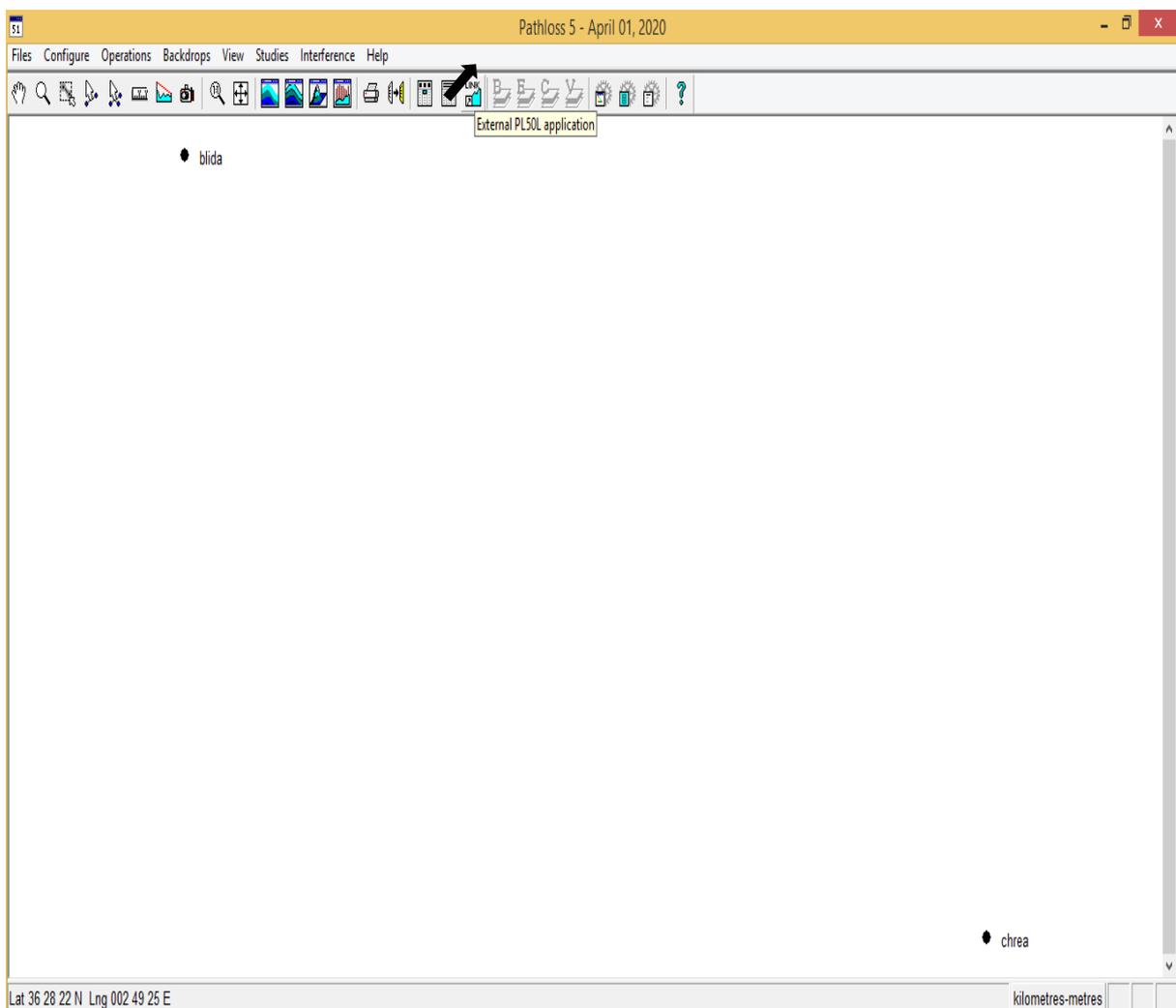


Figure III.1 : Choix de l'option Pathloss link standalone

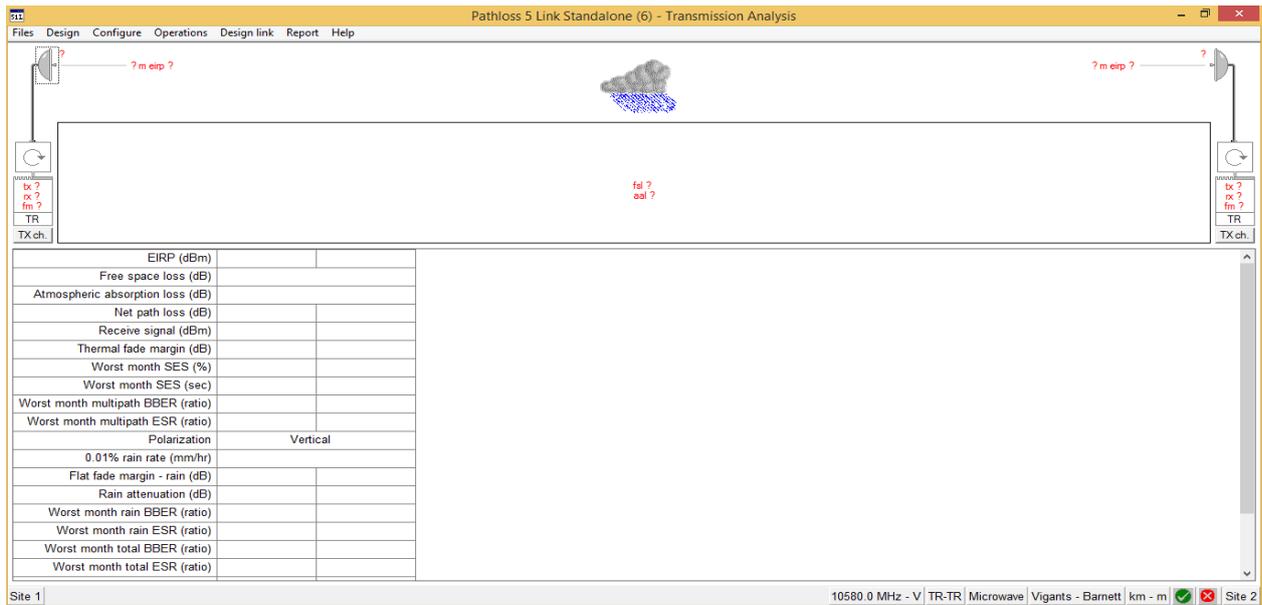


Figure III.2 : Fenêtre principale de Pathloss link standalone

III.4.1 Choix des options de calculs

Dans cette section, on va choisir toutes les options de calcul qui vont s’appliquer sur la feuille de donnée, par exemple, on choisit dans ce volet le type de la radio qu’on va utiliser, la méthode ou l’algorithme de calcul des pertes dû au multi-trajet...etc.

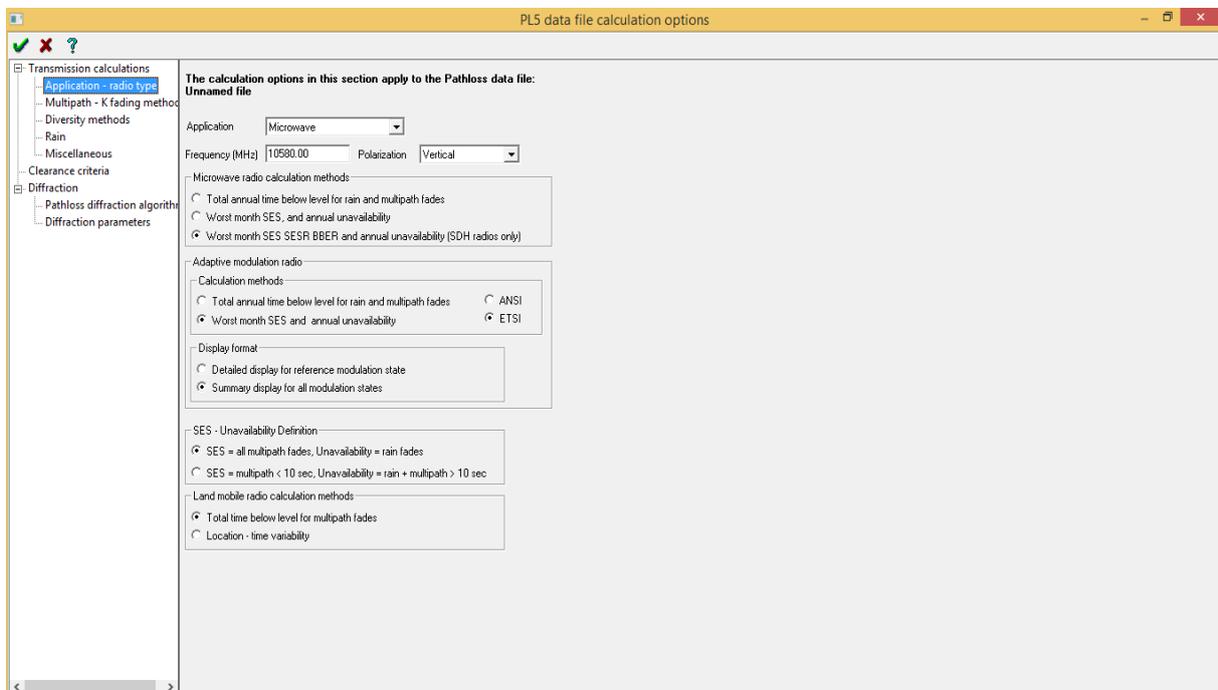


Figure III.3 : Choix des options de calculs

III.4.2 Introduction des coordonnées GPS sur Pathloss

Après prélèvement des coordonnées GPS sur terrain, on les introduit sur le logiciel, ce dernier va automatiquement calculer les autres données, tel que l'élévation, l'azimuth...etc., comme le montre la figure suivante.

NB : Tout ce qui est en bleu est calculé automatiquement.

	Site 1	Site 2
Site name	blida	chrean
Latitude	36 28 <input type="text"/>	36 25 <input type="text"/>
Longitude	002 47 <input type="text"/>	002 52 <input type="text"/>
True azimuth (°)	121.2295	301.2807
Path length (km)	9.044	
Call sign		
Station code		
Elevation (m)	177.23	1543.96
HAAT (m)	<input type="text"/>	<input type="text"/>
ASR		
Tower height (m)	60.00	50.00
Tower height w App (m)		
Tower type	self supporting	self supporting
Minimum antenna height (m)	5.00	5.00
Address		
City	blida	chrea
State	blida	blida
Country	algeria	algeria
Zip code		
Owner code		
Operator code		

Figure III.4 : Introduction des coordonnées GPS.

III.4.3 Génération du profil du terrain

Avant de générer le profil de la liaison il faut tout d'abord configurer les données géographiques.

En utilisant la base de données **SRTM** (Shuttle Radar Topography Mission) pour modéliser l'élévation du terrain, le logiciel peut donner un schéma géographique en deux dimensions de toute la distance calculée entre les deux sites.

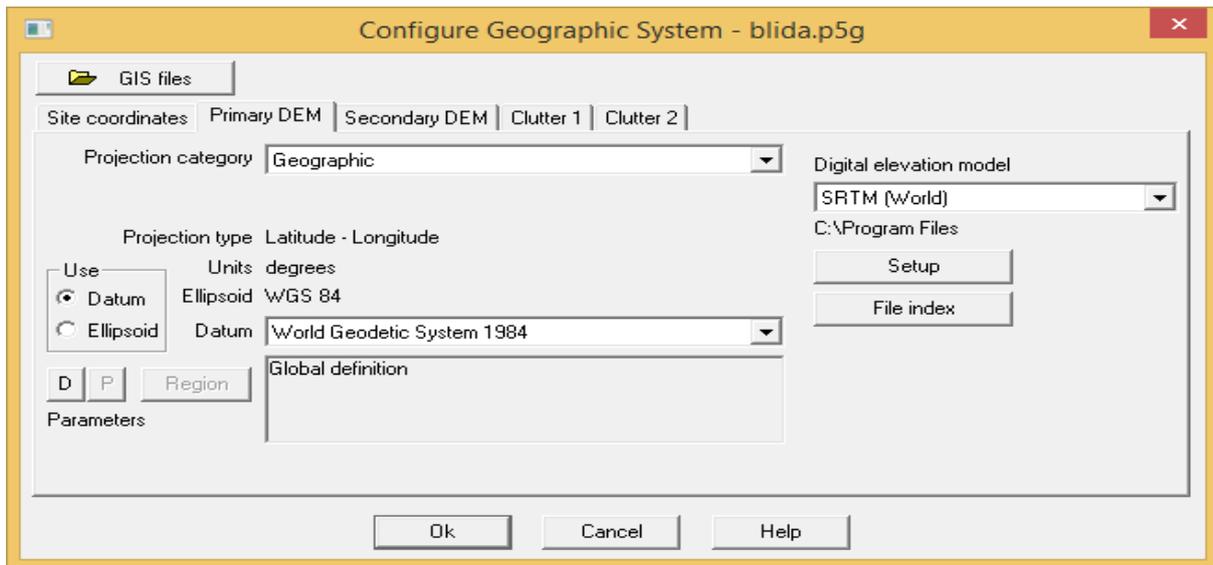


Figure III.5 : Choix du DEM (digital élévation model)

Avec le clutter model, le logiciel permet de définir le type du terrain de tout le trajet entre les deux sites.

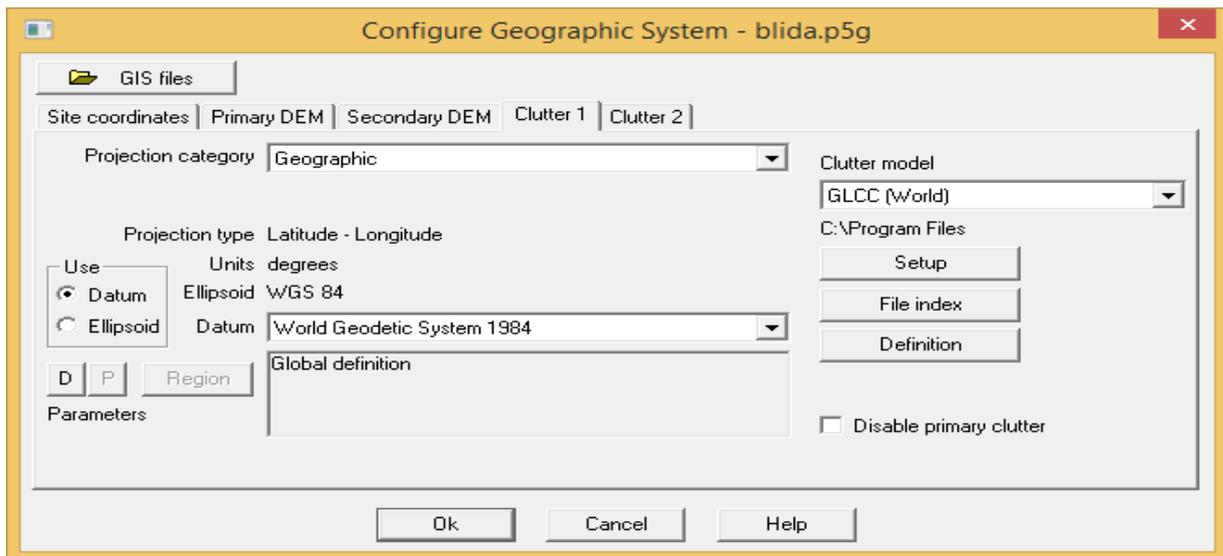


Figure III.6 : Choix du clutter model

Le profil de la liaison permet de savoir si le trajet entre les deux sites concernés est dégagé, et ne présente aucun obstacle naturel.

On utilise ce profil aussi pour voir les multi-trajets possibles du signal.

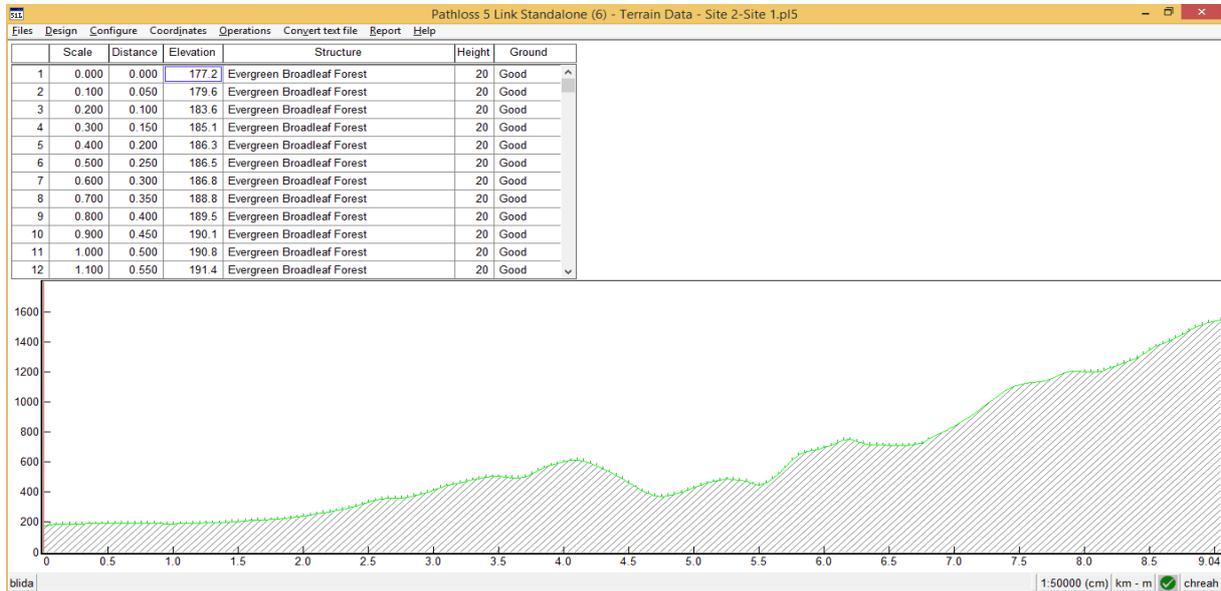


Figure III.7 : Données du parcours entre les deux sites.

III.4.4 Détermination des hauteurs des antennes

A l'aide de cette outils, on peut déterminer les hauteurs des pylônes ou des mats qui il faut installer pour permettre une bonne mise en place des antennes afin d'éviter tout obstacle sur le trajet.

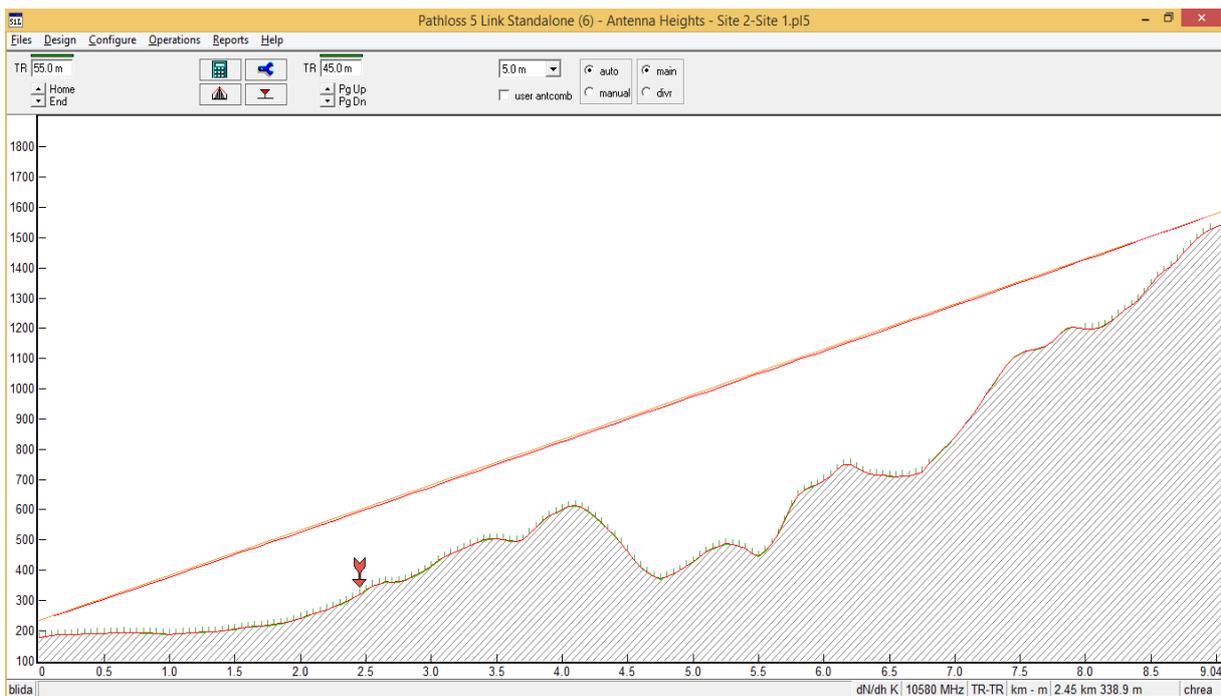


Figure III.8 : Choix des hauteurs d'antennes.

III.4.5 Visualisation des signaux réfléchis

Ce volet nous permet de simuler tous les signaux réfléchis soit de Blida vers Chéra et de Chéra vers Blida par rapport à la position des antennes, cela va nous permettre de choisir la position optimale de l'antenne et éventuellement de l'antenne de la diversité spatiale, afin d'éviter ces signaux qui vont interférer le signal principal.

On va prendre des hauteurs de l'antenne du premier site (Blida) variant entre 5 et 60m.

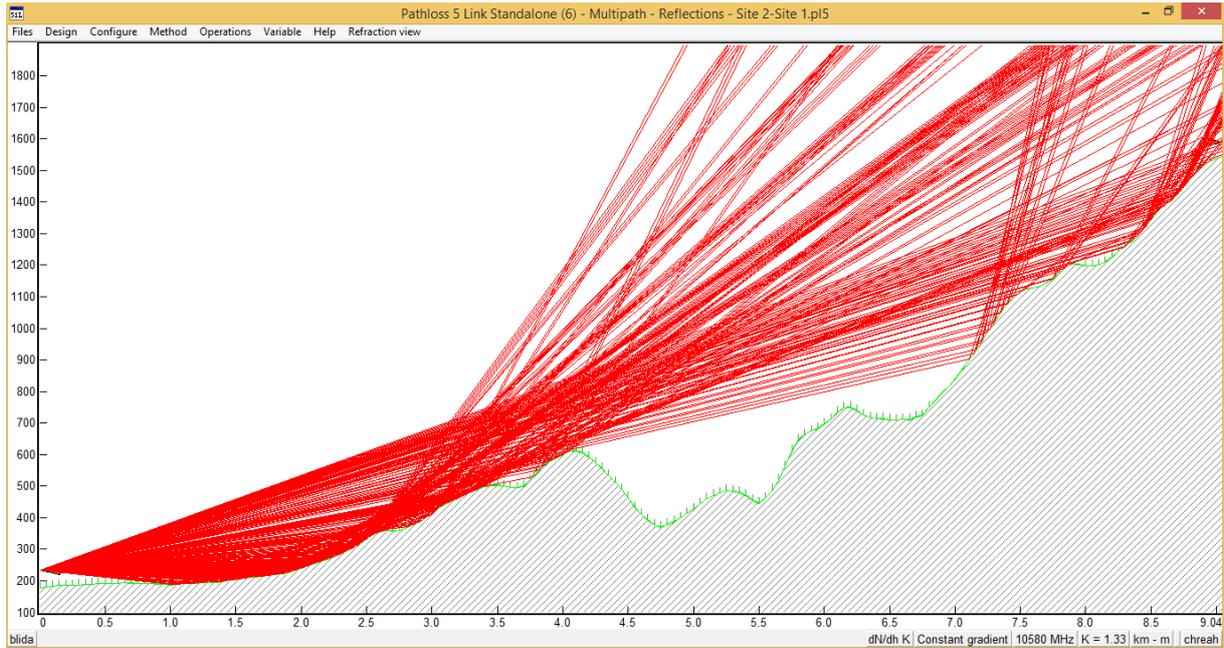


Figure III.9 : Les multi trajet et signaux réfléchis à partir du site de Blida vers Chéra

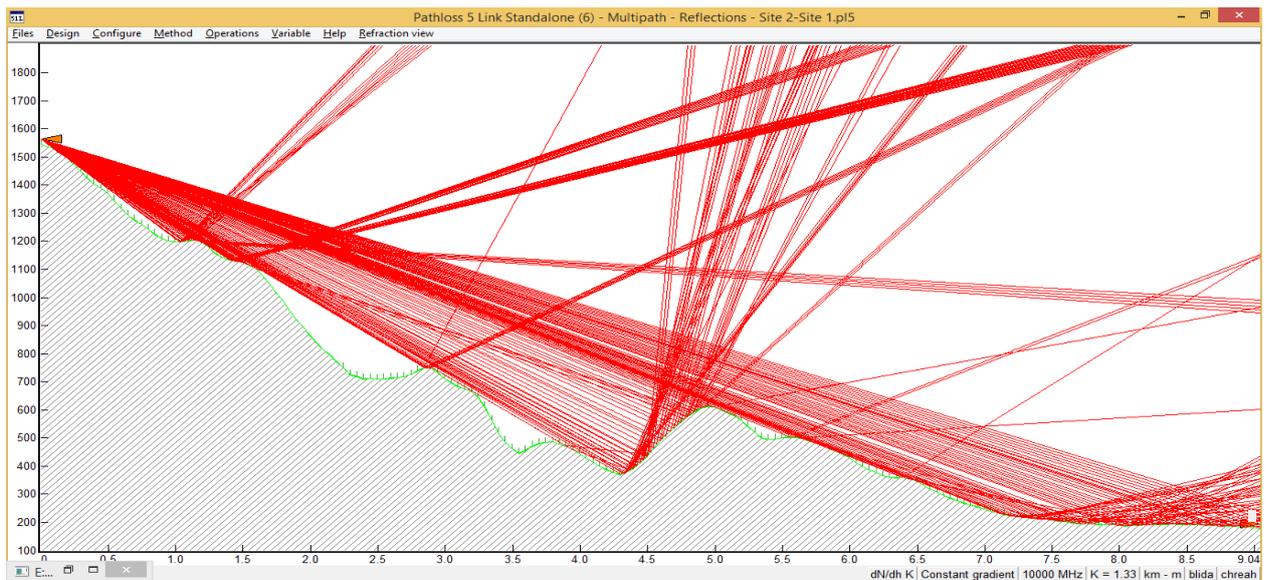


Figure III.10 : Les multi trajet et signaux réfléchis à partir du site de Chéra vers Blida

Après l'analyse des résultats de la simulation, on a décidé de mettre l'antenne du premier site (Blida) a une hauteur de 55m ce qui nécessite un pylône d'au moins 60m, et celle du deuxième site (Chr  a) a 45m soit un pyl  ne d'au moins 50m.

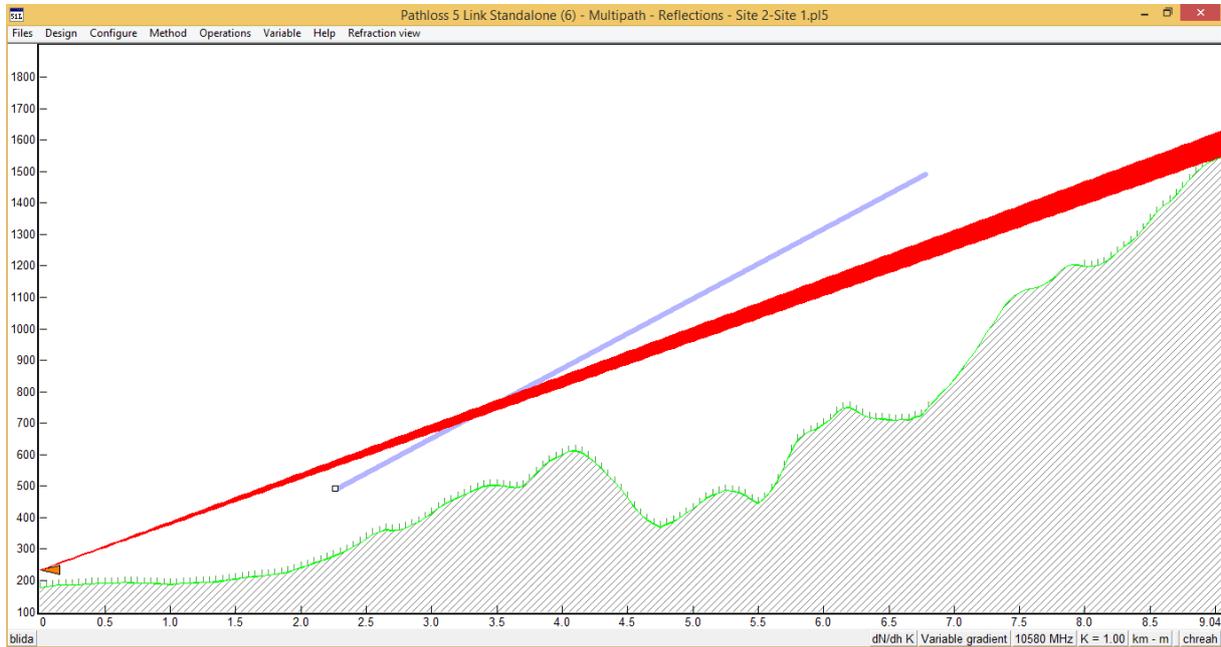


Figure III.11 : Sch  ma du signal apr  s le choix des hauteurs d'antennes a partit de Blida vers Chr  a.

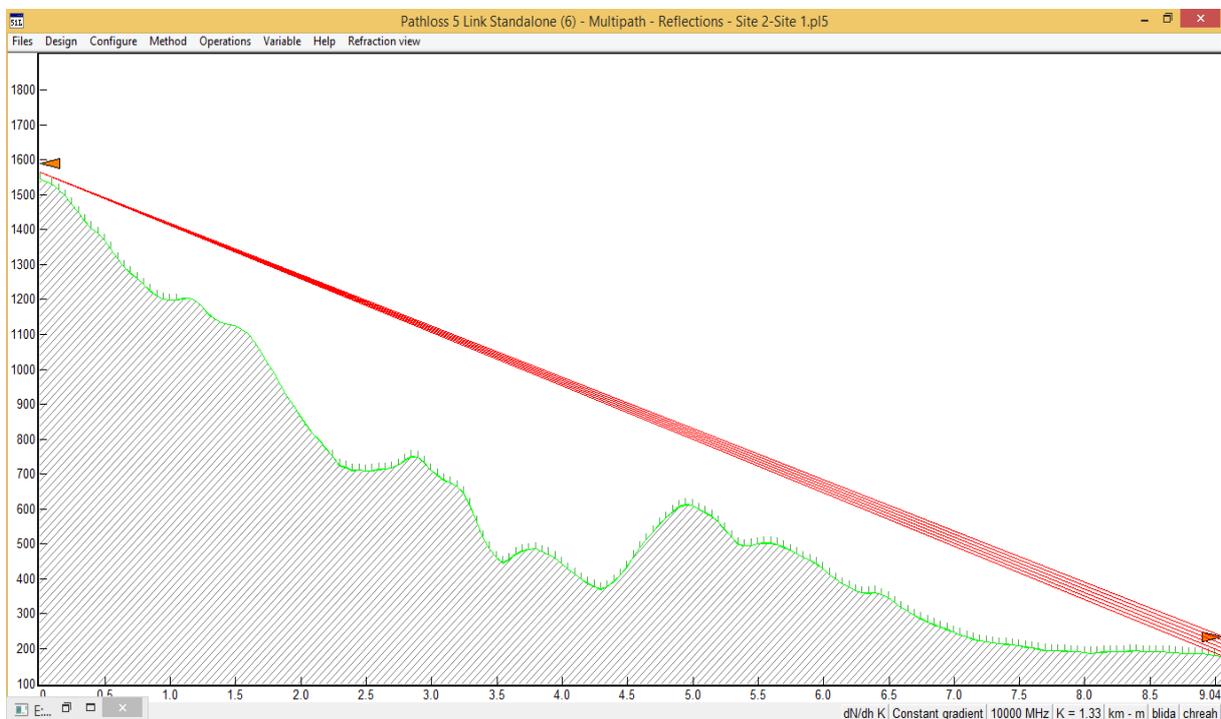


Figure III.12 : Sch  ma du signal apr  s le choix des hauteurs d'antennes partit de Chr  a vers Blida.

On remarque qu'on a éliminé tous les multi trajet avec le choix des hauteurs effectué.

III.4.6 Vérification du dégagement du parcours pour la zone de Fresnel

Il nous faut dans ce sous-titre, trouver une règle donnant le dégagement minimum de l'**Ellipsoïde de Fresnel** nécessaire sur une liaison hertzienne pour que la diffraction du rayon de celui-ci sur les obstacles éventuels soit négligeable. L'**Ellipsoïde de Fresnel** délimite la région de l'espace où est véhiculée la plus grande partie de l'énergie du signal (60% environ). Se situer dans cet ellipsoïde revient à se retrouver dans les conditions de la propagation en espace libre, c'est-à-dire que le signal se propage sans diffraction.

Pour les hauteurs d'antenne choisies, la zone de Fresnel est dégagée de tout obstacle.

Le rayon du 1^{er} ellipsoïde est égale à :

$$r = \frac{\sqrt{\lambda \cdot d_1 \cdot d_2}}{d_1 + d_2} \dots \dots \dots III.1$$

r : rayon (m) de la première zone (60%)

d_1 : distance entre l'émetteur P_E et le point r

d_2 : distance entre le récepteur P_R et le point r

λ : Longueur d'onde de fonctionnement

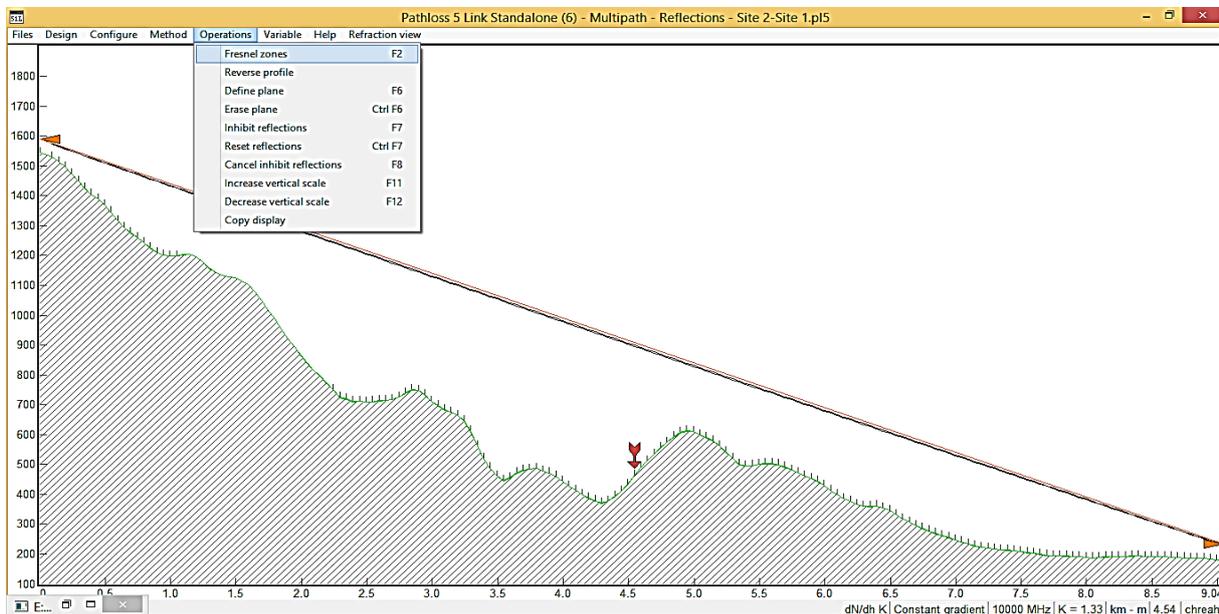


Figure III.13 : La zone de Fresnel.

III.4.7 Calcul des différents types de pertes

Plusieurs effets de propagation doivent être pris en compte dans la conception des systèmes hertziens en visibilité directe. Ceux-ci inclus:

- Évanouissements dus à la propagation par trajets multiples atmosphérique ou l'étalement du faisceau (communément appelé défocalisation) associée à des couches de réfraction anormales;
- La décoloration due à trajets multiples résultant de la réflexion de surface.
- Affaiblissement dû aux précipitations ou des particules solides dans l'atmosphère.
- Variation d'angle au terminal récepteur et angle de lancement au niveau du terminal de l'émetteur en raison de la réfraction.
- Réduction de la discrimination de polarisation croisée (XPD) dans multivoies ou de précipitation conditions.
- Distorsion du signal due à l'évanouissement sélectif en fréquence et un retard lors de la propagation par trajets multiples.

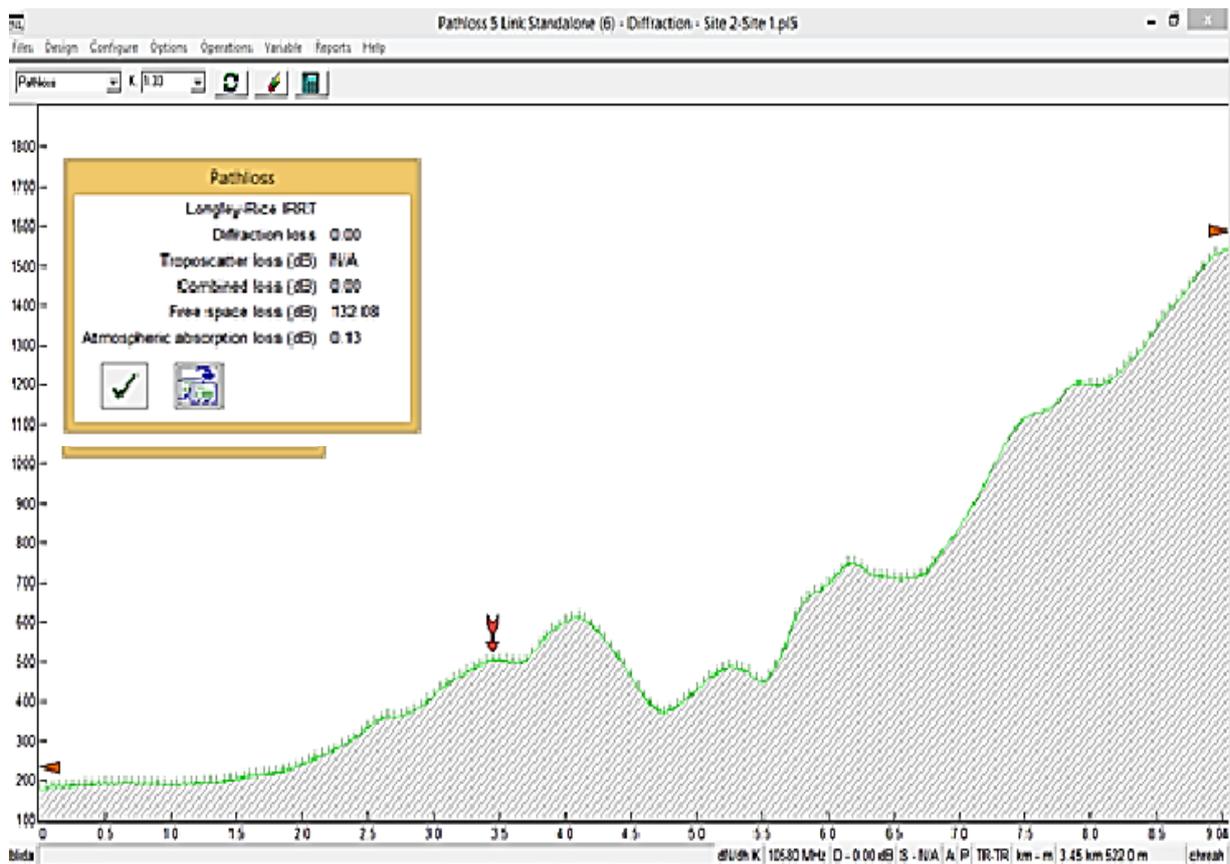


Figure III.14 : Calcul des différents types de pertes

III.4.8 Génération du profil de la liaison

Le profil de la liaison se produit en fin avant d'établir le bilan de liaison, et cette dernière montre la possibilité d'avoir une visibilité pour le signal de la liaison.

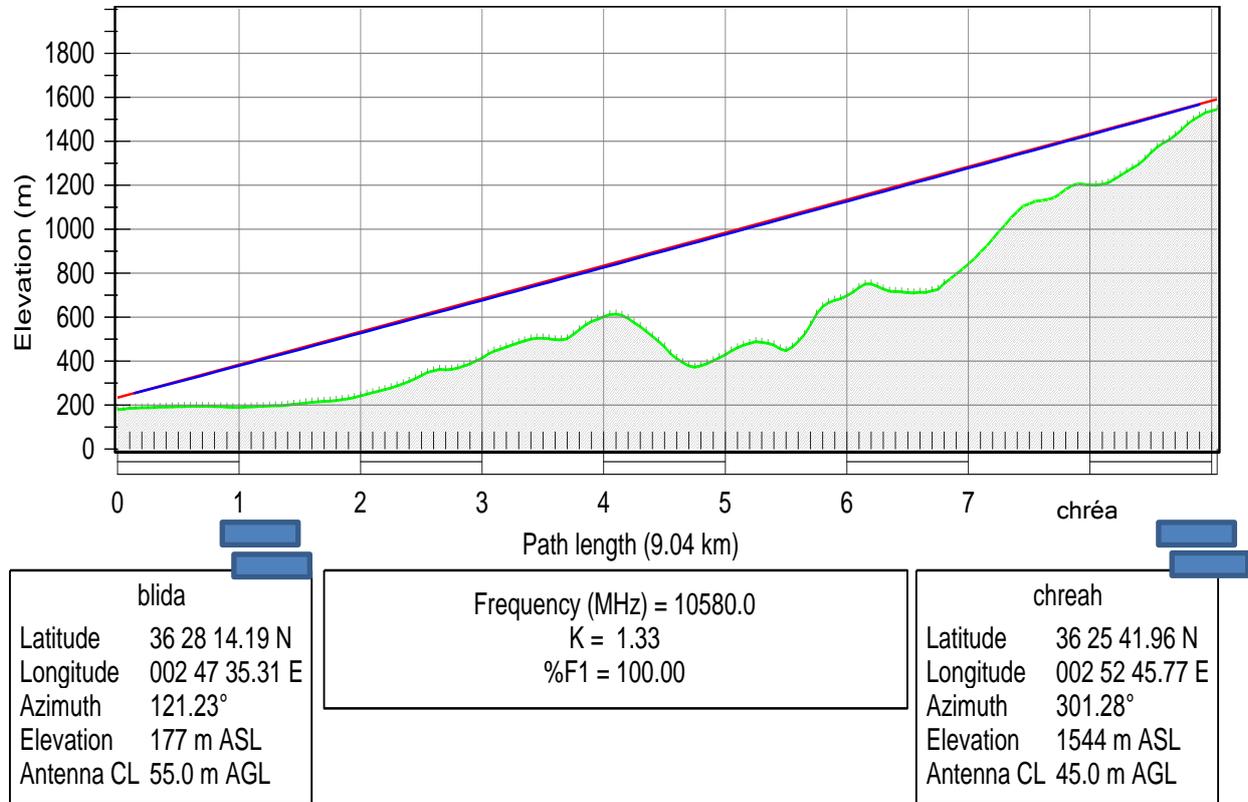


Figure III.15 : Génération du profil de la liaison

III.5 Etablir le bilan de la liaison de Blida ver Chéra avec Pathloss 5.1

III.5.1- Définition

Avant d'installer un système de radiocommunication ou une liaison hertzienne, il est Nécessaire d'effectuer le calcul du bilan de liaison. En effet, ce calcul permet de déterminer si le niveau de puissance reçue par le récepteur sera suffisant pour que la liaison fonctionne correctement. Pour un bon fonctionnement d'une liaison hertzienne il faut que la puissance reçue soit supérieure à la sensibilité du récepteur.

De plus, on prendra généralement une marge (on essaiera d'avoir des dB en plus) pour tenir compte des atténuations supplémentaires qui peuvent être dues à des réflexions multiples ou à la météo (pluie, neige, brouillard, etc...)

III.5.2 Notions utiles pour élaborer le Bilan des liaisons

Il y a deux paramètres importants pour tout bilan de liaison radio, nécessite une attention particulière : « la puissance maximale rayonnée (PIRE) » et "la sensibilité du récepteur" :

- "**puissance maximale rayonnée**": elle indique la puissance maximum qui est légalement autorisée pour être envoyée dans l'air libre dans un pays ou un contexte spécifique.

Elle est fixée par l'autorité de régulation nationale. La limite légale en Algérie est normalement 100 mW.

Dans quelques scénarios très concrets (liaisons point à point) et dans quelques pays, le maximum permis pour la puissance rayonnée est de 1 à 4 W.

- "**sensibilité de récepteur**" : elle indique quelle valeur minimum de puissance est nécessaire dans le récepteur radio pour qu'il puisse décoder avec succès l'information contenue dans le signal radio.

III.5.2.1 Expression de la puissance reçue

Pour déterminer P_R , la puissance reçue par le récepteur, il suffit en partant de P_E puissance d'émission de retrancher toutes les sources d'atténuation du signal et d'ajouter les gains d'antenne G_E et G_R .

On obtient :
$$P_R = P_E - L_E + G_E - A_{EL} + G_R - L_R \dots \dots \dots \text{III.2}$$

$$A_{EL} = \left(\frac{4\pi \cdot d}{\lambda}\right)^2 \dots \dots \dots \text{III.3}$$

$$A_{EL} = 20 \cdot \log\left(\frac{4\pi \cdot d}{\lambda}\right) \dots \dots \dots \text{III.4}$$

$$A_{EL} = 20 \log(f) + 20 \log(d) - 147,5 \dots \dots \dots \text{III.5}$$

$$P_R = P_E + G_E + G_R - 20 \log(f) - 20 \log(d) + 147,5 \dots \dots \dots \text{III.6}$$

P_E et P_R : en dBm G_E et G_R : en dBi f : en Hz d : en mètre

Elle est déterminée par la puissance émise en sortie de la radio ou de l'émetteur.

L_E & L_R : c'est l'affaiblissement qui dus à la liaison entre émetteur-antenne et antenne-récepteur elle est faite par des câble qui introduit des atténuations, exprimé en dB.

Dans les petits systèmes où tout est intégré, cette liaison n'existe pas et $L_E = L_R = 0$ dB.

Dans notre cas les antennes est directement reliée donc les pertes sont négligeables ;

Remarque :

- Le terme $P_E - L_E + G_E$ correspond à la puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE), au niveau de l'antenne d'émission exprimée en dBm

$$PIRE = P_E - L_E + G_E \dots \dots \dots \text{III.7}$$

III.5.3 Choix de l'antenne

Les antennes, principalement paraboliques, apportent un gain de puissance (de l'ordre de 25 à 45dB). La directivité du faisceau augmente avec la bande de fréquence et les diamètres de l'antenne.

Dans cette étude on a choisi d'utiliser des antennes paraboliques du constructeur ANDREW, avec un diamètre de 1.2m.

	chreah	blida
Antenna model	VHLP4-105	VHLP4-105
Antenna diameter (m)	1.22	1.22
Antenna height (m)	21.12	16.80
Antenna gain (dBi)	39.90	39.90
Radome loss (dB)		
Antenna file name	1690	1690
Antenna 3 dB beamwidth H (°)	1.50	1.50
Antenna 3 dB beamwidth E (°)	1.50	1.50
True azimuth (°)	301.28	121.23
Vertical angle (°)	-8.65	8.59
Antenna azimuth (°)		
Antenna downtilt (±°)		
Orientation loss (dB)	0.00	0.00

Figure III.16 : Choix des antennes.

III.5.4 Choix de la radio

Chaque radio a ces caractéristiques, on a choisi d'utiliser une radio ECLIPSE du constructeur américain AVIAT NETWORKS.

On choisit aussi dans ce volet la bande passante et la modulation qui correspond au débit voulu.

	chreah	blida
Radio model	EH10-1STM1-128QAM-27.5M	EH10-1STM1-128QAM-27.5M
Emission designator	27M5D7W	27M5D7W
Radio file name		
TX power (watts)	0.16	0.16
TX power (dBm)	22.04	22.04
RX threshold criteria		
RX threshold level (dBm)	-68.00	-68.00
Residual BER	10-6	10-6
Residual BER threshold (dBm)		
Maximum receive signal (dBm)		
Dispersive fade margin (dB)		
Bits per block		
Blocks per second		
Alpha1		
Alpha2		
Alpha3		

Figure III.17 : Choix de la radio.

III.5.5 Choix de la fréquence

En général, les fréquences utilisées sur Pathloss sont provisoires, les fréquences réelles à utiliser sur le terrain sont obtenues à travers l'agence nationale des fréquences ANF.

chreah TX					blida TX					
	Ch ID	TX (MHz)	ATPC	Pwr.Rd.	Pol	Ch ID	TX (MHz)	ATPC	Pwr.Rd.	Pol
1	1	10000.00			V	1	10000.00			V
2					V					V
3					V					V
4					V					V
5					V					V
6					V					V
7					V					V
8					V					V
9					V					V
10					V					V
11					V					V
12					V					V

Figure III.18 : Choix de fréquence.

III.5.6 Influence de la pluie

En présence de pluie, les gouttes d'eau vont introduire une atténuation significative. L'abaque fourni sur page suivante, permet de déterminer l'atténuation supplémentaire introduite par la pluie, en fonction de la fréquence, de la polarisation et de l'intensité de la pluie : il suffit de tracer une droite passant par 2 paramètres (fréquence et intensité de pluie) pour trouver le troisième paramètre (atténuation en dB/km).

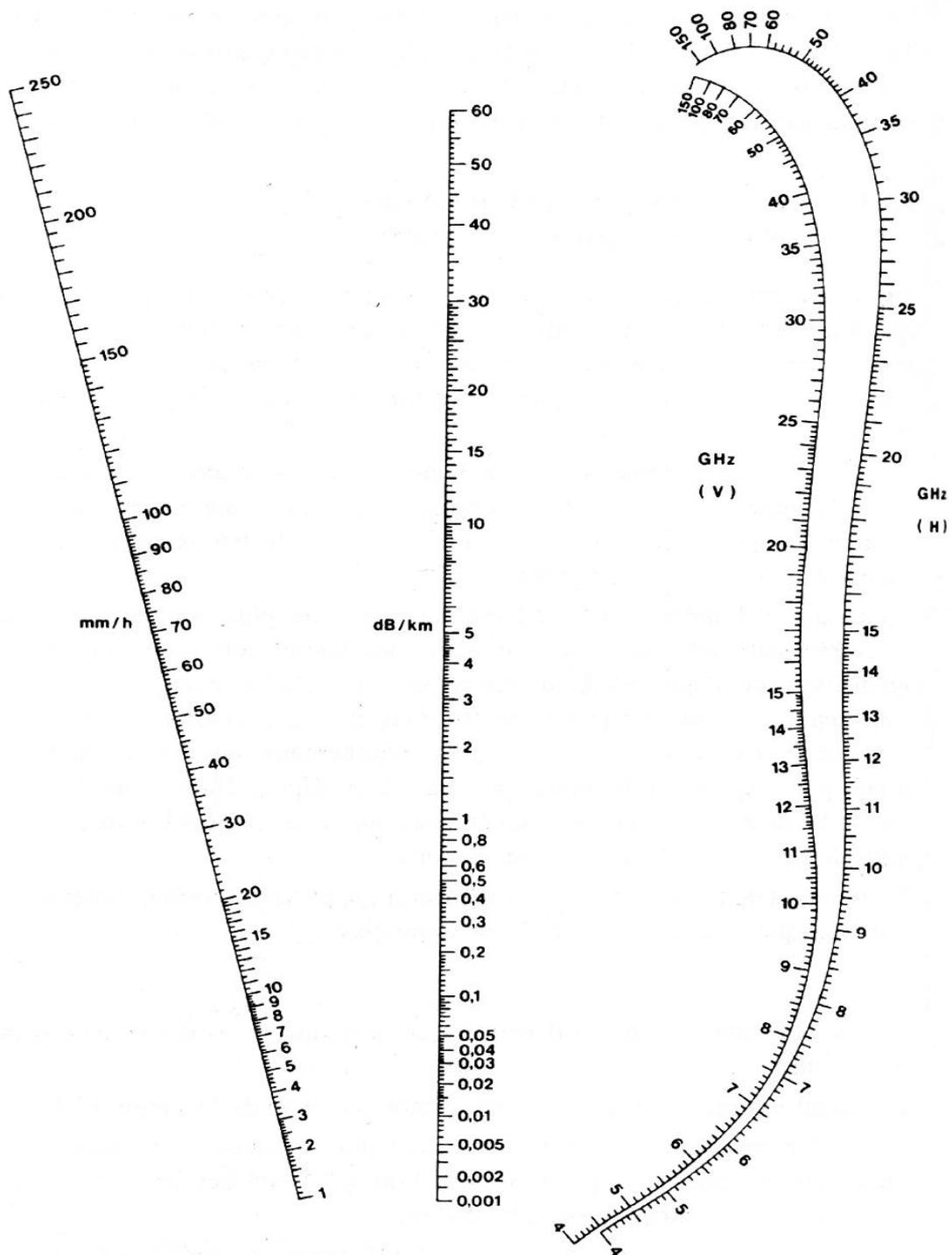


Figure III.19 : Monogramme pour calculer les atténuations dues à la pluie [24]

La Zone hydrométéorologique et la définition de l'Intensité des chutes de pluie dépassée (mm/h), sont données automatiquement par Pathloss après l'introduction des coordonnées GPS.

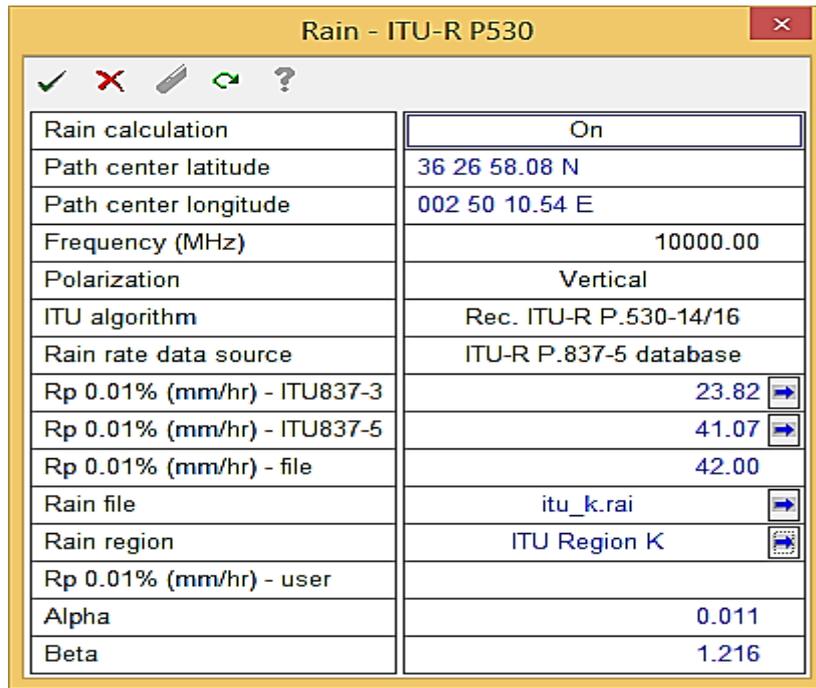


Figure III.20: Définition de la zone hydrométéorologique

Après la définition de la zone hydrométéorologique, pathloss peut calculer automatiquement l'atténuation dû à la pluie.

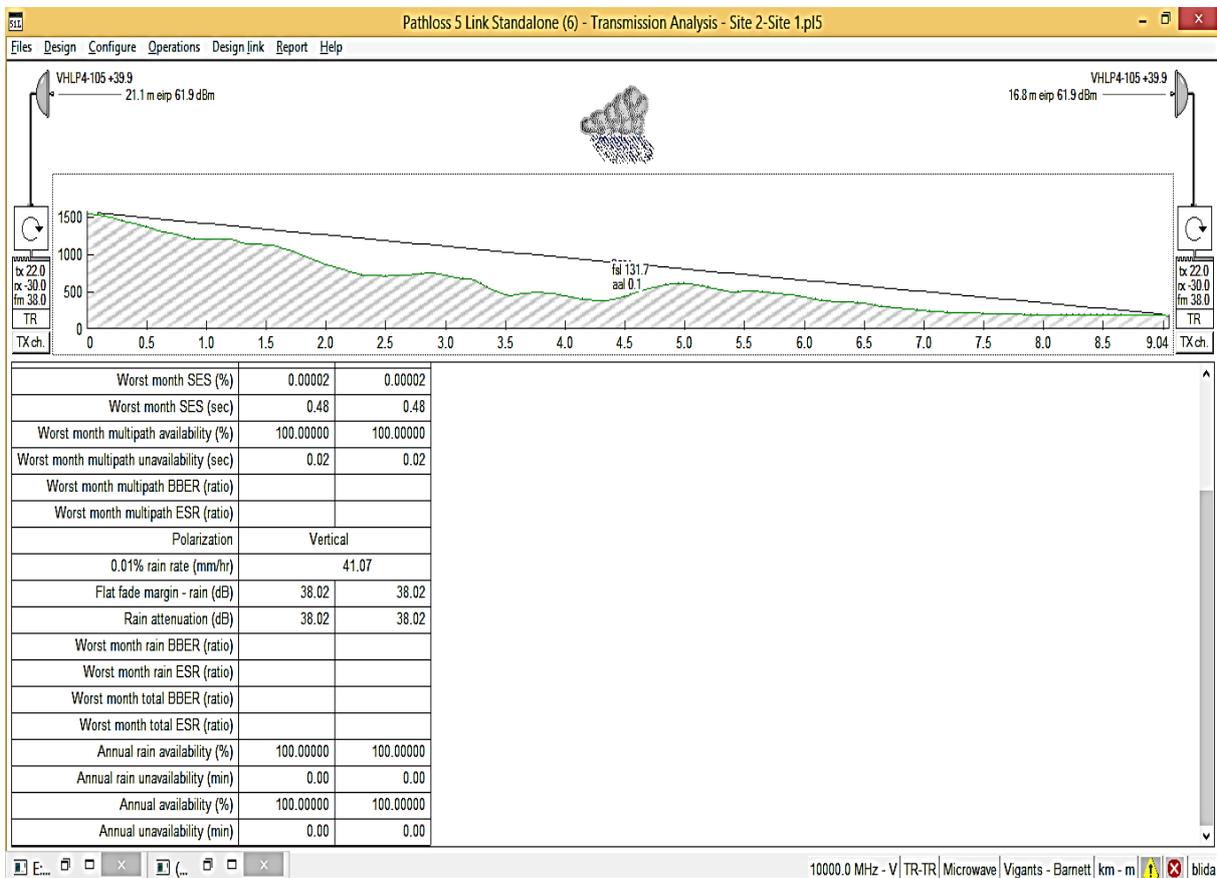


Figure III.21: Calcul de pluie

III.5.7 Le Rapport final de la liaison

Ce dernier est obtenu à la fin, après l'introduction de tous les paramètres qu'on a parlés ci-dessus.

	Chréa	Blida
Latitude	36 25 xx.xx N	36 28 xx.xx N
Longitude	002 52 xx.xx E	002 47 xx.xx E
True azimuth (�)	301.28	121.23
Vertical angle (�)	-8.65	8.59
Elevation (m)	1543.96	177.23
Tower height (m)	50.00	60.00
Tower type	self supporting	self supporting
Antenna model	VHLP4-105 (TR)	VHLP4-105 (TR)
Antenna file name	1690	1690
Antenna gain (dBi)	39.90	39.90
Antenna 3 dB beamwidth H (�)	1.50	1.50
Antenna 3 dB beamwidth E (�)	1.50	1.50
Antenna height (m)	21.12	16.80
Orientation loss (dB)	0.00	0.00
Frequency (MHz)	10000.00	
Polarization	Vertical	
Path length (km)	9.15	
Free space loss (dB)	131.69	
Atmospheric absorption loss (dB)	0.12	
Net path loss (dB)	52.02	52.02
Radio model	EH10-1STM1-128QAM-27.5M	EH10-1STM1-128QAM-27.5M
TX power (dBm)	22.04	22.04
Emission designator	27M5D7W	27M5D7W
EIRP (dBm)	61.94	61.94
TX channel assignments	1 10510.00V	1 10650.00V
RX threshold level (dBm)	-68.00	-68.00
Receive signal (dBm)	-29.98	-29.98
Thermal fade margin (dB)	38.02	38.02
Dispersive fade occurrence factor	1.00	
Effective fade margin (dB)	38.02	38.02
Climatic factor	1.00	
Terrain roughness (m)	42.67	
C factor	0.26	
Fade occurrence factor (Po)	1.203E-003	
Worst month SES (%)	0.00002	0.00002
Worst month SES (sec)	0.48	0.48
Worst month multipath availability (%)	100.00000	100.00000
Worst month multipath unavailability	0.02	0.02

	Chréa	Blida
(sec)		
Polarization	Vertical	
0.01% rain rate (mm/hr)	41.07	
Flat fade margin - rain (dB)	38.02	38.02
Rain attenuation (dB)	38.02	38.02
Annual rain availability (%)	100.00000	100.00000
Annual rain unavailability (min)	0.00	0.00
Annual availability (%)	100.00000	100.00000
Annual unavailability (min)	0.00	0.00

Tableau III.1: Rapport final de la liaison

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a fait une étude de la liaison FH Blida vers Chréa, avec le logiciel Pathloss 5.1, à partir du site Survey jusqu'à la délivrance du rapport final de la liaison, ces résultats ont été obtenus après plusieurs tentative, en changeant à chaque fois des paramètres tel que le diamètre et la hauteur de l'antenne, le type de modulation, la puissance émise...etc., afin d'avoir un résultat optimal.

4^{ me} Chapitre

*IV-Configuration Et Mise En Service De
La Liaison Blida Vers Chr ea Avec
Le Logiciel Portal*

IV.1 Introduction

Après l'installation physique des deux sites en question, notamment l'installation des pylônes, shelters, énergies, antennes, câbles et radio, on va passer à la phase de configuration.

Dans ce dernier chapitre, on va montrer comment introduire les différents paramètres comme on a vu dans le chapitre pr c dent sur la radio.

Le type de la radio qu'on va utiliser est ECLIPSE de l'équipementier américain AVIAT NETWORKS, la configuration se fera à l'aide du logiciel PORTAL propre à cette radio.

Il est à noter que des informations ont été occultées pour des raisons de confidentialité.

IV.2 Présentation de la radio ECLIPSE

Il existe deux plateformes ECLIPSE:

- **Nœud:** cette plateforme est modulaire avec des cartes enfichables, elle peut prendre en charge de multiples liens et interfaces clients: PDH, IP ou SDH.
- **Terminal:** chaque ECLIPSE est en charge d'un seul lien, aucun module enfichable, il existe plusieurs versions de cette radio selon l'utilisation PDH, IP ou SDH.

ECLIPSE propose un nouveau concept de liens FH, au lieu d'un seul lien traditionnel par saut, le nœud, en soutenant jusqu'à 6 liens, avec interconnexions qui relient les liens et les interfaces locales, offre une nouvelle approche.

Les avantages sont:

- Cout d'installation plus bas.
- Moins d'espace nécessaire pour l'installation.
- Une architecture flexible pour les extensions futures et le changement de la topologie.
- Un meilleur contrôle et gestion.

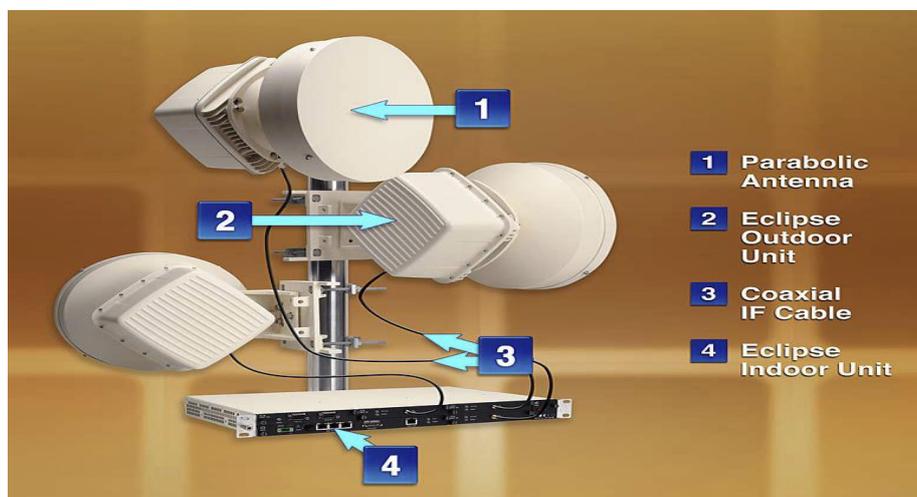


Figure IV.1: Exemple d'une configuration de la plateforme ECLIPSE [25].

Dans notre cas on va utiliser un ECLIPSE nodal, dont existent deux types de cette radio:

- INU peut comporter jusqu'à 3 liens.
- INUe peut soutenir jusqu'à 6 liens, celui qu'on va utiliser avec un ODU 600 (Outdoor unit)



Figure IV.2: ECLIPSE ODU 600 [26].



Figure IV.3: ECLIPSE de type INUe [27]

IV.3 Configuration de la liaison avec le logiciel portal

IV.3.1 Logiciel PORTAL :

Portal est l'outil de configuration, mise en service et de diagnostic pour ECLIPSE, on doit avoir ce logiciel préinstallé sur un pc portable et un câble réseau pour se connecter et configure la radio. Il existe aussi un autre logiciel de supervision appelé PROVISION, qui peut être utilisé pour gérer tout un réseau.



Figure IV.4 : Fenêtre d'accès du logiciel portal.

Pour accéder à la radio, on doit saisir l'adresse IP dans le champ « connect to » pour aller à la fenêtre principale de la radio ECLIPSE

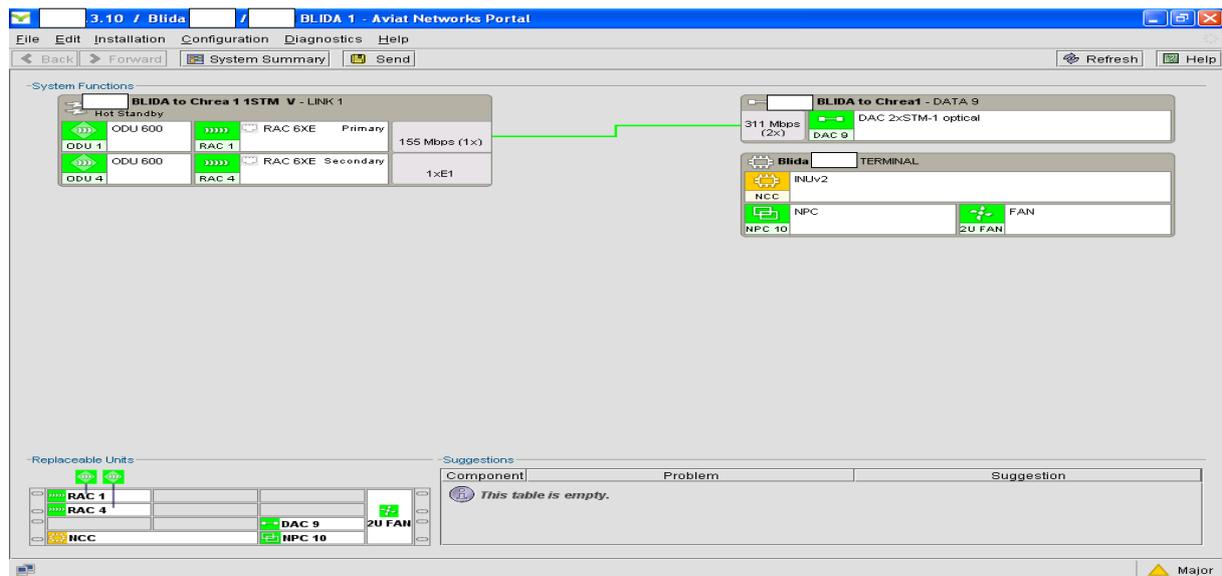


Figure IV.5 : Fenêtre principale de la radio ECLIPSE.

IV.3.2 Introduction des Paramètres radio sur le module RAC 6XE (radio Access 6XE) :

Pour cela, on doit mettre le pointeur sur le module, cliquer avec le bouton droit et choisir **Plug-ins**

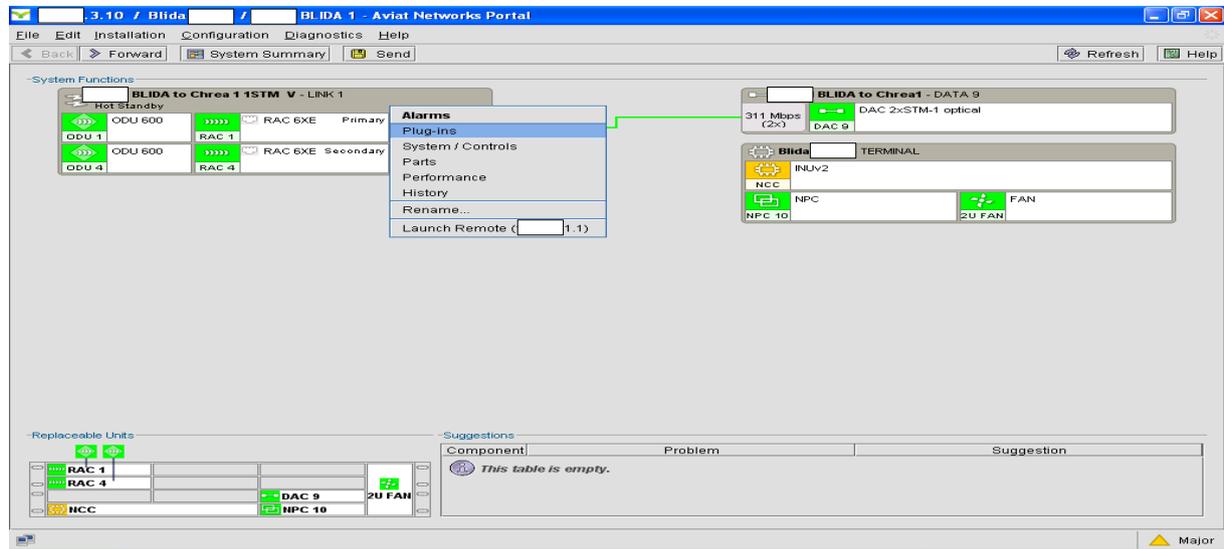


Figure IV.6 : Introduction Des Paramètres Radio Sur Le Module RAC 6XE.

IV.3.3 Choix de la modulation

Pour avoir le débit souhaité soit 155 Mbit/s (STM1), on a utilisé une bande passante de 27.5 MHz avec une modulation 128 QAM.

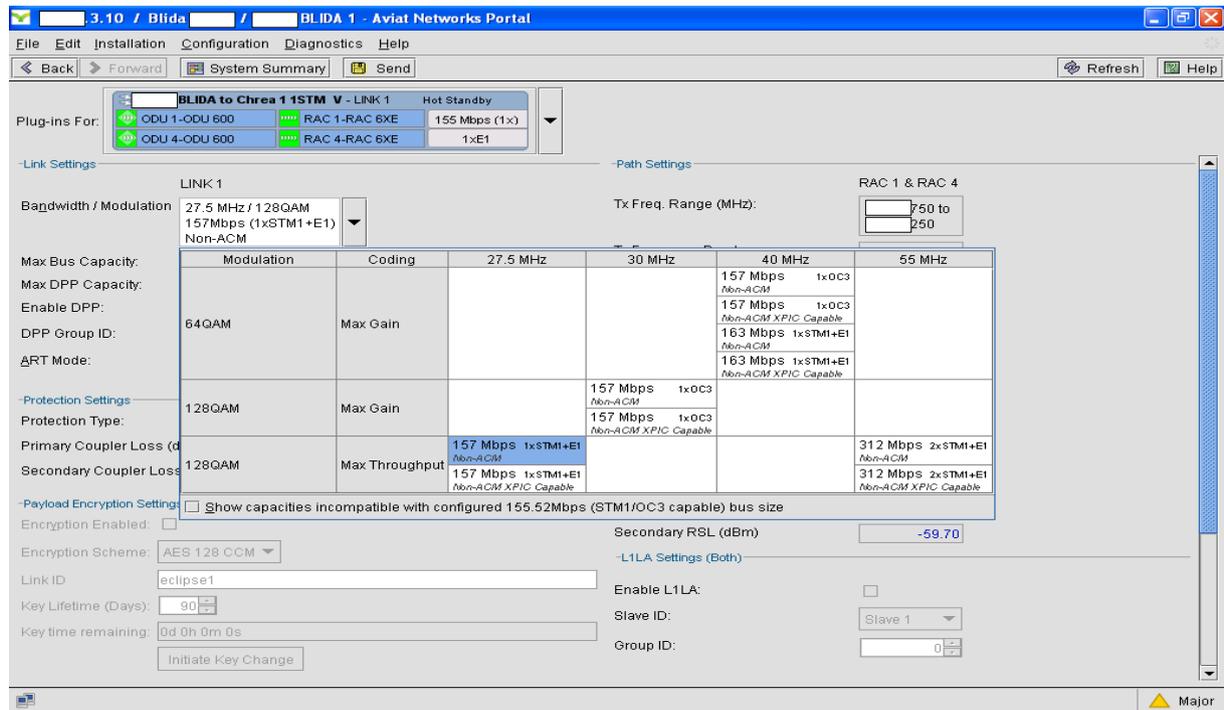


Figure IV.7 : Choix de la modulation.

IV.3.4 Saisie de la fréquence

Dans la même fenêtre, on procède à la saisie des fréquences ( mission, réception), ces dernières doivent être comprises dans l'intervalle des fréquences de l'ODU, il est à noter que chaque ODU a une plage de fréquences de travail bien précise

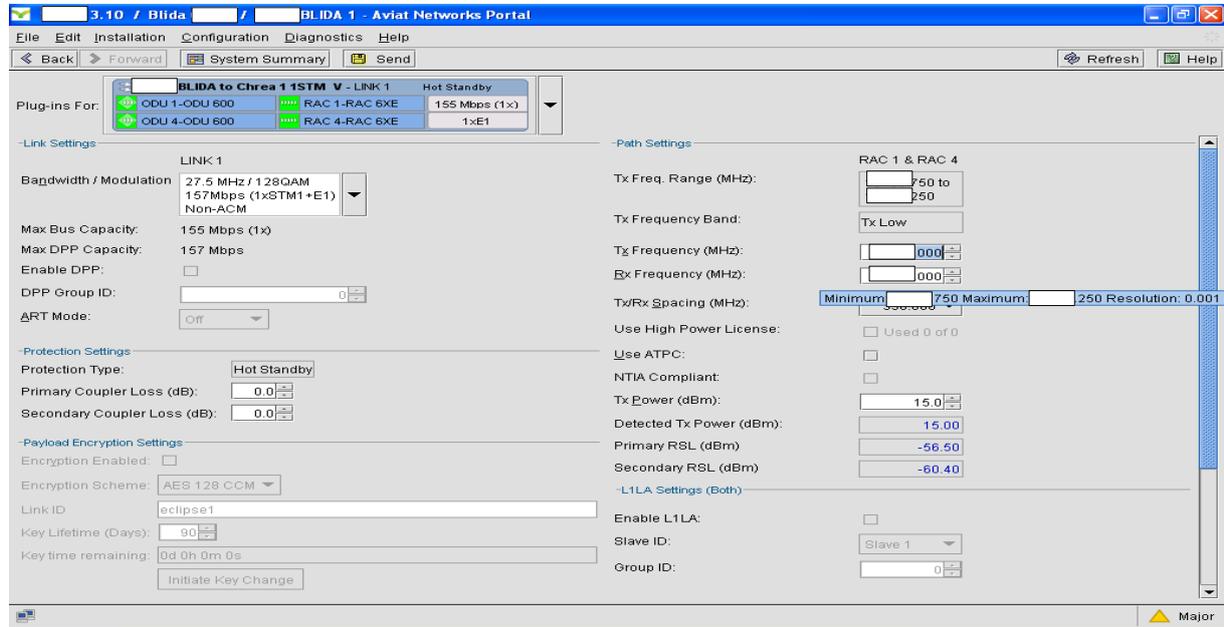


Figure IV.8 : Saisie de la fréquence.

IV.3.5 La performance de la liaison radio

Après l'introduction des paramètres radio, on vérifie la qualité de notre liaison, il faut donc pointer le curseur sur le module RAC 6XE, cliquer avec le bouton droit et choisir performance pour voir le niveau de signal reçu (RSL : Received Signal Level) et le taux d'erreur (BER : Bit Error Rate)

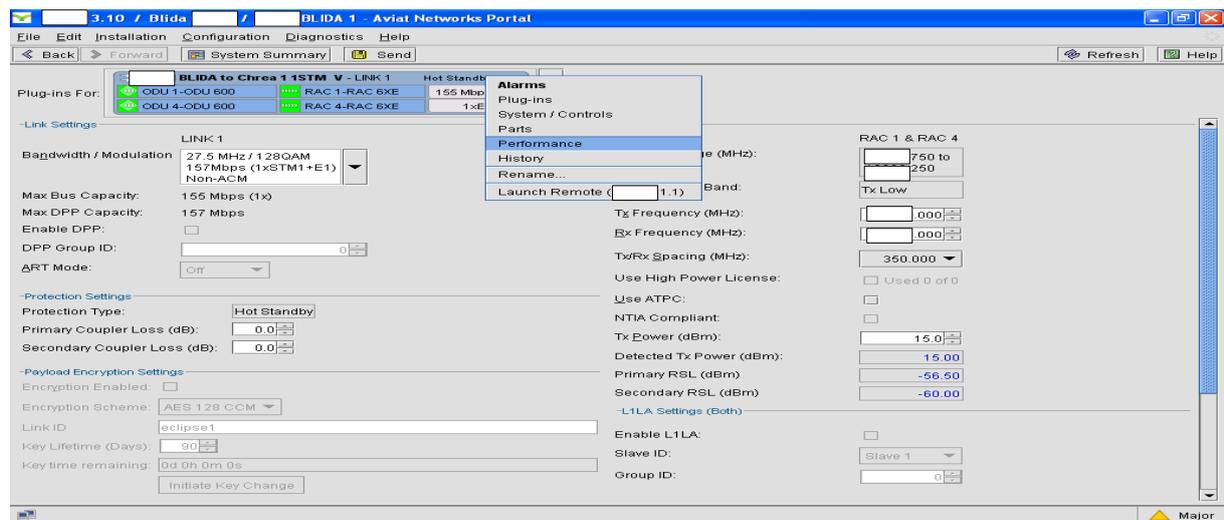


Figure IV.9 : Chemin pour afficher la performance.

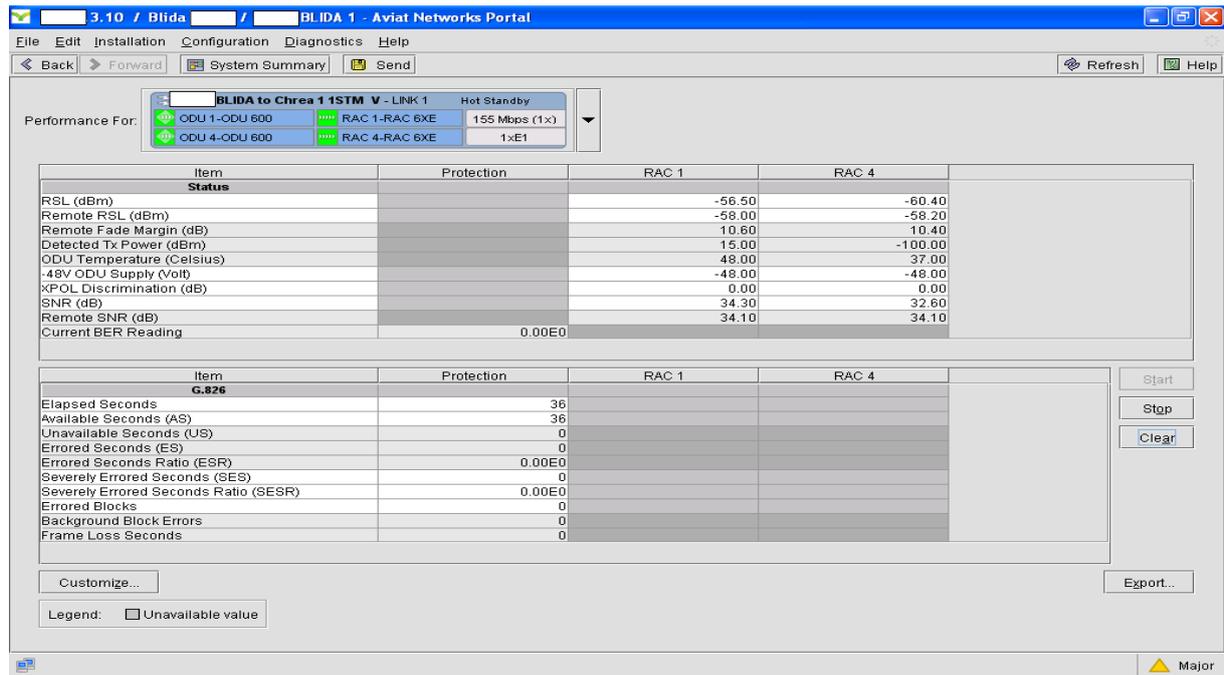


Figure IV.10 : Le tableau performance.

IV.3.6 Création des circuits

Pour rejoindre cette fenêtre, il faut aller au menu CONFIGURATION, puis choisir CIRCUIT. Dans ce volet, on procède à la création des circuits entre les différents modules, dans notre cas, on doit récupérer tout le trafic venant de Chr ea au niveau de Blida, alors on a crée un circuit de 155Mbps/s entre le module RAC 6XE et DAC 155(DAC : digital Access) qui offre la possibilité de récupérer les données sur son port optique

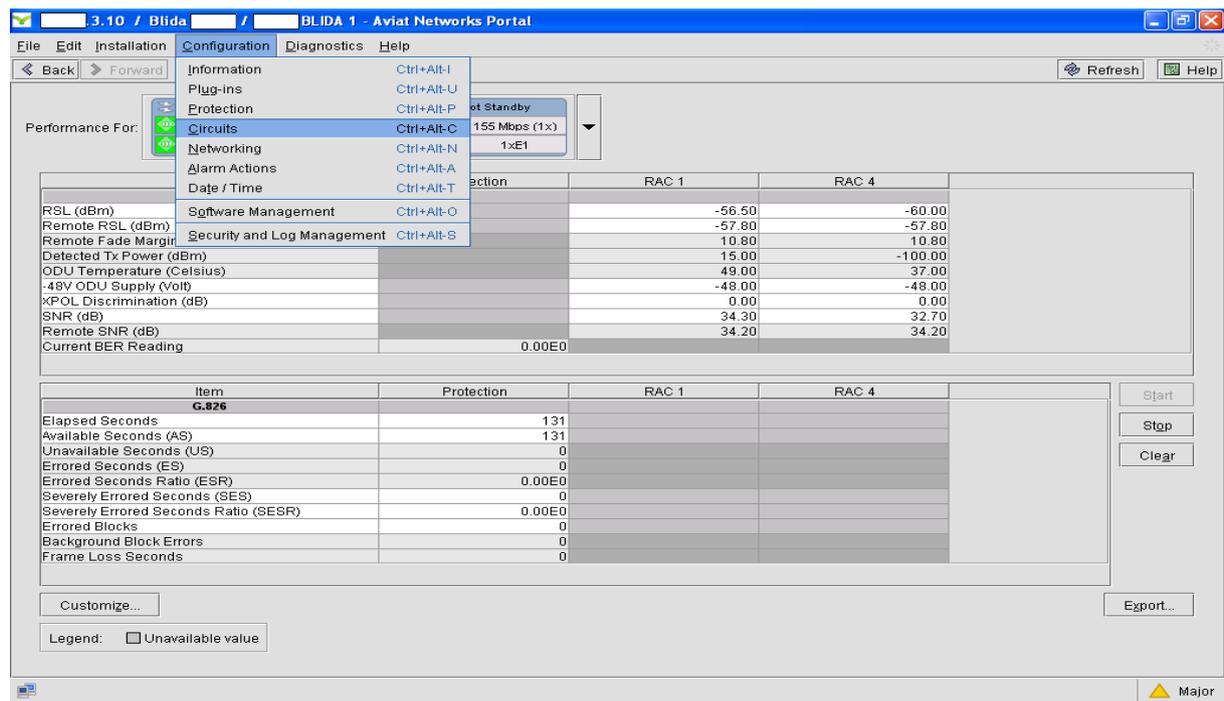


Figure IV.11 : Chemin d'accès au menu circuit

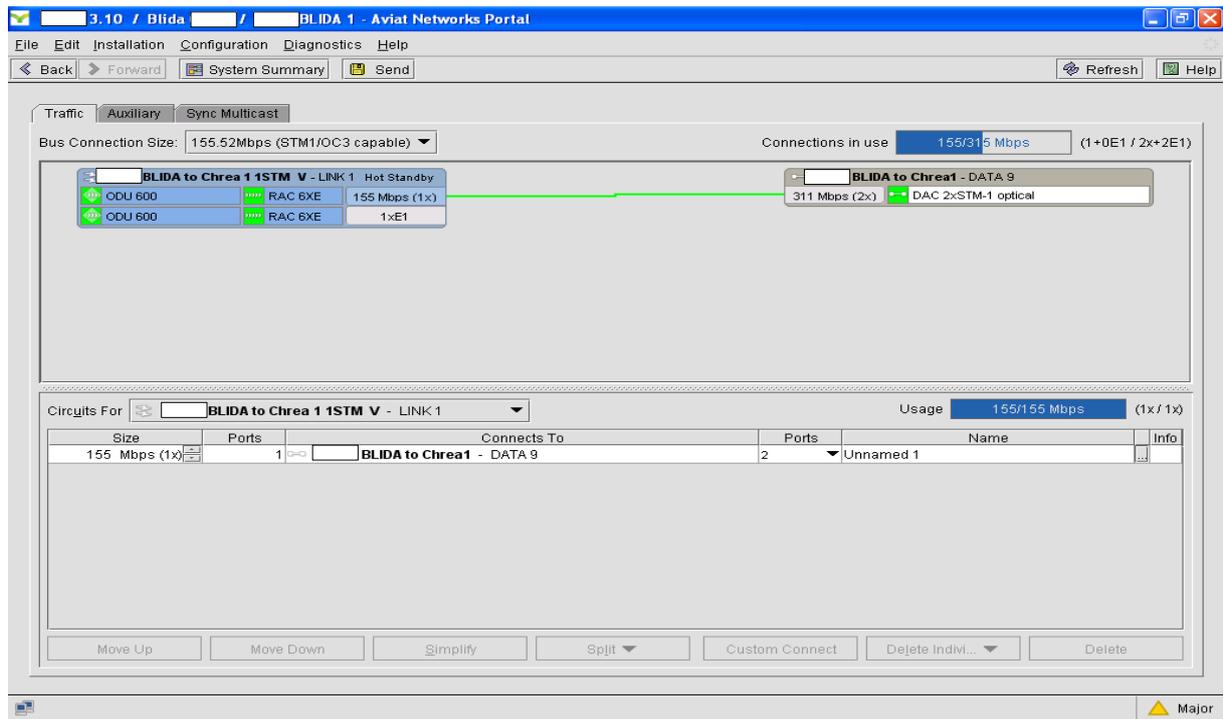


Figure IV.12 : La création du circuit

IV.3.7 Configuration de l'adresse IP de la radio

Afin de gérer la radio à distance, cette dernière doit être bien configurée, le volet NETWORKING dans le menu CONFIGURATION permet de définir l'adresse IP adéquate, le Protocol de routage, les différentes routes...etc. pour que cette radio soit visible sur la plateforme de supervision PROVISION.

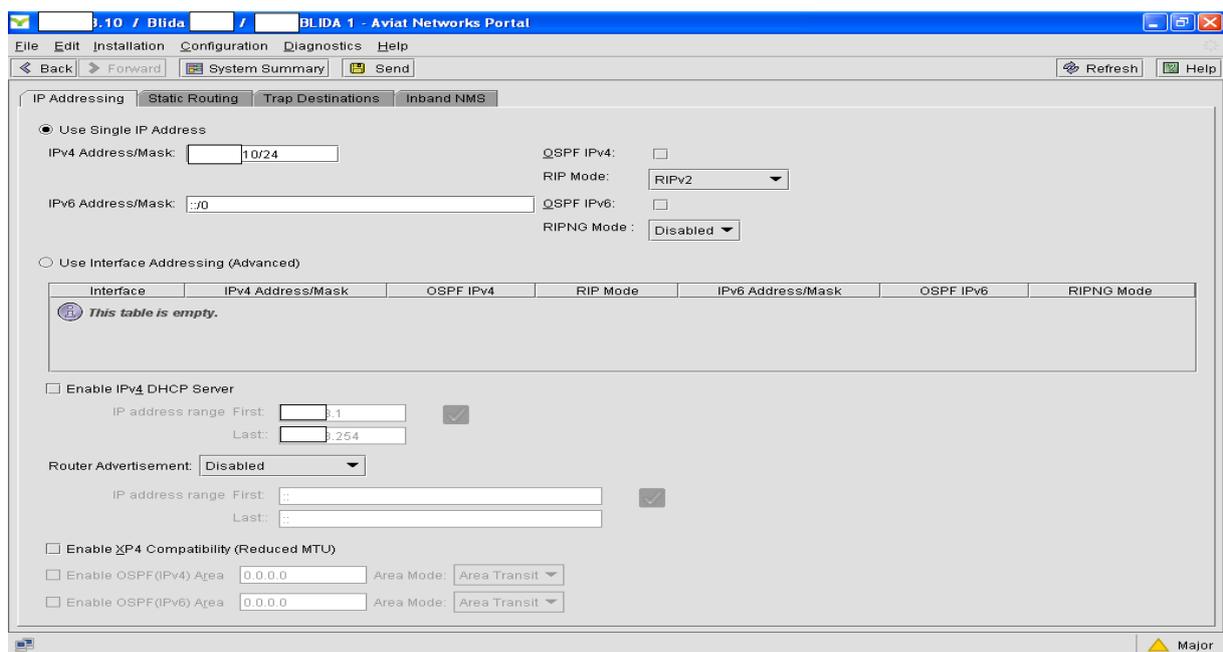


Figure IV.13 : Configuration réseau de la radio

IV.3.8 Lecture des alarmes

La lecture des alarmes nous permet de connaitre si la configuration a été bien faite, et q' il n y a pas d'anomalie sur la radio.

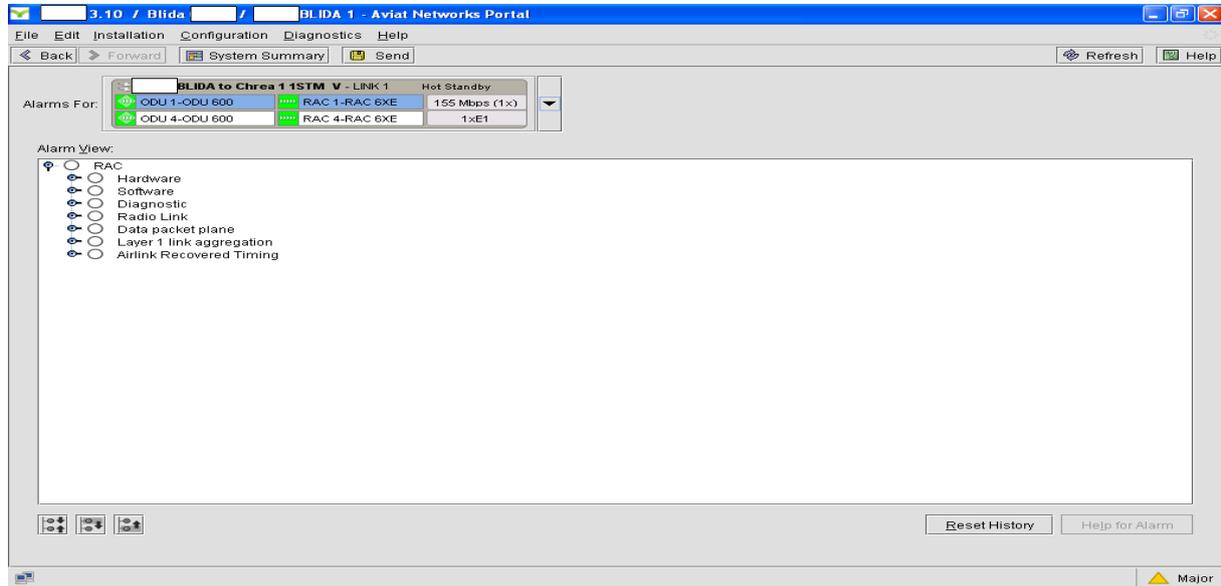


Figure IV.14 : Lecture des alarmes

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre, on a vu en détails comment configurer la radio ECLIPSE à l'aide de l'outil PORTAL, et aussi la vérification des alarmes, ainsi que la configuration réseau qui permettra la supervision à distance de cette radio.

CONCLUSION GENERALE

Le présent projet concerne le Dimensionnement d'une liaison hertzienne dans un réseau TETRA accompagné d'une application.

Le travail a été entamé par une présentation globale du réseau TETRA, ses caractéristiques ainsi son fonctionnement. Le domaine du faisceau hertzien, beaucoup plus la propagation des ondes électromagnétiques avec des détails sur la canalisation de ces ondes a été présenté.

Pour avoir des détails sur la transmission par faisceau hertzien, nous avons choisi d'étudiés une liaison sur le plan de transmission de « TETRA », commençons par l'étape de planification avec une sérié de simulation qui traite le bilan de la liaison, en utilisant le logiciel pathloss5.1.

Enfin, on a complété le travail par un stage pratique dont laquelle on a assisté à l'installation d'une liaison bien définie (Blida vers Chréa), puis nous avons participé à toutes les étapes de l'installation de la liaison depuis la configuration jusqu'à sa mise en service, certains paramètres ont été évalués, tel que le bilan de la liaison, en utilisant le logiciel de configuration de l'équipement **Portal Aviat Network**.

Ce travail nous a permis d'enrichir nos connaissances acquises durant le cycle de formation en graduation et d'acquérir une certaine expérience du monde professionnel.

Comme perspectives, il est souhaitable dans l'avenir de faire d'autres simulations et d'autres applications sur d'autres liaisons.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Michèle Germain, « Les réseaux PMR », Un livre blanc de Forum ATENA, 2014, <https://docplayer.fr/16262117-Les-reseaux-pmr-un-livre-blanc-de-forum-aten-a-un-livre-blanc-1-43-par-michele-germain-presidente-de-l-atelier-d-ecriture-de-forum-aten-a.html>
- [2] Jochen H. Schiller, « Mobile Communications Wireless Télécommunication Systems », Cours en ligne, Université libre de Berlin, 2020.
- [3] Rohde & Schwarz, « TETRA – la norme numérique pour les radiocommunications mobiles professionnelles », https://cdn.rohde-schwarz.com/pw_s/dl_downloads/dl_common_library/dl_news_from_rs/178/n178_tetra_fr.pdf Magazine entreprises de Hub télécom, No 178 (II), 2003.
- [4] HTTP://www.etsi.org/deliver/etsi_etr/300_399/30001/01_60/etr_30001e01p/la-norme-tetra.htm, (avril 2020)
- [5] Mahinth Christensen, « TETRA mobile communication », Slides of Exécutive – Marketing at Ripples Learning innovative, published on Jun 14, 2009
- [6] John Dunlop, Demessie Girma, James Irvine, « Digital Mobile Communications and the TETRA System », Edition Wiley-Blackwell, ISBN-13: 978-0471987925, Août 1999.
- [7] DEFFA Abdelghani, DAR KEBIRA Fatima-Zohra, « Planification et conception d'un réseau PMR basé sur la norme TETRA », Mémoire de fin d'études pour l'obtention d'un diplôme de Master en Télécoms (TST), Université Abou Bakr Belkaid -Tlemcen, Mai 2017
- [8] OFCOM, Notice d'information TETRA, Radiocommunication terrestre à ressources partagées, https://www.bakom.admin.ch/dam/bakom/fr/dokumente/faktenblatt_tetra.pdf.download.pdf/notice_d_information.pdf, 7 juillet 2015.
- [9] Rap. UIT-R M.2014, « Systèmes mobiles terrestres numériques à haute efficacité spectrale pour trafic de dispatching », https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2014-1998-PDF-F.pdf, UIT-R 37/8, (1998).
- [10] Http://www.3gpp.org/tsg_ran/wg1_rll/TSGR1_68/Docs/R1-120403.htm (mars 2020).
- [11] Alexandre Boyer, antennes & outils et modeles pour la transmission, support de cours, http://www.alexandre-boyer.fr/alex/enseignement/cours_antennes_outils_modeles_transmission_oct14_v3.pdf Octobre 2014.
- [12] Louis.Reynier – Liaisons hertziennes1, cours, [http://www.louisreynier.com/fichiers/Liaison %20hertzienne%201.pdf](http://www.louisreynier.com/fichiers/Liaison%20hertzienne%201.pdf).

- [13] Léon Beya Kalamba, interconnexion entre 2 réseaux cellulaires des normes GSM par faisceau hertziens, https://www.memoireonline.com/03/12/5461/m_Interconnexion-entre-deux-reseaux-cellulaires-des-normes-GSM-par-faisceau-hertziens-cas-de-CCT-et.html.
- [14] A. Nlandu, «Etude d'un réseau de transmission d'information par faisceau hertzien entre deux ports de la province du bas- Congo. Cas de port de Matadi et Boma en RDC», <https://www.memoireonline.com/10/13/7633/Etude-d-un-reseau-de-transmission-d-information-par-faisceau-hertzien-entre-deux-ports-de-la-provin.html>,2012.
- [15] Jean-Philippe Muller, les modulations numériques dans les systèmes de communication, Cours,http://themorrealeworld.free.fr/Francais/Cours/Physique/ta-formation/Modulation_numerique.pdf, 2000.
- [16] <HTTPS://slideplayer.fr/slide/1192154/3/images/8/Diff%C3%A9rents+types+de+modulation.jpg>
- [17] Zimmer Baptiste, Instalation Et Mise En Service Faisceau Hertzien Alcatel9400ux, Institut Universitaire de Technologie - Université de Lorraine Nancy Brabois, http://www.theotech.sitew.com/fs/Root/cf18g-FAISCEAU_HERTZIEN.pdf.
- [18] HTTPS://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/rayonnement/1-rayonnement-electromagnetique/ressources/images/onde_electromag.png
- [19] HTTPS://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AAAd9GcSSQ9RrKDv2M2LIomSPOYcyzSzVNOgm3hy_qg&usqp=CAU
- [20] <HTTPS://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%1AAN9GcQHtjDkhQYudD9I1gCSv8vBJsjIWgCTSjoXkg&usqp=CAU>
- [21] Abderrahmane Ouangraoua, Réseau de Transmission par faisceau Hertzien pour un réseau CDMA ,2008.
- [22] Alexandre Boyer, Antennes (support de cours et énoncé de travaux dirigés), institut national des sciences appliquées de Toulouse, (Octobre 2011).
- [23] Recommandation UIT-R P.530-17, Données de propagation et méthodes de prévision nécessaires pour la conception de faisceaux hertziens à visibilité directe de Terre, https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.530-17-201712-I!!PDF-F.pdf (12/2017).
- [24] Louis REYNIER - TS SE : Bilan de liaison – Application SFH534,<http://www.louisreynier.com/fichiers/BILAN%20DE%20LIAISON%20HERTZIENNE.pdf>
- [25] <HTTP://www.multicap.be/upload/w360/Aviat%20Networks%20Eclipse%20Nodal.png>

- [26] Aviat Networks, Inc. (2011-2016) All Rights Reserved. Data subject to change without notice. _d(sf)_ODU600_ANSI_14Jul16_draft
- [27] ÉCLIPSE. Manuel d'installation Bande sans licence de 5,8 GHz. Rev.002, octobre.