

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Télécommunications

Spécialité : Réseaux et télécommunications

Par : **Lazar Yassamine** et **Ziani Sarra**

Sujet

**Mise en œuvre d'un réseau d'exploitation TETRA pour les lignes des
Bus universitaires**

Soutenu publiquement, le **24 /06/ 2018**. Devant le jury composé de :

Mr Merzougui . R	Maître de Conférences	Univ. Tlemcen	Président
Mr Zerrouki. H	Maître de Conférences	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
Mr Moussaoui. D	Maître de Conférences	Univ. Tlemcen	Examineur

Dédicaces

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tout simplement que : Je dédie ce travail à tous ce qui me sont chers.

A La mémoire de mon grand-père Azzedine

Qui a été toujours dans mon esprit. J'aurais tant aimé que tu sois présent. Que dieu miséricordieux, t'accueille dans son éternel paradis.

A mes chers parents Hamid et Samira

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez. Puisse Dieu, le très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

A ma jumelle Meriem

Ma chère sœur qui m'est la sœur et l'amie, les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour toi.

A mes deux frères Imad et El Hadi

Pour toute la complicité et l'entente qui nous unis, ce travail est un témoignage de mon attachement et de mon amour. Que dieu vous protège et vous accorde santé et bonheur.

A mon binôme Sarra

Pour son support continu, soutien, encouragement et pour les bons moments qui ont permis de donner naissance à ce modeste projet.

A mes chers ami(e)s

Hidayet, Houda, Hadjer, Selma, Samia, Zineb, Fouzia, Imane, Ines, Akila, Imane T, Nassim, Anes, Oussama, Ilyes, Zoubir

En témoignage de l'amitié qui nous uni et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble, je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

À toute ma famille en témoignage de ma grande affection et de ma reconnaissance et sans qui je ne serais rien, À tous mes enseignants et à tous ceux qui m'ont aidé, En témoignage de mon amour et de ma reconnaissance.

Yassamine...

Dédicaces

A mes chers parents MEKKI et NAZIHAT EZZAMEN

Pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chères sœurs LAMIA LEYLA, IKRAM, IMANE

Pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A mon cher frère MOHAMMED RIYAD,

A ma chère grand-mère, qui m'a accompagné par ses prières, sa douceur, puisse Dieu lui prêter longue vie et beaucoup de santé et de bonheur,

A mon cher petit neveu ABDEL FETTAH,

A mes chers oncles, tantes, leurs époux et épouses,

A mes chers cousins, cousine,

A toute ma grande famille ZIANI, DOUIDI

A ma chère binôme YASSAMINE et à toute la famille LAZAR

A mes chers ami(e)s

ATIKA, ZINEB, NOUR EL HOUDA, IMANE.T, AKILA,

INES, IMANE, ANES, OUSSAMA, NASSIM, ZOUBIR, HICHAM, HOUCINE.....

Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagné durant mon chemin d'études,

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce mémoire soit possible,

Je vous dis merci.

Sarra...

Remerciement

*On remercie **Allah** le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.*

*Nous tenons d'abord à remercier très chaleureusement Mr. **Zerrouki Hadj**, Maitre de conférences à l'université de Tlemcen, qui nous a permis de bénéficier de son encadrement.*

Les conseils qu'il nous a prodigué, la patience, la confiance qu'il nous a témoignés ont été déterminants dans la réalisation de notre travail de recherche.

Nous sommes conscientes de l'honneur que nous a fait

*Nos remerciements vont aussi à Mr. **Merzougui Rachid**, Maitre de conférences à l'université de Tlemcen, en étant président du jury et Mr. **Moussaoui Djillali**, Maitre assistant à l'université de Tlemcen, d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

Nos remerciements s'étendent également à tous nos enseignants durant les années des études.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours encouragées au cours de la réalisation de ce mémoire.

Merci à tous et à toutes.

Résumé :

Le système TETRA est un réseau radiocommunication numérique mobile destiné à des utilisateurs définis. Cette norme européenne a permis d'encadrer l'allocation des ressources radios pour les services publics, notamment l'armée et les services de secours, ou les autorités de transport. La technologie TETRA offre un réseau de communications privé qui apporte la flexibilité, l'évolutivité et la sécurité nécessaires pour répondre aux besoins présents et futurs des entreprises de transport public.

L'objectif principal de ce projet de fin d'étude est de déployer un réseau de radiocommunication numérique partagé, utilisant une infrastructure TETRA assurant une meilleure couverture radio des lignes de Bus de l'université et une flexibilité des services de phonie et de données. Le déploiement de réseau TETRA s'est effectué sur une échelle d'une ville. Nous proposons à développer un outil de simulation basé sur des modèles mathématiques puis en exploitant l'outil de planification et l'optimisation "Atoll" pour mener à bien cette phase qui consiste à planifier et dimensionner le réseau TETRA en termes du nombre de stations de bases à implémenter et de débit offert.

Mots clés : Système TETRA, PMR, réseaux de transport, dimensionnement, Optimisation, Station de base, capacité.

Abstract:

The TETRA system is a digital mobile radio network for designed for defined users. This European standard norm has made it possible to regulate of the radio resources allocation for public services, in particular the army and emergency services, or transport authorities. TETRA technology offers a private communications network that provides the flexibility, scalability and security necessary to meet the present and future needs of public transport companies.

The main objective of this final project of the study is to deploy a shared digital radio network using a TETRA infrastructure, ensuring better radio coverage of University Bus lines and flexibility of voice and data services. The deployment of the TETRA network was carried out on a scale of city. We propose to develop a simulation tool based on mathematical models then using the planning and optimization tool "Atoll" to carry out this phase which consists in planning and dimensioning the TETRA network in terms of the implemented number of base stations and the offered throughput.

Keywords: TETRA system, PMR, networks of transport, dimensioning, optimization, base station, capacity.

TABLE DES MATIERES

Dédicaces..... I

Remerciement III

Résumé et Abstract IV

Tables des matières..... V

Liste des figures et tableaux X

Acronymes et abréviations..... XII

Introduction générale..... 1

CHAPITRE I : Généralités sur les réseaux cellulaires et PMR

I.1 Introduction..... 4

I.2 L'évolution des systèmes radio cellulaire..... 4

I.3 La première génération (1G) 5

I.4 La deuxième génération 5

 I.4.1 Le réseau GSM (2G) 5

I.4.1.1 Architecture du GSM 5

 a) La station mobile (MS)..... 6

 b) Le sous-système radio BSS (Base Station Subsystem) 6

 c) Le sous-système d'acheminement NSS (Network Switching Subsystem) 7

 d) Le sous-système d'exploitation et de maintenance OSS (Operation SubSystem) 9

 I.4.2 Le réseau GPRS (2.5G) 9

 a) Le nœud de service (SGSN) : 10

 b) Le nœud de passerelle (GGSN) : 10

 c) Le module BG pour la sécurité : 10

 I.4.3 Le réseau HSCSD ou EDGE (2.75G) 11

I.5 La troisième génération 3G 11

 I.5.1 Le réseau UMTS (3G) 11

I.5.1.1 Architecture de L'UMTS 11

 a) Le terminal utilisateur 11

 b) Le réseau d'accès radio (UTRAN) 12

 c) Le réseau cœur (CN) 12

 I.5.2 La technologie HSDPA (3.5G ou 3G+) 13

 I.5.3 La technologie HSUPA (3.75G ou 3G++) 13

I.6 La quatrième génération 13

1.6.1 LTE (Long Term Evolution) (3.9G).....	13
1.6.2 Le réseau LTE-Advanced (4G).....	14
I.7 Le réseau PMR.....	14
I.7.1 Introduction PMR	14
a) Un réseau sécurisé	14
b) Un réseau privé	15
c) Les autres réseaux.....	15
I.7.2 Classifications des systèmes PMR	15
a) Réseaux sans site fixe	16
b) Réseaux mono-site	16
c) Réseaux multi-sites.....	16
I.7.3 Organisation des utilisateurs et des organismes sous le système PMR.....	17
I.7.4 Qualités d'un réseau PMR	17
a) Communication à l'alternat.....	17
b) Temps d'établissement court.....	18
c) Sécurité des postes.....	18
I.7.5 Les technologies de PMR.....	18
I.7.5.1 La PMR analogique	18
a) Le réseau radio professionnels (2RP)	18
b) Le réseau radioélectrique à ressources partagées (3RP)	19
I.7.5.2 La PMR numérique (DMR).....	19
a) TETRAPOL (1987).....	19
b) TETRA (1989)	19
c) APCO 25 phase 1 (1989).....	20
d) APCO 25 phase 2 (2010)	20
e) La DMR (2005)	20
I.7.6 Le marché de la PMR	20
I.7.7 Les utilisateurs.....	20
a) Les usagers	21
b) Les opérateurs.....	21
I.8 Conclusion	21

CHAPITRE II : La norme TETRA (Terrestrial Trunk Radio)

II.1 Introduction..... 23

II.2 La norme TETRA..... 23

II.3 L'Architecture d'un réseau TETRA 24

 II.3.1 Console d'administration de réseau (console de service)..... 26

 II.3.2 Le Dispatcher (DWS : *Dispatcher WorkStation*) 26

 II.3.3 Les Switchs (TSC) 28

 II.3.4 Station de base (TBS) 28

 II.3.4.1 Les micros station de base (*micros TBS*) 28

 II.3.5 Le mobile TETRA (TMS)..... 29

II.4 Les différent type de communication TETRA 29

 II.4.1 Mode direct (mode I) 30

 II.4.2 Mode direct (mode II) 30

II.5 L'interface radio TETRA 31

 II.5.1 Structure des canaux 31

 II.5.2 Structure des slots 31

 II.5.3 Type de modulation..... 32

 II.5.4 Description des canaux..... 33

 II.5.4.1 Les canaux physiques..... 33

 II.5.4.2 Les canaux logiques 34

 II.5.5 Procédures de gestion des appels 34

 II.5.5.1 Mise en œuvre du codec ACELP 35

 II.5.5.2 Le codage canal 35

 II.5.6 Stratégies trunking utilisées par TETRA..... 36

 II.5.6.1 Trunking au niveau message 36

 II.5.6.2 Trunking au niveau transmission..... 36

 II.5.7 Gestion de la localisation..... 36

 II.5.7.1 Le Handover 37

II.6 TETRA Version 2 (TETRA 2) 37

 II.6.1 Range Extension 37

 II.6.2 TETRA Enhanced Data Service (TEDS) 37

II.7 Les avantages et inconvénients de TETRA..... 38

 II.7.1 Les avantages de TETRA 38

 II.7.2 Les inconvénients de TETRA 39

II.8 Conclusion 40

CHAPITRE III : Etude de la planification du réseau TETRA

III.1 Introduction..... 42

III.2 Dimensionnement du réseau TETRA 42

III.3 Processus de dimensionnement du réseau TETRA 42

 a) Pré-dimensionnement..... 43

 b) Dimensionnement par couverture..... 43

 c) Dimensionnement de capacité..... 43

 d) Optimisation 44

III.4 Dimensionnement orienté couverture..... 44

 III.4.1 Propagation dans l’environnement radio 45

 a) Zone de Fresnel 45

 b) Effet trajets multiples 45

 III.4.2 Le bilan de liaison 46

 III.4.3 Modèles de propagation 47

III.4.3.1 Catégories des modèles de propagation 47

 a) Modèle Macro-cellule 47

 b) Modèle Micro-cellule 47

 III.4.4 Modèles de propagation utilisés 48

III.4.4.1 Modèle empirique macro-cell Okumura-Hata..... 48

 a) Urbain 48

 b) Sous Urbain 48

 c) Rurale 48

 III.4.4.2 Le modèle Standard Propagation Model 49

 III.4.5 Calcul de la couverture pour l’Uplink 49

III.4.5.1 Débit requis..... 49

III.4.5.2 Sensibilité TBS récepteur 50

III.4.5.3 Pertes dans les câbles et les connecteurs (dB) 50

III.4.5.4 Perte du corps (dB) (Body loss) 51

III.4.5.5 Bilan de liaison pour le lien montant 51

 a) PIRE (Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente) 51

 b) MAPL (Maximum Allowable Path Loss)..... 52

 III.4.6 Calcul de la couverture pour Downlink 53

 a) PIRE 53

b) MAPL 53

c) La sensibilité du l'équipement utilisateur récepteur 53

III.4.7 Estimation du rayon de la cellule 54

III.4.8 Estimation du nombre de sites..... 54

III.5 Dimensionnement par capacité 55

III.5.1 Débit de la cellule 56

III.5.2 Allocation des fréquences 56

III.6 L'outil de dimensionnement du réseau TETRA 56

III.6.1 Interface d'accueil 56

III.6.2 Dimensionnement d'un réseau Tetra « Uplink » et « Downlink » 57

III.6.3 Résultat de dimensionnement 58

III.7 Conclusion 59

CHAPITRE IV : Planification et déploiement d'un réseau TETRA

IV.1 Introduction 62

IV.2 Présentation de l'outil ATOLL..... 62

IV.2.1 Procédure de la planification 62

IV.2.2 Interfaces de logiciel 63

IV.2.3 Systèmes de coordonnées 64

IV.2.4 Importer les cartes numériques..... 65

IV.2.5 Zone géographique à planifier 66

IV.3 Ajout des sites 68

IV.3.1 Analyse des tronçons 69

IV.4 Etude des prédictions..... 70

IV.4.1 Prédictions de la couverture par niveau de signal 70

IV.4.2 Prédictions de la zone de recouvrement 72

IV.4.3 Prédictions par secteur (Emetteur)..... 73

IV.5 Conclusion 74

Conclusion générale 75

Bibliographie 77

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : *L'évolution des réseaux cellulaires.* 4

Figure I.2 : *Architecture globale du réseau GSM .* 6

Figure I.3 : *L'architecture du BSS .* 7

Figure I.4 : *L'architecture du NSS .* 8

Figure I.5 : *Architecture du réseau GPRS .* 10

Figure I.6 : *Architecture du réseau UMTS.*..... 12

Figure I.7 : *Réseau PMR sans site fixe.* 16

Figure I.8 : *Réseau PMR mono-site.*..... 16

Figure I.9 : *Réseaux à couverture multisite.* 17

Figure II.1 : *Architecture du réseau TETRA.* 25

Figure II.2 : *L'architecture interne d'un poste dispatching.* 27

Figure II.3 : *Switch ou commutateur TETRA.* 28

Figure II.4 : *La micro TBS répéteur mobile.*..... 29

Figure II.5 : *Mobile TETRA TMS (TETRA Mobile Station).* 29

Figure II.6 : *Mode direct sans répéteur.*..... 30

Figure II.7 : *Mode direct avec répéteur (micro TBS).* 30

Figure II.8 : *Structure des canaux au niveau TETRA.* 31

Figure II.9 : *Structure des trames TETRA.* 32

Figure II.10 : *Constellation modulation $\pi/4$ -DQPSK.* 33

Figure II.11 : *Procédure de Gestion des Appels.* 35

Figure III.1 : *Les étapes du processus de dimensionnement.*..... 42

Figure III.2 : *Les étapes du processus de dimensionnement par couverture.* 43

Figure III.3 : *Calcul de dimensionnement de couverture.* 44

Figure III.4 : *Diffraction et zone de Fresnel.* 45

Figure III.5 : *Propagation par trajets multiples.* 46

Figure III.6 : *Connexions du système d'alimentation de l'antenne.* 51

Figure III.7 : *Modèle bilan de liaison Uplink.* 52

Figure III.8 : *Modèle bilan de liaison Downlink.*..... 53

Figure III.9 : *Modèle hexagonales de cellule.*..... 54

Figure III.10 : *Interface d'accueil de l'application.*..... 57

Figure III.11 : *Paramètres de bilan de liaison en « Uplink » et en « Downlink ».* 58

Figure III.12 : *Connexions du système d'alimentation de l'antenne.*..... 59

Figure IV.1 : *L'interface de démarrage d'ATOLL.*..... 63

Figure IV.2 : *Choix du projet.* 64

Figure IV.3 : *Choix du système de coordonnées.* 64

Figure IV.4 : *Liste des systèmes de coordonnées.* 65

Figure IV.5 : *Importation de la Map numérique de la ville de Tlemcen.*..... 65

Figure IV.6 : Carte avec Clutter classes, Clutter height et Vector. 67

Figure IV.7 : Tableau représente la légende de Tlemcen ville. 67

Figure IV.8 : Focus de la zone à planifier. 68

Figure IV.9 : Emplacement des sites TETRA sur la Map. 69

Figure IV.10 : Test de la liaison site 1 – site 2. 70

Figure IV.11 : Choix de type de prédiction. 71

Figure IV.12 : Prédiction de la couverture par niveau du signal. 72

Figure IV.13 : Statistiques des mesures de niveaux du signal. 72

Figure IV.14 : Prédiction par les zones de recouvrement entre les cellules TETRA. 73

Figure IV.15 : Statistiques des zones de recouvrement entre les cellules TETRA. 74

Figure IV.16 : Prédiction de la couverture par secteur (Emetteur). 74

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III.1 : Paramètres du modèles SPM. 49

Acronymes et abréviation

1-9

1G 1ère Génération

2G 2ème Génération

3G 3ème Génération

4G 4ème Génération

2RP Réseau Radio Professionnels

3RP Réseau Radio à Ressource Partagés

3GPP Third Generation Partnership Project

A

AMRF Accès Multiple à Répartition de Fréquence

AMPS Advanced Mobile Phone System

AUC AUthentication Centre

AACH Access Assignment Channel

ACCH Associated Control Channels

ACELP Algebraic Code Excited Linear Prediction

AGA Air Ground Air

B

BG Border Gateway

BS Base Station

BSS Base Station Sub-system

BER Bit Error Rate (taux d'erreurs sur les bits)

BSC Base Station Controller

BCCH Broadcast Control Channel

BNCH Broadcast Network Channel 3G Les systèmes de 3ème Génération

BSCH Broadcast Synchronisation Channel

BTS Base Transmitter Station

BK Broadcast Block

C

CS Circuit Switched

CCCH Common Control Channel

CLCH Common Linearization Channel

CN Coeur Network

CCH Control Channel

CB Control Burst

D

DCS Distributed Control System

DMR Digital Mobile Radio

DMO Direct Mode Operation (mode direct)

DQPSK Differential Quaternary Phase Shift Keying

D8PSK Differential 8 Phase Shift Keying

DWS Dispatcher Work Station

E

EDGE Enhanced Data Rates for GSM Evolution

EIR Equipment Identity Register

ETSI European Telecommunication Standards Institute

EDACS Enhanced Digital Access Communication System

ECCH Extended Control Channel

F

FDMA Frequency –Division Multiple Access

FACCH Fast Associated Control Channel

G

GPS Global Positioning System

GGSN Gateway GPRS Support Node

GSM Système mondial de communications mobiles

GMSC Gateway MSC

GPRS General Packet Radio Service

H

HSCSD High Speed Circuit Switched Data

HSDPA High Speed Downlink Packet Access

HSUPA High Speed Uplink Packet Access

HLR Home Location Register

I

IMT International Mobile Telecommunications

IP Internet Protocol

IMEI International Mobile Equipment Identity

ISI Inter System Face

L

LB Linearization Burst

LTE Long Term Evolution

M

ME Equipment Mobile

MSC Mobile-services Switching Center

MCCH Main Control Channel

MS Mobile Station

MAC Media Access Control

N

NMT Nordic Mobile Telephone

NMC Network Management Centre

NSS Network Sub-System

NB Narrowband (bande étroite)

NUB Normal Uplink Burst

NDB Normal Downlink Burst

O

OMC Operations and Maintenance Centre

OFDM Orthogonal Frequency-Division Multiplexing

OSI Open Systems Interconnections

OSS Operation Sub-System

P

PSTN Public Land Mobile Network

PS Packet Switched

PLMN Public Land Mobile Network

PAMR Public Access Mobile Radio

PDO Packet Data Optimised

PMR Private Mobile Radio

PABX Private Automatic Branch Exchange

Q

QAM Quadrature Amplitude Modulation

R

RCP Rich Client Platform

RNIS Integrated Service Digital Network

RTCP Réseau Téléphonique Commuté Public

RTC Réseau Téléphonique Commuté

RNC Radio Network Controller

S

SGSN Serving GPRS Support Node

SB Synchronisation Burst

STCH Stealing Channel

SACCH Slow Associated Control Channel H

SCH Signalling Channel

SAE System Architecture Evolution

SIM Subscriber Identity Module

T

TACS Total Access Communication System

TMN Telecommunications Management Network

TDMA Time Division Multiple Access (accès multiple par répartition dans le temps)

TEDS TETRA Enhanced Data Service

TETRA Terrestrial Trunked Radio

TCH/S Speech Traffic Channel

TCH/D Data Traffic Channel

TSC Tetra Switch Center

TMS Tetra Mobile Station

U

UE User Equipment

USIM UMTS Subscriber Identity Module

UTRAN Universal Terrestrial Radio Access Network

UMTS Universal Mobile Telecommunication System Interference

V

VLR Visitor Location Register

V+D Voice plus Data

W

WB Wideband (large bandes)

WIMAX Worldwide Interoperability for
Microwave Access

Introduction générale

TETRA est une norme cellulaire numérique de radiocommunication à ressources partagées, destinée à la transmission de la voix et de données. Malgré sa grande complexité, le principe technique unifié de TETRA devrait garantir une grande flexibilité et de trouver des solutions économiquement plus avantageuses.

Dans le but d'harmoniser les moyens de télécommunications en Europe, ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) a conçu un standard de radiocommunication numérique bidirectionnel appelé TETRA pour répondre à la demande de services de communication plus efficaces et plus souples émanant d'utilisateurs de radiotéléphonie tant à accès privé qu'à accès public, elle vise également à pouvoir apporter une réponse aux nombreux problèmes techniques et commerciaux liés au développement des systèmes de radiotéléphonie au cours du 21ème siècle.

Les systèmes de radiocommunication à ressources partagées se différencient des systèmes publics de téléphonie mobiles tels que l'UMTS ou le LTE surtout par la rapidité d'établissement de la communication, les appels de groupe, les appels prioritaires, le cryptage de bout en bout et la possibilité de relier directement deux stations mobiles sans passer par une station de base. TETRA est utilisé en particulier, principalement, par des groupes d'utilisateurs fermés comme les services de transports, les aéroports, les entreprises d'énergie et les organes de sécurité. 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.

Le présent rapport, préparé dans le cadre du projet de fin d'études, pour objectif de la planification radio et la mise en œuvre un réseau d'exploitation TETRA pour la couverture d'une partie de ville de TLEMCEN et plus précisément, les lignes de Bus universitaires de TLEMCEN.

Ce mémoire sera divisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre donnera un aperçu général des différentes normes de téléphonie mobile de la 1^{ère} génération (1G) à la quatrième génération, et enfin une introduction à la technologie de radiocommunication mobile professionnelle (PMR).

Le deuxième chapitre donnera un aperçu global sur la norme TETRA, son architecture, ses caractéristiques, ses spécifications techniques et les méthodes *Trunking* utilisées pour la gestion du trafic.

Le troisième chapitre sera consacré au dimensionnement du réseau TETRA dans lequel nous expliquons en détails le processus de dimensionnement ainsi que les différentes interfaces de notre outil et son principe de fonctionnement.

Enfin, le dernier chapitre présentera d'une façon détaillée les démarches de mise en place de l'application à l'aide du fameux logiciel de dimensionnement et d'optimisation des réseaux radiocommunications ATOLL.

Finalement, une conclusion récapitule notre travail et présente les connaissances acquises suite à ce projet de fin d'étude.

Chapitre I :

Généralités sur les réseaux

cellulaires et PMR

I.1 Introduction

Le système radiocommunication professionnelle est la forme la plus ancienne de communication mobile. Généralement est simple en terme d'équipement et de gestion, il offre de nombreux avantages par rapport aux autre réseaux cellulaire. Ce dernier n'a pas connu d'évolution technique jusqu'aux années 1970 au le réseau 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 du spectre radio par l'utilisation des techniques avancées pour augmenter l'efficacité spectrale en mettant plusieurs canaux pour un groupe d'utilisateur. Ce système qui est basé sur cette technique appelé (réseaux radio à ressource partagés 3RP).

Dans ce chapitre, nous allons présenter une vue d'ensemble de l'évolution des systèmes radio de communication et on va mettre en évidence les réseaux PMR, qui seront aussi traités à la fin de ce chapitre.

I.2 L'évolution des systèmes radio cellulaire

Les progrès technologiques dans le domaine des réseaux de télécommunications mobiles, ont vu l'apparition des technologies numériques au début des années 1990. À chaque génération de réseau mobile (2G, 3G, 3G+, etc.) convient une nouvelle technologie (GSM, GPRS, EDGE, UMTS, LTE). À chaque évolution technologique, le réseau mobile gagne en performance (Figure I.1) : les données transitent plus rapidement. Ces meilleurs débits améliorent la qualité du service existant et permettent de nouveaux usages (Internet mobile, voix sur IP, visiophonie, télévision, etc.) [1].

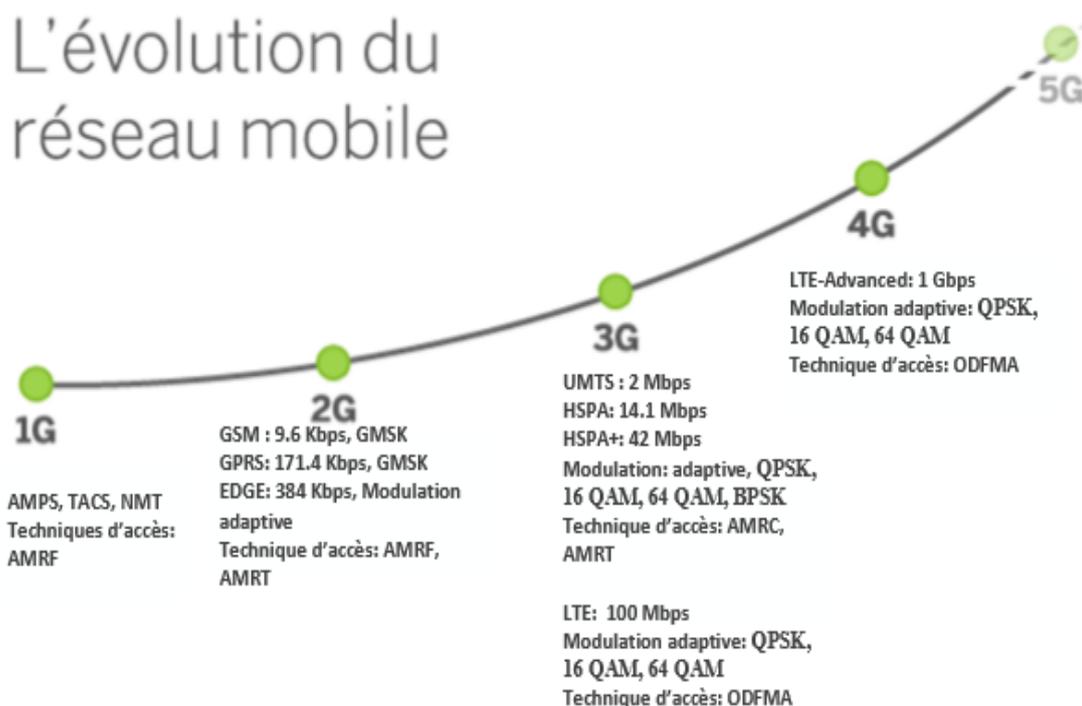


Figure I.1 : L'évolution des réseaux cellulaires.

I.3 La première génération (1G)

La première génération de réseau mobile 1G a été marquée par l'utilisation de la modulation analogique. Elle exploitait l'Accès Multiple à Répartition de Fréquence – AMRF comme technique d'accès au réseau. Fondé sur la commutation de circuit, le 1G était très limité au niveau capacité du réseau et n'offrait que la voix comme service.

Bien que le 1G ne soit pas normalisé, il existait plusieurs variantes selon le pays et la disponibilité des ressources fréquentielles :

- **AMPS (*Advanced Mobile Phone System*)** utilisé en Amérique du Nord, elle opérait entre 824 MHz et 849 MHz en liaison montante et entre 869 MHz et 894 MHz en liaison descendante.
- **NMT (*Nordic Mobile Telephone*)** utilisé en Russie, elle opérait dans la bande des 900MHz, et offrait un débit 1.2Kbps.
- **TACS (*Total Access Communication System*)** utilisé en Europe, comme substitution de l'AMPS, elle travaillait dans la bande des 900MHz.

Les réseaux de la première génération ont été les premiers à permettre à un utilisateur mobile d'utiliser un téléphone de façon continue, n'importe où dans la zone de couverture d'un opérateur.

I.4 La deuxième génération

La 2G a vu un changement de technologie, en passant de la transmission analogique à la transmission numérique. Ces principaux standards sont : le GSM, GPRS, et l'EDGE.

I.4.1 Le réseau GSM (2G)

Le GSM (*Global System for Mobile Communication*) est la première norme de téléphonie cellulaire de seconde génération qui soit pleinement numérique, qui se caractérise notamment par la possibilité d'avoir un échange vocal pour un débit maximal théorique de 9,6 kbit/s. Le réseau radiotéléphonie a pour premier rôle de permettre la transmission de la voix et des données entre des abonnés mobiles et des abonnés du réseau téléphonique commuté (RTC).

- ❖ GSM 900 : système radio mobile à vocation urbaine et rurale (macro cellule) et utilisant la fréquence des 900MHz avec des sous bandes de largeur 25MHz : (890-915) MHz et (935-960) MHz.
- ❖ DCS 1800 : exploite la fréquence 1800 Mhz avec des sous bandes de largeurs 75 Mhz, destiné pour les réseaux mobiles spécialement dans les zones urbaines (microcellule).

I.4.1.1 Architecture du GSM

Pour gérer les spécificités des communications avec les mobiles, le GSM a introduit des équipements qui n'existaient pas dans les réseaux téléphoniques fixes classiques : les PSTN (*Public Land Mobile Network*) ou RTC. Ces équipements, et plus généralement toutes les fonctions

relatives à la gestion des utilisateurs mobiles ont été regroupés dans un type de réseau cellulaire appelés PLMN (*Public Land Mobile Network*).

Un réseau GSM est constitué de trois sous-systèmes (Figure I.2):

- Un sous-système radio, le **BSS** (*Base Station SubSystem*).
- Un sous-système réseau, le **NSS** (*Network Switching SubSystem*).
- Un sous système d'exploitation et de maintenance, l'**OSS** (*Operation Support SubSystem*).

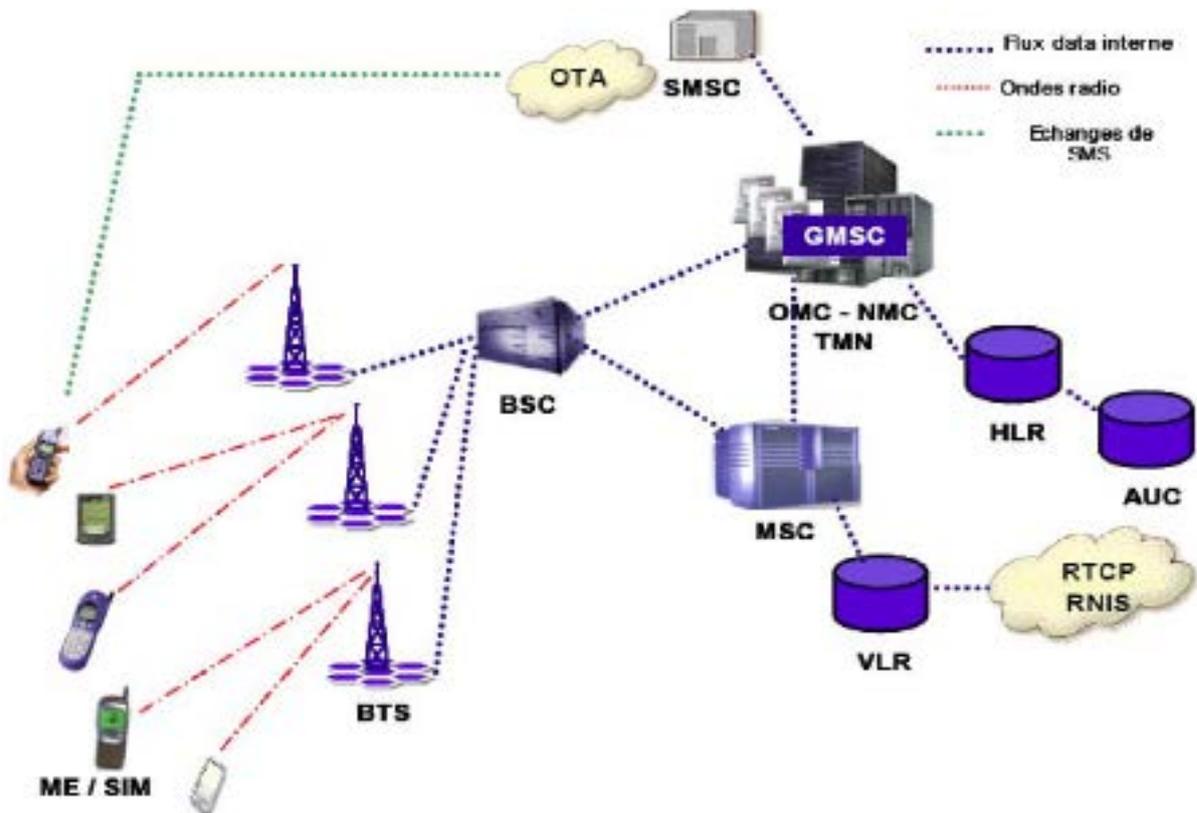


Figure I.2 : Architecture globale du réseau GSM [2].

a) La station mobile (MS)

La MS (*Mobile Station*) n'est autre que l'appareil mobile se trouvant dans la zone de couverture d'opérabilité du BSC. La station mobile se compose de :

- L'équipement mobile (ME).
- La carte SIM.

b) Le sous-système radio BSS (Base Station Subsystem) :

Sa fonction principale est la gestion de l'attribution des ressources radio. Le BSS est composé d'un ensemble regroupant le BSC et les BTS qui lui sont associés (Figure I.3) :

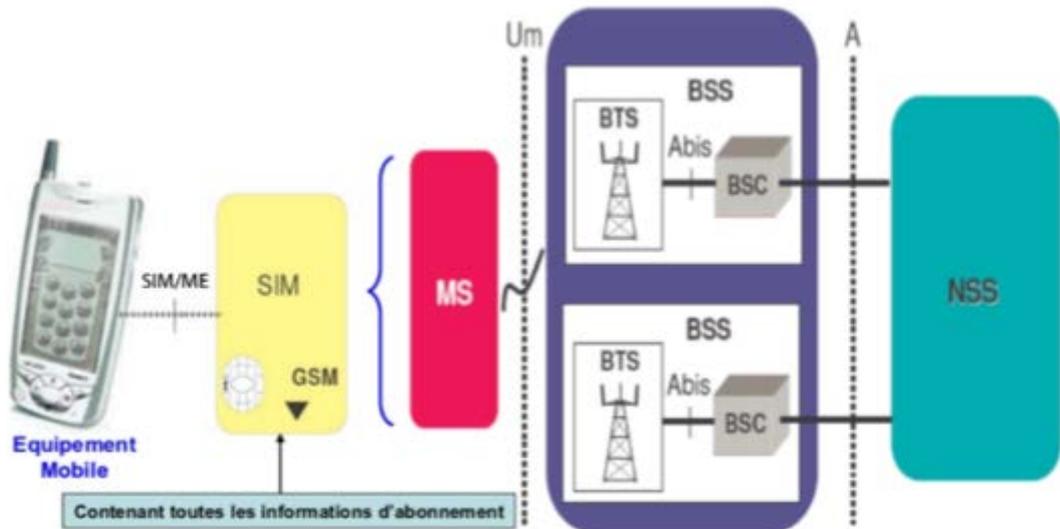


Figure I.3 : L'architecture du BSS [3].

❖ **La BTS (Base Transceiver Station) :**

La BTS est un ensemble d'émetteurs-récepteurs. Elle réalise aussi des mesures radio pour vérifier qu'une communication en cours se déroule correctement (évaluation de la distance et de la puissance du signal émis par le terminal de l'abonné): Ces mesures sont directement transmises à la BSC. Gère aussi toute la couche physique (Multiplexage TDMA, FDMA, chiffrement, sauts de fréquences...).

La capacité d'une BTS est théoriquement de 12 porteuses, chaque porteuse assure 7 communications simultanées par multiplexage, c'est-à-dire qu'elle peut supporter au plus une centaine de communications simultanées

❖ **Contrôleur de station de base (BSC) :**

Le BSC est l'organe intelligent du BSS, il administre un ensemble de station de base BTS. Le contrôleur de station de base BSC assure l'allocation des canaux, la gestion du saut de fréquence, le transfert intercellulaire des communications et la gestion de la signalisation sur voie radio.

c) Le sous-système d'acheminement NSS (Network Switching SubSystem)

Il assure principalement les fonctions de commutation et de routage. C'est donc lui qui permet l'accès au réseau public RTCP ou RNIS. En plus des fonctions indispensables de commutation, on y retrouve les fonctions de gestion de la mobilité, la sécurité et la confidentialité. La figure I.4 schématise l'emplacement et la composition du sous-système d'acheminement NSS.

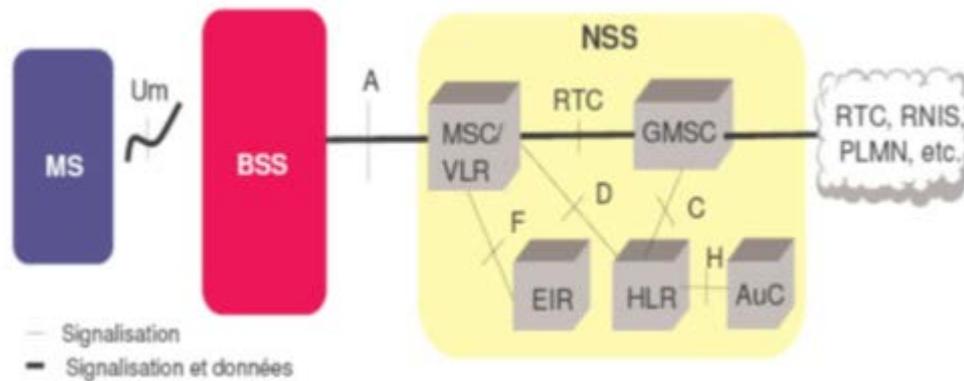


Figure I.4 : L'architecture du NSS [3].

❖ **Le MSC (Mobile Services Switching Center) :**

C'est la partie centrale du NSS. Il prend en charge l'établissement des communications de et vers les abonnés GSM. Du fait de la mobilité, l'implantation de la seule fonction de commutation n'est pas suffisante. Le MSC gère la mobilité et enregistre la localisation des abonnés visiteurs dans la base de données VLR.

Une fonction spécifique de MSC est la passerelle (GMSC : "Gateway MSC") qui coordonne le trafic en provenance d'autres réseaux. Il comprend également les fonctions de commutation, d'interfaçage avec le réseau de signalisation par canal sémaphore.

❖ **Le HLR (Home Location Register) :**

Le HLR est une base de données de localisation et de caractéristiques des abonnés. Un réseau peut posséder plusieurs HLR selon des critères de capacité de machines, de fiabilité et d'exploitation. Le HLR est l'enregistreur de localisation nominale par opposition au VLR qui est l'enregistreur de localisation des visiteurs.

Le HLR est une base de données qui conserve des données statiques sur l'abonné et qui administre des données dynamiques sur le comportement de l'abonné. Les informations sont ensuite exploitées par l'OMC. LAUC est une base de données associée au HLR.

❖ **Le VLR (Visitor Location Register) :**

L'enregistreur de localisation des visiteurs est une base de données associée un commutateur MSC. Le VLR a pour mission d'enregistrer des informations dynamiques relatives aux abonnés de passage dans le réseau, ainsi l'opérateur peut savoir tout instant dans quelle cellule se trouve chacun de ses abonnés. Les données mémorisées par le VLR sont similaires aux données du HLR mais concernent les abonnés présents dans la zone concernée.

A chaque déplacement d'un abonné le réseau doit mettre à jour le VLR du réseau visité et le HLR de l'abonné afin d'être en mesure d'acheminer un appel vers l'abonné concerné ou d'établir une communication demandée par un abonné visiteur.

❖ **L'EIR (*Equipment Identification Register*) :**

Contient une liste de tous les mobiles valides sur le réseau, et chaque téléphone portable est identifié dans cette base de données par un numéro IMEI (*International Mobile Equipment Identity*). L'IMEI est marqué comme invalide si le mobile a été déclaré comme volé.

❖ **L'AUC (*Authentication Center*) :**

Le centre d'authentification AUC (*Authentication Center*) mémorise pour chaque abonné une clé secrète utilisée pour authentifier les demandes de services et pour chiffrer (crypter) les communications. L'AUC de chaque abonné est associé au HLR. Pour autant le HLR fait partie du sous-système fixe alors que l'AUC est attaché au (sous-système d'exploitation et de maintenance).

d) Le sous-système d'exploitation et de maintenance OSS (*Operation SubSystem*) :

L'OSS assure la gestion et la supervision du réseau. La mise en place d'un réseau GSM (en mode circuit) va permettre à un opérateur de proposer des services de type « Voix » à ses clients en donnant accès à la mobilité tout en conservant l'interface du réseau fixe RTC existant.

- ❖ **Le NMC** : permet l'administration générale de l'ensemble du réseau par un contrôle centralisé.
- ❖ **Les OMC** : permettent une supervision locale des équipements. Par exemple des OMC supervisent des ensembles de BTS et de BSC. D'autres OMC supervisent de MSC et des VLR.

I.4.2 Le réseau GPRS (2.5G)

Le standard GPRS (General Paquet Radio Service) est une évolution de la norme GSM en ajoutant certain nombre de modules (Figure I.5). On parle généralement de 2.5G pour classier ce standard.

Cette norme autorise le transfert de données par paquets, avec des débits théoriques maximums de l'ordre de 171,2 kb/s, 40 kb/s en pratique. Grâce au mode de transfert par paquets, les transmissions de données n'utilisent le réseau que lorsque c'est nécessaire. Le standard GPRS permet donc de facturer l'utilisateur au volume échangé plutôt qu'à la durée de connexion, ce qui signifie notamment qu'il peut rester connecté sans surcoût. Le GPRS a permis d'initier l'Internet mobile [1].

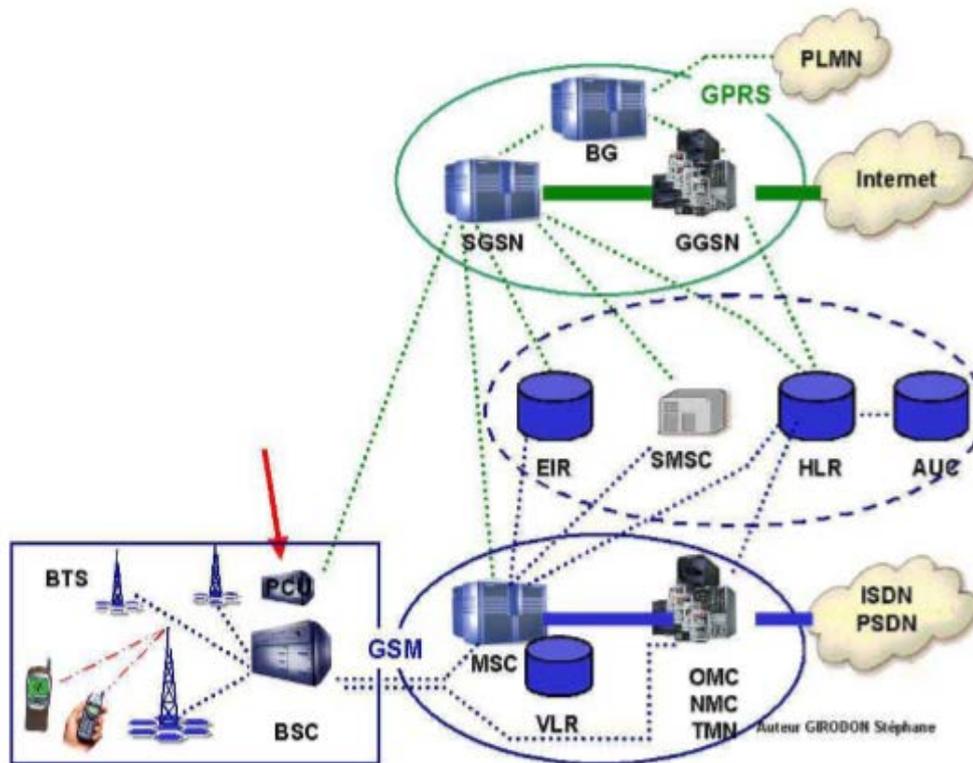


Figure I.5 : Architecture du réseau GPRS [2].

Un réseau GPRS est en premier lieu un réseau IP. Il est donc formé de routeurs IP. L'introduction de la mobilité nécessite de spécifier de nouvelles entités :

a) Le nœud de service (SGSN) :

Le SGSN (*Serving GPRS Support Node*) est un routeur IP en connexion avec l'ensemble des éléments qui assurent et gèrent les transmissions radio (BTS, BSC, HLR...), il est relié à un ou plusieurs BSS du réseau GSM. Le nœud de service dénommé SGSN gère les terminaux GPRS présents dans une zone donnée. Il est le « contrôleur » des terminaux GPRS présents dans sa zone de surveillance.

b) Le nœud de passerelle (GGSN) :

Le nœud de passerelle GPRS dénommé GGSN (*Gateway GPRS Support Node*) est un routeur qui permet aux paquets venant de réseaux de données externes d'être acheminés vers le SGSN du destinataire, il est relié à un ou plusieurs réseaux de données (éventuellement un autre réseau GPRS).

c) Le module BG pour la sécurité :

Le module BG (*Border Gateway*) est défini comme un nœud passerelle permettant de relier un réseau GPRS à un réseau fédérateur interconnectant différents réseaux GPRS. Ces BG jouent le rôle d'interface avec les autres PLMN (*Public Land Mobile Network*) permettant ainsi de gérer les niveaux de sécurité entre les réseaux.

I.4.3 Le réseau HSCSD ou EDGE (2.75G)

Le passage de la 2G à la 3G est coûteux car il faut déployer un nouveau réseau physique. Les opérateurs ont donc cherché des alternatives. L'une d'entre elles est l'EDGE (*Enhanced Data Rates for GSM Evolution*), technologie présentée comme la génération 2,75.

L'EDGE vise à optimiser la partie radio d'un réseau mobile sur la partie « données » afin d'augmenter les débits de téléchargement. En théorie, EDGE permet d'atteindre des débits allant jusqu'à 384 kb/s ; en pratique, 100 kb/s [1].

I.5 La troisième génération 3G

La troisième génération (3G) représente une évolution majeure par rapport à la 2G. Sur la base de communications « voix », se sont les services mobiles qui profitent des réseaux hauts débits largement supérieurs.

I.5.1 Le réseau UMTS (3G)

Cette norme UMTS est une évolution de la deuxième génération à la troisième génération (3G). Elle constitue une voie royale pour le développement de produits et de services multimédias.

Les technologies développées autour de cette norme conduisent à une amélioration significative des services et des vitesses de transfert avec des débits supérieurs à 384 Kb/s et pouvant aller jusqu'à 2 Mb/s. Cette amélioration des débits est rendue possible grâce à l'évolution des technologies radio qui autorisent une meilleure efficacité spectrale et l'exploitation de bandes de fréquences supérieures à celles utilisées par la technologie GSM.

I.5.1.1 Architecture de L'UMTS

L'architecture d'un réseau UMTS (figure I.6) est divisée en trois entités principales selon les spécifications du groupe de normalisation 3GPP (*Third Generation Partnership Project*). La première correspond au réseau d'accès radio UTRAN (*UMTS Terrestrial Radio Access Network*), la seconde au réseau de cœur CN (Cœur Network) et la troisième à l'équipement terminal UE (User Equipement), comme le montre la figure I.6.

a) Le terminal utilisateur :

Le terminal utilisateur (UE) est composé des deux parties suivantes :

- **Le terminal mobile** (ME. *Mobile Equipment*) correspond au terminal radio utilisé pour les communications radio sur l'interface Uu.
- **La carte USIM** (*L'UMTS Subscriber Identity Module*) est une carte à puce qui stocke l'identité de l'abonné, les algorithmes et les clefs d'authentification. Les clefs de chiffrement ainsi que certaines données relatives à l'abonnement de l'utilisateur qui sont nécessaires au niveau du terminal.

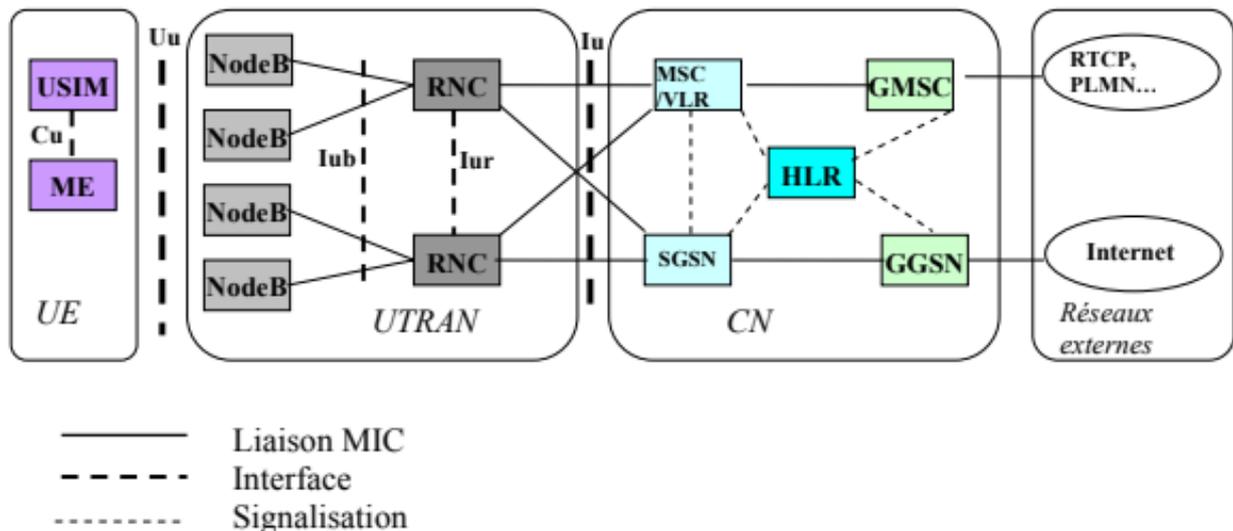


Figure I.6 : Architecture du réseau UMTS.

b) Le réseau d'accès radio (UTRAN) :

Comporte les deux éléments suivants :

- **Le NodeB** est un relais radio électrique qui assure la couverture d'une cellule pour les terminaux UMTS. Il convertit le flux de données entre les interfaces Iub et Uu et participe à la gestion des ressources radio. Notons que le terme NodeB provient des spécifications du 3GPP et est équivalent au terme « station de base » que nous avons utilisé précédemment.
- **Le RNC (Radio Network Controller)** gère les ressources radio de la zone dont il a le contrôle, c'est-à-dire les ressources de la zone de couverture de tous les NodeB auxquels il est rattaché. Il assure la mobilité des usagers et la concentration de trafic. Le RNC est le point d'accès pour tous les services fournis par l'UTRAN au réseau cœur.

Il peut avoir deux modes de fonctionnement [4]:

- ❖ Le Serving RNC (SRNC): permet de gérer la signalisation associée, prendre les décisions de handover, gérer le contrôle de puissance...
- ❖ Le Drift RNC (DRNC): permet de gérer d'autres cellules extérieures au SRNC également utilisées par le mobile, transférer les données de manière transparente entre le mobile et le SRNC.

c) Le réseau cœur (CN)

Le réseau cœur de l'UMTS est composé de trois parties dont deux domaines [4] :

- Le domaine CS (*Circuit Switched*) permet de gérer les services temps réels dédiés aux conversations téléphoniques.

- Le domaine PS (*Packet Switched*) qui permet la commutation de paquets c'est-à-dire la gestion des services non temps réels. Il s'agit principalement de la navigation sur Internet, de la gestion de jeux en réseaux ainsi que l'accès et l'utilisation des e-mails
- Les éléments communs aux domaines CS et PS.

1.5.2 La technologie HSDPA (3.5G ou 3G+)

La troisième génération (UMTS) impose des investissements énormes pour des débits qui ne sont pas éloignés de ceux du GPRS et se voit rapidement remplacée par la nouvelle génération 3,5G, appelée HSDPA. Cette nouvelle technologie offre des débits pouvant atteindre 8 à 10Mb/s sur le lien descendant. Le HSDPA peut être installé et déployé sans changer radicalement l'architecture de l'UMTS. Il permet du coup aux opérateurs de réaliser cette évolution à moindre coût.

1.5.3 La technologie HSUPA (3.75G ou 3G++)

La 3.75G est une variante de HSDPA sur la voie montante. HSUPA peut être considérée comme le successeur de HSDPA, elle porte le débit montant (*Uplink*) vers les 20 Mb/s théorique, le flux descendant (*Downlink*) étant de 10 Mb/s comme en HSDPA. L'intérêt de cette technologie est d'offrir la possibilité d'émettre vers d'autres mobiles toutes sortes des documents électroniques (images, vidéos...) favorisant ainsi le développement de l'Internet haut débit mobile [5].

1.6 La quatrième génération

4G se réfère à la quatrième génération de norme sans fil cellulaires. Il est le successeur des familles de normes 3G et 2G. La nomenclature de la génération se réfère généralement à un changement dans la nature fondamentale du service, de la technologie de transmission compatible non vers l'arrière et

Le nouveau des bandes de fréquences, la transmission à spectre étalé et au moins 200 kbit/s, devrait bientôt être suivie par 4G, qui se réfère à tous les réseaux IP à commutation de paquets, mobiles ultra-large bande (vitesse gigabit) accès et de transmission à porteuses multiples.

Technologies pré-4G comme le WiMAX mobile et la première version 3G *Long Term Evolution* (LTE) sont disponibles sur le marché depuis 2006 et 2009, respectivement [6].

1.6.1 LTE (Long Term Evolution) (3.9G)

LTE (*Long Term Evolution*) est la norme de communication mobile la plus récente qui est proposée par l'organisme 3GPP dans le contexte de la 4G. Cette technologie est composée des deux parties : le réseau d'accès E-UTRAN, et le réseau cœur appelé SAE (System Architecture Evolution), elle propose des débits élevés pour le trafic temps-réel, avec une large portée. Théoriquement, le LTE peut atteindre un débit de 50 Mb/s en lien montant et 100Mb/s en lien descendant.

Contrairement à la 3G qui nécessite d'allouer une bande de fréquence de 5 MHz, le LTE propose plusieurs bandes de fréquences allant de 1.25 jusqu'à 20 MHz. Cela lui permettra de couvrir de grandes surfaces. Avec la 4G, on se dirige vers la transmission de toutes les informations-voix et données par IP, le même protocole qu'on utilise sur Internet. Pour les fournisseurs, c'est plus facile et moins cher à gérer.

1.6.2 Le réseau LTE-Advanced (4G)

Le LTE Advanced est une évolution de la norme LTE qui lui permet d'atteindre le statut de véritable norme 4G, tout en gardant une compatibilité ascendante complète avec le LTE, au niveau des terminaux (Smartphones, tablettes, clés 4G) et au niveau du réseau, grâce aux fréquences identiques et aux codages radio (OFDMA et SC-FDMA) qui sont ceux déjà utilisés dans les réseaux LTE (accès radio EUTRAN).

Le LTE-Advanced sera capable de fournir des débits pics descendants (téléchargement) supérieurs à 1 Gb/s à l'arrêt et à plus de 100 Mb/s pour un terminal en mouvement, grâce aux technologies réseaux intelligentes qui permettent de maintenir des débits plus élevés en tout point de la cellule radio, alors qu'ils baissent fortement en bordure des cellules UMTS et LTE [7].

I.7 Le réseau PMR

I.7.1 Introduction PMR

La radio mobile privée (PMR) - parfois appelée radio mobile professionnelle - a été développée pour les utilisateurs professionnels qui ont besoin de rester en contact sur des distances relativement courtes avec une station de base centrale / répartiteur.

Le PMR est également largement utilisé par les services d'urgence. Les réseaux PMR se composent d'une ou plusieurs stations de base et d'un certain nombre de terminaux mobiles. Un tel système dessert un groupe fermé d'utilisateurs et qui est normalement détenu et exploité par la même organisation que ses utilisateurs.

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 accéléré 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) ».

a) Un réseau sécurisé

Les réseaux PMR 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.

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

b) Un réseau privé

Le réseau est adapté à ses besoins en termes de capacité de trafic, de couverture et de services. Il fonctionne dans des bandes de fréquences qui lui sont propres, attribuées sous licence renouvelable. 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.

Ainsi en France, une structure de réseau unique est partagée par la police et par les pompiers. Même si elles partagent le même réseau, les organisations fonctionnent de manière indépendante les unes des autres avec leur flotte d'utilisateurs, leurs communications propres et un quota de ressources réseau assuré. Le réseau PMR appartient à son utilisateur qui en finance le déploiement et qui en assure l'exploitation.

c) 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 [8].

I.7.2 Classifications des systèmes PMR

La couverture d'un réseau de radiocommunication professionnelle PMR est réalisée en fonction des besoins de l'entreprise. Les réseaux professionnels utilisent souvent plusieurs sites afin de couvrir une région ou un pays, comme ils peuvent utiliser un site unique notamment dans les zones résiduelles. La surface couverte et la taille du réseau d'un système PMR varie en fonction de l'usage auquel il est destiné. On peut définir trois classes de PMR : réseaux sans sites fixe, réseaux mono-site et réseaux multi-site.

- a) **Réseaux sans site fixe** : Ce sont les systèmes les plus simples, les mobiles communiquent entre eux directement sans un relais, ou par l'intermédiaire d'un mobile qui joue le rôle de la station (Figure I.7).

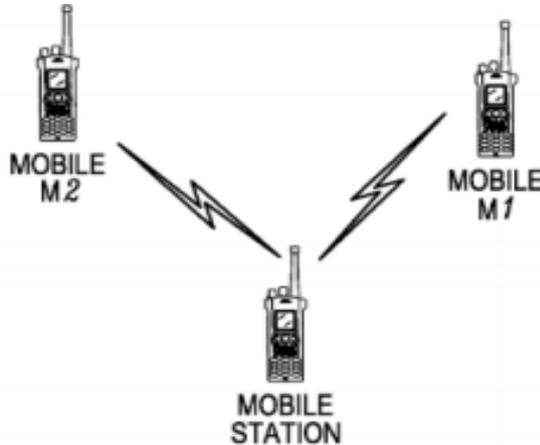


Figure I.7 : Réseau PMR sans site fixe.

- b) **Réseaux mono-site** : Dans ce type de réseaux la zone de couverture peut atteindre plusieurs dizaines de kilomètres à l'aide d'un relais. Ce type de configuration convient aux entreprises à zone d'intervention limitée : Aéroport, Sites industriels, Plate-forme pétrolière et Centrales électriques (Sonalgaz-Algérie). La figure suivante montre un exemple de réseau PMR mono-site.

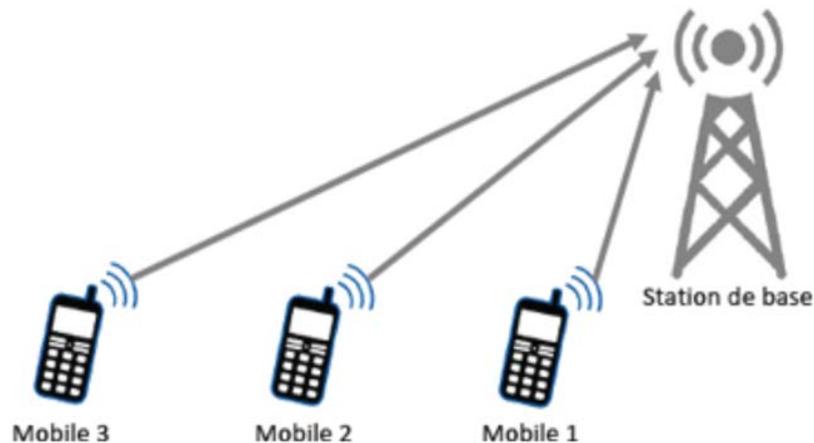


Figure I.8 : Réseau PMR mono-site

- c) **Réseaux multi-sites** : Il se peut que les utilisateurs interviennent sur des zones plus étendues (autoroutes, département, pipe-line...). L'utilisation de plusieurs sites est nécessaire (Figure I.9). Les sites sont reliés entre eux soit par faisceaux hertziens (FH), soit par fibre optique afin de permettre les communications entre zones différentes [9].

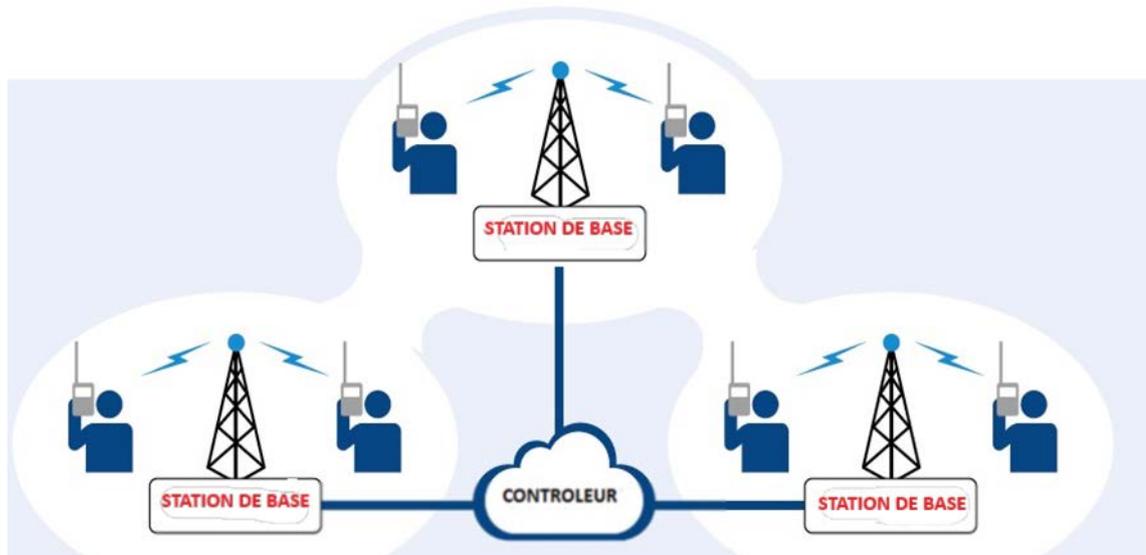


Figure I.9 : Réseaux à couverture multi-site.

I.7.3 Organisation des utilisateurs et des organismes sous le système PMR

Afin de structurer les échanges entre les utilisateurs, les systèmes PMR se basent sur une hiérarchie reprenant souvent la structure de l'organisme utilisateur ce qui est très différent aux systèmes de communication cellulaires où les usagers sont considérés par le système de façon individuelle.

Les appels des utilisateurs peuvent être classés en quatre types :

- Appel individuel (entre deux usagers du même niveau hiérarchique),
- Appel de groupe (entre tous les usagers du même groupe),
- Appel de flotte (entre tous les usagers de tous les groupes de la même flotte)
- Appel général (entre tous les usagers du système).

I.7.4 Qualités d'un réseau PMR

Historiquement, les services de sécurité furent les premiers intéressés par les communications privées ; le système permet en effet à leurs agents de rester sur terrain en contact permanent avec un centre opérationnel.

Avec le développement des PMR et la baisse de leurs coûts, les entreprises ont commencé à les adopter avec des motivations moins spécifiques que celles de services de sécurité.

On peut citer plusieurs caractéristiques des systèmes PMR qui sont [10] :

a) Communication à l'alternat

Dans les systèmes PMR les communications ont essentiellement lieu à l'alternat, à un instant donné un seul utilisateur de groupe peut parler sur le canal alloué à son groupe. Cette discipline impose aux utilisateurs d'adopter des règles de communication très strictes. C'est pour cela la durée de communication est limitée seulement à l'échange d'informations opérationnelles. Elle permet donc d'éviter les conversations inutiles et longues et réduire les

échanges au strict nécessaire. De ce fait, comparé aux systèmes cellulaires, le système de radiocommunication professionnelle PMR constitue un système très efficace en termes d'utilisation de spectre.

b) Temps d'établissement court

Les systèmes PMR étaient à l'origine utilisés par les organismes de sécurité et d'urgence qui devaient entrer très rapidement en communication. Cette rapidité est importante pour les entreprises dont les agents opèrent sur terrain. Les temps d'établissement sont généralement de l'ordre de la fraction de seconde ou de la seconde et les numéros d'appel sont courts permettent de leur côté de réduire la procédure de la numérotation.

c) Sécurité des postes

Les terminaux radio utilisés au niveau des systèmes PMR doivent répondre à des normes de sécurité renforcées. Pouvant être utilisés dans des environnements particuliers (industrie, utilisation des gaz) et dans des conditions spéciales (de température et de pression). A cet égard les systèmes PMR doivent répondre à des caractéristiques bien adaptées.

I.7.5 Les technologies de PMR

I.7.5.1 La PMR analogique

Les plus anciens, technologiquement parlant, sont les réseaux analogiques dits 2RP et 3RP. Ils sont particulièrement vulnérables vis-à-vis des écoutes indiscrètes réalisées au moyen de scanners bon marché du commerce.

De plus, la phonie est souvent de qualité moyenne, se dégradant régulièrement au fur et à mesure que l'utilisateur s'éloigne du relais. Les réseaux 2RP relèvent maintenant de l'histoire, mais il existe encore un marché pour les réseaux 3RP, justifié par leur faible coût, lorsque la confidentialité n'est pas une contrainte trop forte.

a) Le réseau Radio Professionnels (2RP)

Les premiers réseaux analogiques de première génération, dits 2RP ou « relais commun », datent des années 1930-1940. Il s'agit de réseaux très simples, avec un relais diffusant sur un ou plusieurs canaux ouverts. En « canal ouvert », il n'y a pas de cloisonnement des utilisateurs : sur un même canal, tout le monde s'entend. Les usagers choisissent manuellement un canal selon leurs exigences opérationnelles.

Une première amélioration des 2RP a été l'introduction de signalisations dans la bande (par exemple la signalisation 5 tons utilisant 5 fréquences vocales) pour sélectionner les interlocuteurs d'une communication et ainsi limiter une communication à un groupe d'utilisateurs ou faire des communications individuelles.

A l'époque des 2RP, il n'y avait pratiquement pas de standardisation, chaque constructeur produisait ses propres spécifications.

b) Le réseau Radioélectrique à Ressources Partagées (3RP)

L'évolution des réseaux s'est faite vers le partage de ressources afin d'optimiser l'utilisation du spectre radio. La première innovation a été la réservation d'un canal au transport de la signalisation, la « voie balise » avec allocation dynamique des canaux radio en fonction du trafic, le « *trunking* ». L'utilisateur n'a plus à sélectionner un canal, le terminal se calant automatiquement sur la voie balise ou sur la voie de trafic allouée. La seconde innovation a été le modèle cellulaire qui permet d'optimiser l'utilisation du spectre et d'accroître la capacité de trafic du réseau. Ces réseaux utilisent des largeurs canal de 12,5 à 25 kHz. Le réseau Radiocom 2000, développé dans les années 1980 et conçu initialement en tant que réseau PMR opéré, est un exemple de réseau 3RP.

C'est avec les 3RP que sont apparus les premiers standards :

- **APCO 16** (1977), standard américain de la TIA, particulièrement présent en Amérique du Nord
- **MPT 1327** (1980), standard anglais sur lequel repose la majorité des réseaux analogiques actuels en Europe. Les réseaux 3RP bénéficient d'une grande diversité de services comparables aux réseaux numériques de la génération suivante, y compris la transmission de données.
- **La PMR 446** Ainsi nommée car opérant dans une bande de fréquence de quelques canaux centrés sur 446 MHz, la PMR 446 définit de petits réseaux exclusivement en mode direct, avec une puissance réduite, donc de faible portée.

I.7.5.2 La PMR numérique (DMR)

Malgré tout, les réseaux analogiques 2RP et 3RP ont rapidement trouvé leurs limites : qualité moyenne de la phonie, vulnérabilité vis-à-vis des écoutes indiscretes, mauvaise efficacité spectrale, transmission de données limitée. Pour pallier ces défaillances, des réseaux PMR basés sur des technologies numériques ont vu le jour dès la fin des années 1980. Un autre but était d'optimiser l'utilisation du spectre radio, notamment en réduisant la largeur canal. La transmission numérique s'accompagne d'une meilleure atténuation sur les canaux adjacents, permettant une meilleure réutilisation des fréquences dans le modèle cellulaire.

- a) **TETRAPOL (1987)** : TETRAPOL a été développé par MATRA Communication (à présent CASSIDIAN, une division d'EADS), initialement pour la Gendarmerie Nationale. Il s'agit d'un standard de fait puisque TETRAPOL n'est pas issu d'un organisme de standardisation. Il s'appuie sur des techniques éprouvées dont certaines sont utilisées par le GSM. L'accès au média FDMA sur des canaux 12,5 kHz lui confère une grande simplicité d'implémentation et une large dimension de cellule, propre à une bonne couverture nationale.
- b) **TETRA (1989)** : TETRA est le standard européen de PMR développé par l'ETSI. Sensiblement plus sophistiqué que TETRAPOL et en TDMA d'ordre 4 sur des canaux 25 kHz (6,25 kHz équivalent canal), il offre une meilleure efficacité spectrale, mais des cellules de taille

inférieure. TETRA est bien adapté aux réseaux denses et a notamment rallié de nombreuses collectivités urbaines.

- c) **APCO 25 phase 1 (1989)** : Grand frère de l'APCO 16, il est également présent en Amérique du Nord. Sa conception est assez proche de celle de TETRAPOL avec une canalisation 12,5 kHz FDMA.
- d) **APCO 25 phase 2 (2010)** : L'APCO a continué ses travaux sur un standard APCO 25 phase 2, en TDMA d'ordre 2 (équivalent canal 12,5 kHz) pour une meilleure efficacité spectrale.
- e) **La DMR (2005)** : La DMR est un nouveau standard développé par l'ETSI. Son premier objectif est d'optimiser l'utilisation du spectre radio en TDMA. Le second objectif est de définir une technologie simple pour des systèmes numériques à coût réduit et prendre le relais de la PMR 446. Il adresse toute la gamme de réseaux, dans des bandes de fréquence avec ou sans licence.

I.7.6 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 Défense est un utilisateur relativement nouveau de la PMR. Depuis quelques années, les militaires se tournent volontiers vers des systèmes civils (COTS) pour toute application statique ou semi statique, réservant les systèmes tactiques durcis au théâtre d'opération. De ce fait, les réseaux PMR s'imposent de plus en plus souvent sur les bases d'entraînement et dans les opérations de maintien de la paix.

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.7.7 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 [8]:

a) 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.

b) 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.
- **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. Nous reparlerons de lui plus en détail.

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une vue générale sur l'évolution des réseaux cellulaires qui sont utilisées dans notre vie quotidienne, on est passé de la première génération analogique ensuite la deuxième génération GSM et son architecture, le GPRS, l'EDGE puis le réseau UMTS ainsi que ses deux évolutions HSPA et HSPA+, ensuite le réseau LTE et le LTE Advanced. Finalement, les systèmes PMR qui étaient majoritairement analogique jusqu'à l'intérêt suscité par des nouvelles normes comme TETRA au cours de ces dernières années. A cet effet, le besoin d'une sécurité accrue d'une capacité supplémentaire et d'un potentiel de données améliorées conduit à l'adoption des systèmes numériques. Ceci fera l'objet de notre deuxième chapitre

Chapitre II :
La norme TETRA
(Terrestrial Trunked Radio)

II.1 Introduction

Au cours des dernières années, lorsque des événements majeurs sont survenus, les équipes d'intervention d'urgence de plusieurs pays européens ont connus des problèmes d'interopérabilité de communication, en partie en raison de l'absence de normalisation de leurs équipements radio mobile. Afin de pallier ce problème, le système TETRA (*Terrestrial Trunked Radio*) a été spécialement mis en place dès 1995, dont nous allons parler dans ce chapitre qui présente un aperçu général sur la norme TETRA, son architecture, ses spécifications techniques, principalement l'interface air et les innovations apportées par rapport aux autres systèmes de la radiocommunication numérique.

II.2 La norme TETRA

TETRA a été conçue par l'ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) comme une norme multi source de sécurité publique, ce qui la différencie des autres normes telles que la norme GSM, avec un fort accent mis sur les fonctionnalités PMR classiques telles que des temps d'établissement des appels rapides et des fonctions d'appels de groupe efficaces [11].

TETRA est un système cellulaire numérique de radiocommunication à ressources partagées destiné à la transmission vocale et de données. Les systèmes numériques à ressources partagées sont des systèmes de radiocommunication privés et publics utilisés par des professionnels et des organes de sécurité (PMR/PAMR). Au contraire des anciens systèmes analogiques conventionnels à canal fixe (à chaque service et chaque utilisateur est attaché en tout temps un canal particulier), dans les systèmes de radiocommunication à ressources partagées, les fréquences sont attribuées aux différents utilisateurs et services de façon flexible. On peut ainsi exploiter le gain d'une liaison à ressources partagées et augmenter l'efficacité du spectre des fréquences.

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, etc.), les aéroports, les entreprises d'énergie et les organes de sécurité (p. ex. 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.

Dès le milieu des années 1980, on a recherché des solutions adaptées pour les systèmes numériques PMR afin d'améliorer l'efficacité du spectre des fréquences et la sécurité technique, et de faciliter le cryptage des communications.

TETRA peut en principe être utilisé sur toutes les fréquences, mais de préférence inférieures à 1 GHz. Dans la pratique, seules les fréquences typiquement prévues pour les systèmes PMR dans les bandes des 160 MHz et des 400 MHz sont utilisées [12].

Le système TETRA offre une gamme tout particulièrement large de services supplémentaires, dont un grand nombre de fonctions exclusives. Le système TETRA peut fonctionner dans les bandes inférieures à 1 GHz et sa structure de canaux de 25 kHz lui permet s'adapter aisément aux actuelles configurations de radiocommunication personnelle mobile. Les spécifications du système TETRA couvrent trois services de télécommunication distincts [9] :

- Voix plus données (V+D).
- Transmission optimisée de données par paquets (PDO).
- Mode direct (DMO).

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), mais dans ce cas aucune interopérabilité des applications au niveau de la couche physique n'a été prévue. L'interopérabilité intégrale prévue porte sur la couche 3 du modèle OSI.

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*). 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 grâce à TEDS des débits allant jusqu'à 134 kBit/s par intervalle de temps, voire supérieurs à 500 kBit/s en occupant 4 intervalles de temps. 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.

Comme la plupart des systèmes de radiocommunication mobile, TETRA utilise la liaison duplex (sauf en mode direct). Les liaisons ascendante et descendante s'effectuent sur deux fréquences différentes, séparées par un "écart transmission/réception". La taille de cet écart dépend de la bande de fréquences dans laquelle le système est exploité.

Les terminaux TETRA (comme la plupart des systèmes PMR) fonctionnent généralement en mode semi-duplex, c'est-à-dire qu'ils ne peuvent pas émettre et recevoir simultanément [12].

II.3 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). Les liens entre les stations de base sont majoritairement filaires.

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. La figure II.1 représente ce type d'architecture.

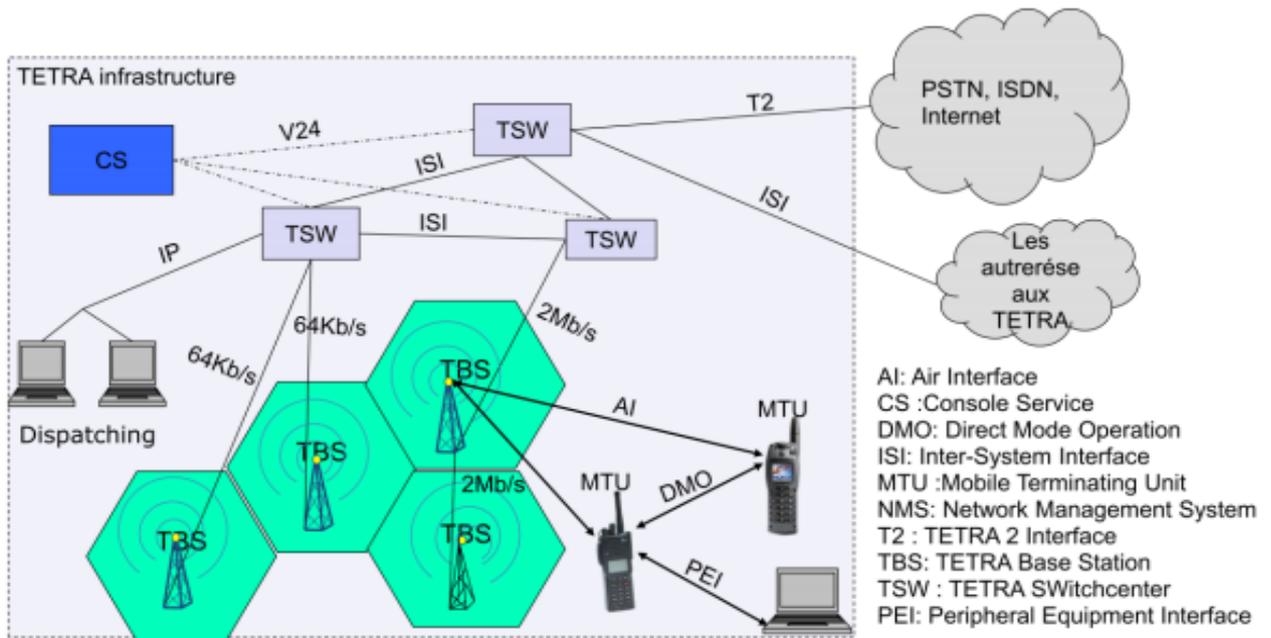


Figure II.1 : Architecture du réseau TETRA.

L'architecture de réseau TETRA est généralement formée 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 TSCs 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 [9]. L'interopérabilité entre réseaux radio de différents types revêt une importance croissante.

Les réseaux TETRA offrent de nombreuses possibilités de connexion avec des réseaux de communication externes et détermine les fonctions suivantes [13]:

- Connexion avec d'autres réseaux (PABX, RTC, RCP et RNIS),
- Itinérance permettant l'interfonctionnement avec les terminaux provenant d'autres réseaux TETRA.

Pour garantir une norme ouverte et utilisable par de nombreux fabricants, TETRA spécifie les 6 interfaces de bases suivantes [14]:

- Interface **RADIO** pour l'exploitation en mode trunking,

- Interface **ISI** (Inter System Face) permet de connecter entre eux les réseaux TETRA de différents fabricants,
- Interface **AIR** garantit la compatibilité entre les terminaux de différents fabricants,
- Interface **APPAREIL** permet le développement indépendant d'applicatifs pour les radiocommunications mobiles,
- Interface **de gestion de réseau**,
- Interface **RADIO EN MODE DIRECT** permet les communications des zones hors de la couverture radio. Dans ce mode, comme on a déjà signalé les stations mobiles peuvent communiquer directement entre elles sans faire usage de l'infrastructure réseau.

Les améliorations offertes par le standard TETRA permettent entre autres [9]:

- 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 dès 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 possibilité.

II.3.1 Console d'administration de réseau (console de service)

Parmi ses fonctions les suivantes :

- 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.

II.3.2 Le Dispatcher (DWS : *Dispatcher WorkStation*)

C'est un outil application multi fenêtres permettant le contrôle et la gestion des abonnés, il permet de gérer et de contrôler l'ensemble des utilisateurs déclarés dans une station de base. Il contrôle toutes les fonctions de gestion et d'administration liées aux communications des abonnés [15].

Un Switch peut être connecté à plusieurs dispatchings et chaque poste de dispatching peut être relié à d'autres applications ; un poste de dispatching peut également appartenir à plusieurs dispatchings. Les PC sont interconnectés selon les techniques usuelles de mise en réseau de manière à pouvoir déporter un ou plusieurs PC à travers des équipements standards (Hub, Routeur...). La connexion entre un poste dispatching et le Switch est réalisée par deux liens fonctionnels distincts :

- La voix sur IP
- La signalisation et les transmissions de données [9]

L'architecture interne d'un poste dispatching est conforme au diagramme ci-après [16] :

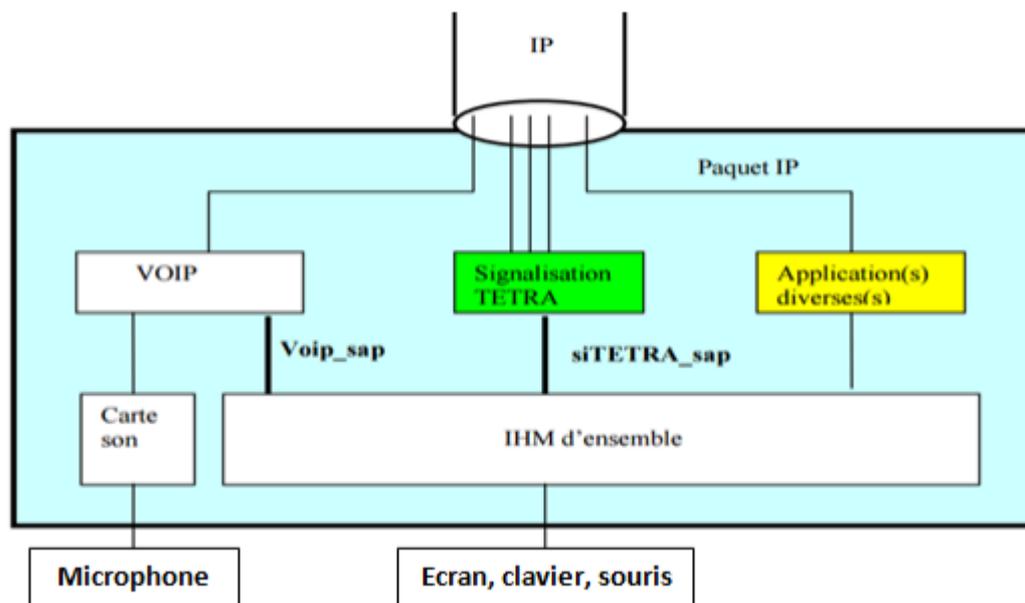


Figure II.2 : L'architecture interne d'un poste dispatching.

Les principales fonctionnalités de ce composant sont les suivants [15] :

- Fusion d'appels. Appel autorisé par Dispatcher.
- Appel d'urgence et d'urgence.
- Créer et ajouter des groupes.
- Positionnement GPS de tous les abonnés sur la carte.
- Vitesse d'affichage et direction pour abonnés GPS.
- 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.
- Protection facultative du code PIN.

II.3.3 Les Switchs (TSC)

Le commutateur Switch TETRA (Figure II.3) 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 II.3 : Switch ou commutateur TETRA.

II.3.4 Station de base (TBS)

La BTS est l'émetteur récepteur TETRA réalisant 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.

II.3.4.1 Les micros station de base (micros TBS)

Les micros TBS sont des stations de base qui présentent 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 400 m).

Cette TBS est parfois appelée répéteur elle divise de deux types mobile, comme la montre la figure II.4, et fixe qui est fréquemment utilisé dans le tunnel et la ligne de couverture (ex. ligne de train). Le micro station de base elle joue le rôle d'une passerelle de réseau. Elle est solution des plusieurs problèmes [9].

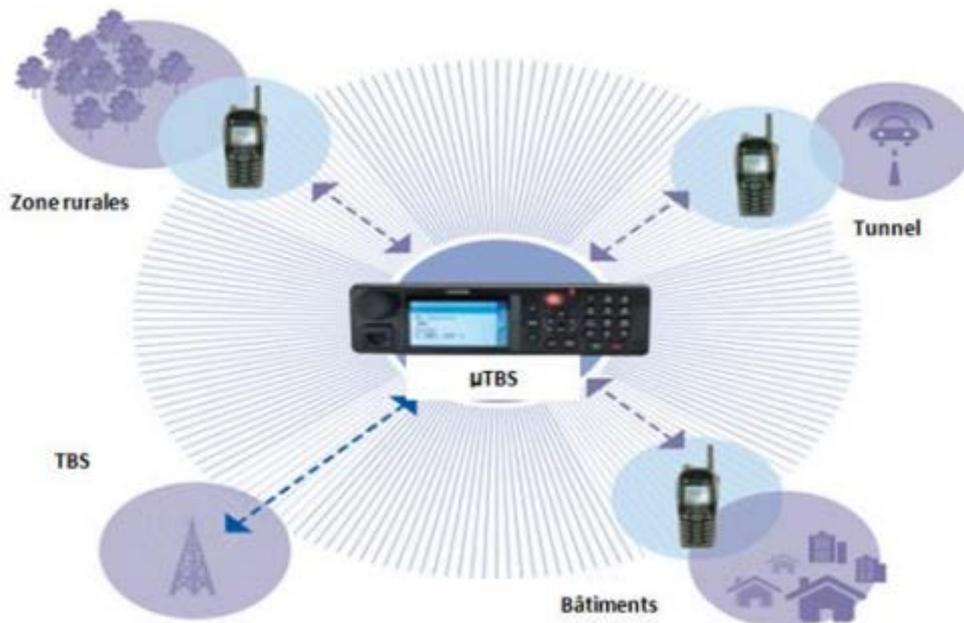


Figure II.4 : La micro TBS répéteur mobile.

II.3.5 Le mobile TETRA (TMS)

Avec ses 10 Watts de puissance Radio Fréquence (RF) et sa technologie de passerelle et de répéteur la plus éprouvée sur le marché, le mobile TETRA (Figure II.5) 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 [17].



Figure II.5 : Mobile TETRA TMS (TETRA Mobile Station).

II.4 Les différents types de communication TETRA

Dans le réseau TETRA l'usage peut se trouver sur plusieurs modes de communication. Parmi ces modes, le mode direct DMO (mode I : sans répéteur et mode II : avec répéteur) [9].

TETRA DMO (mode direct) permet d'établir des communications simples dans des espaces non desservis ou lors de catastrophes qui supposent ponctuellement de gros volumes de trafic. Ce mode d'exploitation peut aussi être utilisé lorsque les utilisateurs se trouvent hors de la zone desservie.

Avec DMO, seul l'exploitation en mode simplex est possible. Les stations mobiles impliquées dans une communication fonctionnent toute sur la même fréquence. Il est possible d'avoir simultanément jusqu'à deux liaisons simplex sur une seule porteuse [12].

II.4.1 Mode direct (mode I)

Ce sont les systèmes les plus simples, les mobiles communiquent entre eux directement sans un relais, ou par l'intermédiaire d'un mobile qui joue le rôle de la station de base (figure II.6). Le mode direct est l'une des différences les plus importantes pour communiquer avec les réseaux basés sur l'infrastructure tels que GSM, cdma2000 ou UMTS.



Figure II.6 : Mode direct sans répéteur.

II.4.2 Mode direct (mode II)

Un répéteur supplémentaire est utilisé avec un rayon important peut augmenter la gamme (portée) de transmission, comme montre la figure suivante [9].

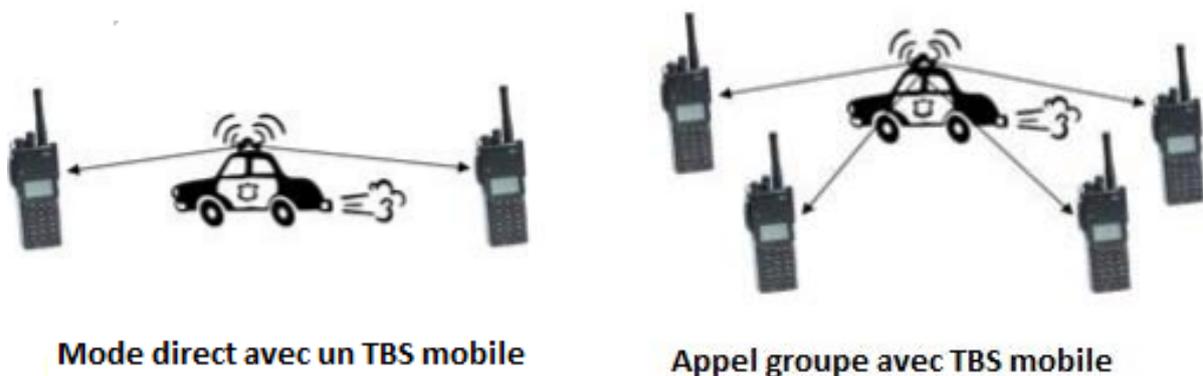


Figure II.7 : Mode direct avec répéteur (micro TBS).

II.5 L'interface radio TETRA

II.5.1 Structure des canaux

TETRA utilise le système d'accès au canal TDMA (*Time Division Multiple Access*) avec quatre canaux physiques (intervalles de temps) et donc quatre connexions d'utilisateur sur un seul canal radio d'une largeur de bande de 25 kHz. Pour obtenir des capacités de transmission plus élevées, l'utilisateur peut occuper plusieurs intervalles de temps (jusqu'à 4) (Figure II.8) [12].

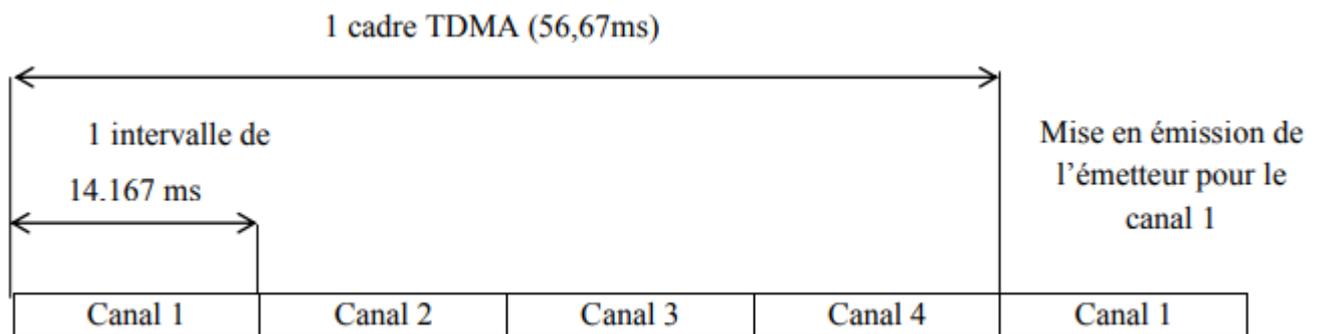


Figure II.8 : Structure des canaux au niveau TETRA.

TETRA supporte des débits allant jusqu'à $4 \times 7,2$ kbit/s sur un canal radio d'une largeur de bande de 25 kHz, avec la modulation de phases $\pi/4$ -DQPSK. Le spectre de fréquence alloué aux systèmes TETRA allant une bande 385 à 400 Mhz avec 10 Mhz d'écart duplex [8].

La transmission radio est fondée sur des trames de 160 bits, durant 56.67 ms, avec des canaux physiques offrant un débit de 8 kbit/s. Un canal radio est composé d'une fréquence descendante de la station de base vers le terminal et d'une fréquence montante du terminal vers la station de base, le débit est de 8 kbit/s pour chaque canal. Les canaux logiques sont organisés à partir d'une super trame de 1080 trames consécutives. Avant transmission, l'information est codée suivant un schéma de codage dépendant du type de trame avec addition d'une redondance pour protéger l'information [2].

II.5.2 Structure des slots

TETRA définit une multitrame de 18 trames TDMA (figure II.9). Seules les 17 premières transportent des blocs codés. On peut remarquer qu'après modulation, la transmission d'une trame modulée durée 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 multi trame 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 multitrames sont ensuite regroupées en hypertrames de 60 multitrames. L'hypertrame intervient dans le processus de chiffrement pour le changement de vecteur.

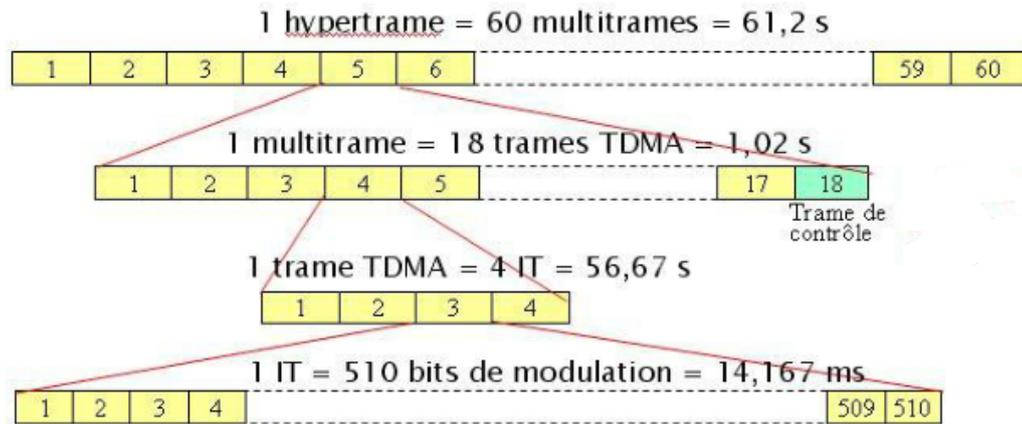


Figure II.9 : Structure des trames TETRA.

Comme le système GSM, TETRA émet une porteuse particulière dans le premier intervalle de chaque cadre du canal de contrôle. Les informations dans le système TETRA peuvent être transmises selon plusieurs types de structures, 4 dans le sens montant et 4 dans le sens descendant [10] :

- Sur le canal montant on distingue :
 - **Normal Uplink Burst (NUB)**: constitué de 512 bits qui transportent la voix ou les données et la signalisation.
 - **Control Burst (CB)**: composé de 162 bits et utilisé pour l'envoi d'informations de contrôle. En respectant le temps de garde on peut transmettre deux burts de contrôle dans un seul slot.
 - **Linearisation Burst (LB)**, une fois le mobile se porte sur un canal, le LB lui permet de linéaires leur émissions.
- Sur le canal descendant on distingue :
 - **Normal Downlink Burst (NDB)**, constitué de 512 bits et a pour rôle la transmission de la parole, des données et de la signalisation.
 - **Synchronisation Burst (SB)**, constitué de 216 bits, caractérisé par une séquence de synchronisation, précédé par une onde sinusoïdale permettant la synchronisation horloge du mobile sur la station de base.
 - **Broadcast Block (BK)**, qui contient 30 bits (14 bits utiles) et utilisé pour le canal AACH.

II.5.3 Type de modulation

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 $-3\pi/4$

On peut remarquer, sur la figure suivante, que les transitions ne repassent jamais par zéro, ce qui limite les risques de perte de phase. Par contre, cette modulation est sensible aux interférences. Elle est à enveloppe non constante et nécessite des amplificateurs linéaires [8].

Les systèmes à modulation linéaire, tels que le $\pi/4$ DQPSK (Figure II.10) avec une meilleure efficacité spectrale et une bonne efficacité de puissance, sont appelés à fournir plus de capacité aux systèmes radio-mobiles cellulaires. La modulation présente les avantages suivants [11] :

- Une largeur de bande plus étroite par rapport à la modulation de fréquence.
- Elle peut être détectée en utilisant un démodulateur cohérent, un détecteur différentiel ou un discriminateur suivi par un filtre intégrateur.
- Les transitions dans la constellation du signal ne passent pas par l'origine, et par conséquent l'enveloppe présente moins de variations.

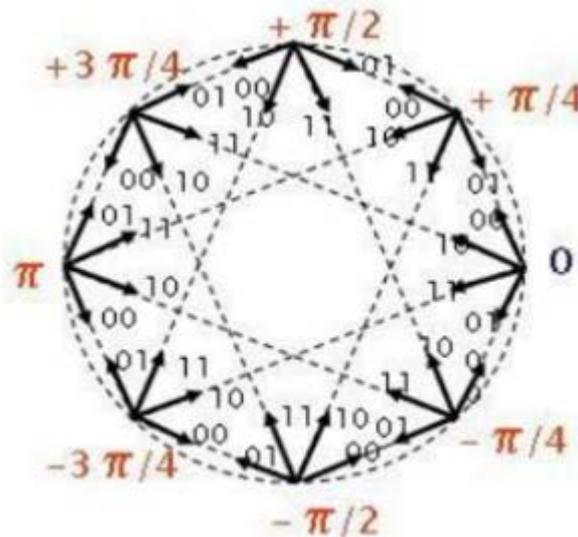


Figure II.10 : Constellation modulation $\pi/4$ -DQPSK.

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 [12].

II.5.4 Description des canaux

II.5.4.1 Les canaux physiques

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*) qui véhicule la signalisation réseau et des transmissions de données courtes en mode paquet.
- Des voies de trafic (*Traffic Physical channel*) qui transportent la voix et des données en mode paquet ou en mode circuit.
- Des voies non alloués (*Unallocated Physical channel*) qui ne sont jamais allouées à une communication et qui sont réservées pour des messages broadcastés.

II.5.4.2 Les canaux logiques

- Les canaux logiques de la voie balise : La voie balise (ou Control Channel- CCH) supporte plusieurs canaux logiques, multiplexés sur la multi trame 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*).

II.5.5 Procédures de gestion des appels

En veille les mobiles sont calés en permanence sur le canal du contrôle MCCH pour acquérir les informations systèmes et pour détecter les appels entrants. Au niveau de TETRA l'appel peut être établi selon deux modes : soit avec contrôle de présence, soit sans contrôle de présence.

Dans l'établissement d'appel avec contrôle de présence (figure II.11), un mobile M1 souhaitant entrer en communication avec un mobile M2 émet un message de demande d'*accès-setup*, A sa réception la station de base répond par un acquittement *d-call* procédant et envoi en parallèle un message *d-setup* au mobile M2 afin de vérifier sa présence.

Le mobile M2 répond, s'il est présent par un message *u-connect* dans le slot indiqué dans le message *d-setup* (slot 2 du canal montant dans notre cas). A la réception de cet acquittement, la station de base alloue aux mobile M1 et M2 un canal de trafic en émettant simultanément les messages déconnecte *déconnect-ack* [15].

Pour établir un appel d'une façon rapide, les ressources radio sont allouées sans contrôle de présence des parties demandées. Ce type de communication est utilisé pour les appels de groupe et les appels individuels. Dans ce mode, le canal de trafic est alloué dès la réception de la demande par la station de base, celle-ci renvoie alors des messages contenant le numéro du canal alloué : *d-connect* à l'appelant et *d-setup* à l'appelé [10].

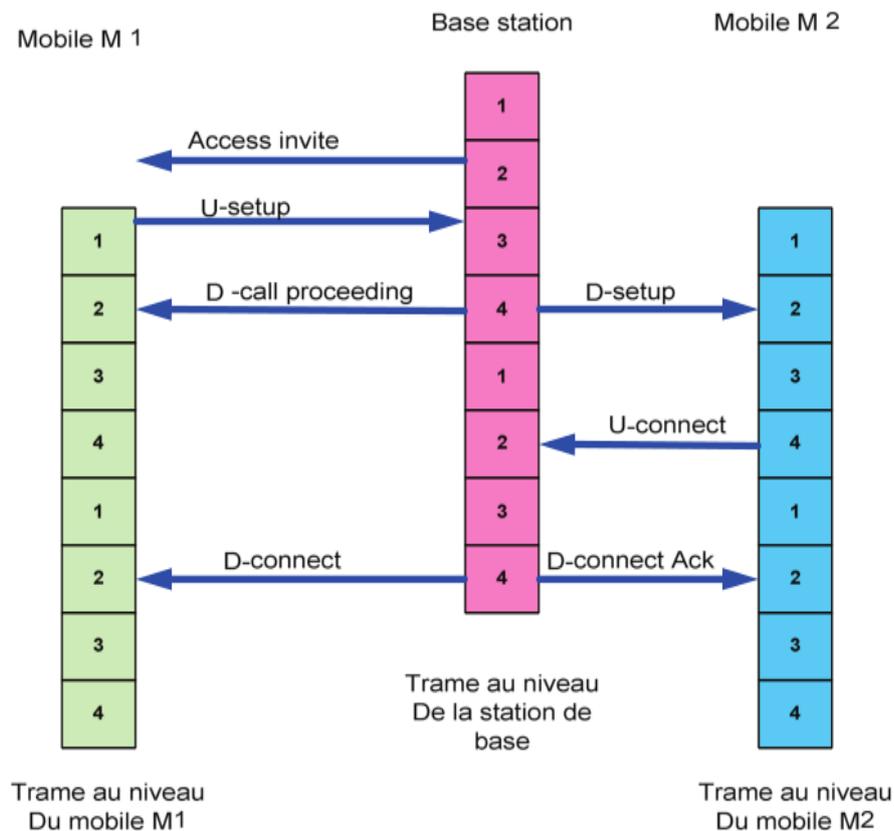


Figure II.11 : Procédure de Gestion des Appels.

II.5.5.1 Mise en œuvre du codec ACELP

TETRA utilise un codeur décodeur (Codec) à compression de voix ACELP (*Algebraic Code-Excited Linear Prediction*). Son but est de convertir la voix en numérique et de la compresser de façon à minimiser la quantité d'informations à transmettre, ce qui permet de réduire la bande utile lors de la transmission dans l'interface air.

Le codec ACELP a la particularité de pouvoir compresser la parole avec un minimum de bits, tout en respectant une bonne qualité sonore. Ce codeur apporte une réduction très importante du nombre de bits à transmettre ce qui permet de réduire la bande passante utile et permet de transporter plus d'informations dans la bande donnée.

Il va dans un premier temps convertir la voix en informations numériques puis va analyser les informations numériques pour déterminer les variations dû à la parole (analyse des caractéristiques de la voix humaine), mettre en place les filtres permettant d'éliminer le bruit de fond de l'environnement. Ceci donne un débit en sortie du codec de 4,567 Kbits/s ou 274 bits par 1/2 slot [15].

II.5.5.2 Le codage canal

Le codage canal consiste à introduire de la redondance en combinant les bits de la trame initiale et en ajoutant un CRC. La trame codée est donc plus longue que la trame initiale. La transmission radio, soumise à des perturbations, ne se fait pas sans pertes. Le but du codage est,

en cas de perte d'un bit, d'avoir la possibilité de le reconstituer. Le codage donne deux blocs résultants de 216 bits soit 432 bits [8].

II.5.6 Stratégies trunking utilisées par TETRA

Les réseaux « *trunk* » appelés réseaux radio à ressource partagées 3RP, sont basés sur une technique de base utilisée dans les systèmes téléphoniques dès le début de leur histoire ; elle consiste à agréger le trafic provenant d'un ensemble d'utilisateurs, une fois parvenant au premier commutateur, le trafic est transmis à un groupe de canaux appelés *Trunking*, l'utilisation de cette méthode repose sur deux observations :

- Le taux d'occupation moyen d'une ressource par utilisateur est généralement très faible,
- La probabilité pour qu'à même moment un très grand nombre d'abonnés demande une ressource est également très faible.

On peut définir plusieurs méthodes de *Trunking* pour optimiser l'efficacité spectrale, le temps d'accès au système en fonction des conditions de trafic. C'est pour cela TETRA distingue, le *Trunking* au niveau message, au niveau transmission et le *quasi-trunking*.

II.5.6.1 *Trunking* au niveau message

Ce mode consiste à l'allocation du canal de trafic, le canal est alloué en continu pendant la durée d'appel. Un appel consistant en plusieurs transactions séparées provenant des différents terminaux. Le canal est libéré lorsque l'appel est explicitement terminé. Cette méthode permet de réduire la signalisation et le traitement au niveau de l'infrastructure. Son inconvénient est que le canal reste alloué à un appel même lorsque les silences entre les bribes de parole ont des durées importantes.

II.5.6.2 *Trunking* au niveau transmission

Le canal n'est alloué que pendant la durée de la transaction. L'avantage de cette technique est que le canal n'est alloué que pendant cette période. Elle convient donc bien aux communications du type question-réponse. Le temps d'accès peut être important dans le cas d'un système chargé.

II.5.7 Gestion de la localisation

Un réseau TETRA est fractionné en zone de localisation contenant chaque une ou plusieurs cellules, la norme définit le mécanisme d'enregistrement implicite qui permet l'inscription d'un terminal sans que celui-ci émette un message d'enregistrement explicite. En général et comme d'habitude le mobile sera recherché que dans la ou les zone (s) de la localisation ou il est inscrit. Le mobile peut être inscrit par tous types de message déclenché qui contient son identité (demande d'appel réponse à une recherche, changement d'une cellule...) [10].

II.5.7.1 Le Handover

La norme TETRA offre les procédures classiques comme tous les autres systèmes : Handover, authentification et chiffrement. Le handover ou transfert intercellulaire est un mécanisme fondamental dans la communication cellulaire.

Globalement, c'est l'ensemble des opérations mises en œuvre permettant qu'une station mobile (MS) puisse changer de cellule sans interruption de service. Le processus consiste à ce qu'un terminal mobile maintienne la communication en cours, lors d'un déplacement qui amène le mobile à changer de cellule. En effet lorsque le signal de transmission entre un combiné et une station de base s'affaiblit, le système du combiné trouve une autre station de base disponible dans une autre cellule, qui est capable d'assurer à nouveau la communication dans les meilleures conditions. Ce mécanisme permet l'itinérance entre cellules ou opérateurs [18].

II.6 TETRA Version 2 (TETRA 2)

Comme les systèmes publics de radiocommunication mobile UMTS et LTE (la grande concurrence des systèmes PMR) se développent rapidement et qu'ils permettent des débits de données toujours plus élevés, TETRA a dû s'adapter pour répondre aux attentes croissantes des clients PMR.

Fin 2005, l'ETSI publiait la version 2 de TETRA (TETRA 2), qui comprend notamment deux nouvelles fonctionnalités importantes :

- Range Extension
- TETRA Enhanced Data Service (TEDS)

TETRA 2 utilise le même système d'accès au canal TDMA que TETRA 1 et elle est totalement rétro-compatible.

II.6.1 Range Extension

En raison de la structure TDMA, la portée de TETRA 1 est limitée à 58 km. En modifiant l'intervalle de temps en liaisons ascendante et descendante ainsi que l'intervalle de protection entre les intervalles, il a été possible avec TETRA AGA (*Air-Ground-Air*) d'augmenter la portée jusqu'à 83 km. Avec AGA, les utilisateurs dans un avion peuvent communiquer via une station de base au sol, ce qui est intéressant surtout pour les organes de sécurité. AGA autorise les services V+D de TETRA 1, mais pas de TEDS.

II.6.2 TETRA Enhanced Data Service (TEDS)

Alors que les premiers systèmes TETRA étaient utilisés surtout pour la communication vocale, les applications basées sur la transmission de données sont de plus en plus répandues aujourd'hui. *TETRA Enhanced Data Service* (TEDS), la principale nouveauté de TETRA 2, a permis non seulement une modulation de phases $\pi/8$ -D8PSK, mais aussi l'introduction d'une technique multiporteuses robuste avec des sous-porteuses QAM modulées.

La technique multi-porteuse de TEDS permet l'introduction de 8 sous-porteuses par canal radio (25kHz) avec un écart entre les fréquences de 2,7 kHz. Le débit symbole pour le symbole QAM sur ces sous-porteuses est de 2,4 symboles/s. Sur le principe, la technique multi-porteuse ressemble beaucoup à la procédure OFDM, utilisée notamment avec le LTE et la radiodiffusion numérique. Toutefois, contrairement à la procédure OFDM, les symboles sont filtrés dans la bande de base et les émissions hors bande intempestives sont fortement réduites.

La technique multi-porteuse est utile dans des conditions de diffusion difficiles avec beaucoup réflexions. Les sous-porteuses peuvent être modulées comme suit :

- 4-QAM (pour la desserte des bords de cellule)
- 16-QAM (pour des débits faibles)
- 64-QAM (pour de hauts débits, avec une bonne qualité de signal)

Les variations d'amplitude sont très grandes avec la technique multi-porteuses et la modulation QAM. Elles peuvent même être plus importantes qu'avec la modulation de phases de TETRA 1. Il faut donc utiliser des amplificateurs très linéaires et complexes ou diminuer la puissance d'émission. Cette dernière mesure réduit le rayon maximum des cellules pour TETRA 2.

TEDS permet de connecter 2, 4 ou 6 canaux radio de 25kHz et d'obtenir pour une seule connexion des largeurs de bande de 50 kHz, de 100 kHz ou de 150 kHz. Avec TEDS, en liaison descendante, 34 symboles QAM sont transmis par intervalle de temps (14,17 ms) et par sous-porteuse. Avec une largeur de bande maximale de 150 kHz (48 sous-porteuses), cela correspond à 1632 symboles QAM par intervalle de temps [12].

II.7 Les avantages et inconvénients de TETRA

II.7.1 Les avantages de TETRA

Les avantages principaux du TETRA par rapport à d'autres technologies (telles que le GSM) sont :

- La fréquence utilisée est plus basse, ce qui permet des niveaux très élevés de couverture géographique avec un petit nombre d'émetteurs, réduisant ainsi le coût d'infrastructure.
- Etablissement d'appel rapide - un appel de groupe (un vers tous) est généralement établi en 0.5 seconde.
- À la différence de la plupart des technologies cellulaires, les réseaux TETRA fournissent typiquement un certain nombre de modes de secours tels que la capacité pour une station de base de passer des appels locaux en l'absence du reste du réseau, et « direct mode » où les mobiles peuvent continuer à partager des canaux directement si l'infrastructure du réseau TETRA est hors service. Le mode de passerelle - où un mobile simple avec un raccordement au réseau peut agir en tant que relais pour d'autres mobiles voisins qui sont hors de portée avec l'infrastructure.

- L'infrastructure TETRA fournit également une fonction de point-à-point que les systèmes radio analogiques traditionnels des services de secours ne peuvent pas fournir. Ceci permet à des utilisateurs d'avoir une liaison radio un-à-un entre mobiles sans devoir passer par un opérateur ou un dispatcher.
- À la différence des technologies cellulaires, qui relient un abonné à un autre abonné (un à un), TETRA est construit pour supporter les communications un à un, un à plusieurs et de plusieurs à plusieurs. Ces modes opérationnels sont parfaitement adaptés à la sécurité publique et aux utilisateurs professionnels.
- Avec TETRA, les communications, tant vocales que données, ne circulent pas en clair. Elles sont toujours encryptées, aussi bien au niveau de l'émission que de bout à bout.
- Au niveau sécuritaire, il y a la possibilité grâce à l'inscription des mobiles au démarrage de n'admettre à l'inscription au réseau qu'une liste définie de mobile.

II.7.2 Les inconvénients de TETRA

Ses inconvénients principaux sont:

- Le transfert de données est lent à 7.2 kbit/s par time slot (le flux de données utilisable n'est que de 3.5 kbit/s), bien que jusqu'à 4 time-slots puissent être combinés pour atteindre des taux plus élevés, en raison de l'adaptation nécessaire à la largeur des canaux de 25kHz.
- La nécessité d'avoir un terminal sûr et robuste fait aussi augmenter son prix.
- TETRA ne peut supporter qu'un nombre de terminaux mobiles très inférieur à ce qu'un réseau GSM et les technologies semblables permettent dans un secteur donné (ceci n'est pas un problème dans les applications pour lesquelles il est normalement employé, mais cela limite la plupart du temps l'utilisation de TETRA à ces applications) [11].
- En raison de la nature pulsée (burst) du TDMA utilisé par le protocole, les combinés peuvent interférer avec des dispositifs électroniques sensibles tels que les stimulateurs et défibrillateurs cardiaques, de même qu'avec d'autres équipements de transmission radio quand ils sont utilisés à proximité immédiate (en particulier à moins d'un mètre de distance) [9].

II.8 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. 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.

Dans ce chapitre, nous avons étudié les caractéristiques de la norme TETRA qui répond à des nouveaux besoins. C'est dans cette optique qu'intervient ce deuxième chapitre. Après une brève description de l'architecture générale de la norme TETRA, les objectifs techniques et les caractéristiques de réseau radiocommunication TETRA, ainsi que les principales techniques utilisées dans l'interface air de ce type de réseau. Notre troisième chapitre présente les processus de dimensionnement du réseau PMR basé sur la norme TETRA.

Chapitre III :
Etude de la planification du
Réseau TETRA

III.1 Introduction

Pour un opérateur de télécommunication la phase de dimensionnement est primordiale avant la mise en œuvre de son réseau.

Dans ce chapitre, nous introduirons les concepts de base et les calculs mathématiques nécessaires au dimensionnement d'un réseau cellulaire de type TETRA permet d'assurer un cout minimal de la liaison radio et de l'infrastructure du réseau, en tenant compte de la couverture radio et d'estimer le nombre approximatif des sites nécessaires et le nombre des stations de base pour faciliter le travail des industriels et des opérateurs des réseaux.

III.2 Dimensionnement du réseau TETRA

Le dimensionnement des réseaux mobiles est un problème complexe qui met en jeu à la fois des aspects théoriques et pratiques. C'est la première phase dans la procédure de planification d'un système radio. Il a pour but d'établir les configurations radios du réseau TETRA et sa stratégie de déploiement à long terme. Les activités de cette première phase contiennent [9] :

- Le bilan de liaison radio, pour calculer le maximum de perte de trajet dans les deux cas Uplink (UL) ou Downlink (DL).
- Estimation de la marge de Gain.
- Modèle de propagation.
- Estimation du rayon de la cellule et estimation de la couverture.

III.3 Processus de dimensionnement du réseau TETRA

Le dimensionnement des TBS est la partie la plus délicate. Du coup elle doit être bien développée. On a deux méthodes à suivre. La première tient compte des exigences de la capacité et la deuxième tient compte des exigences de la couverture, pour déterminer le rayon de chaque cellule et puis le nombre des sites.

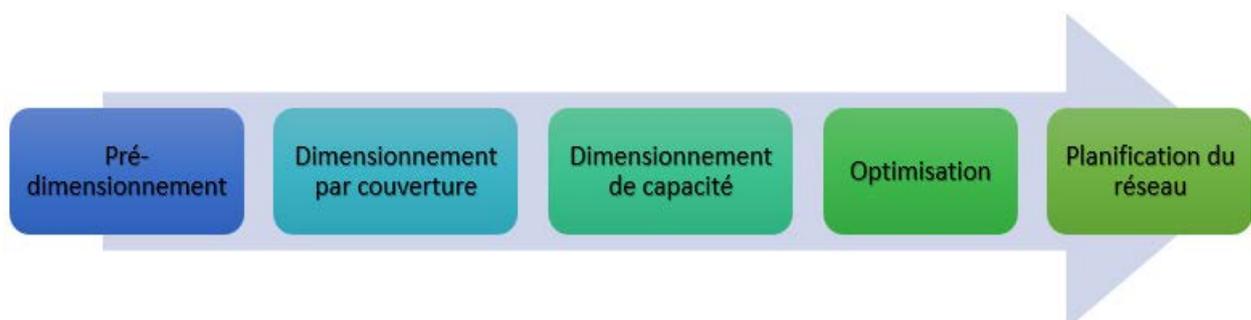


Figure III.1 : Les étapes du processus de dimensionnement.

Comme montre la figure ci-dessus, le processus de dimensionnement se résume en 4 grandes phases :

a) Pré-dimensionnement

La phase de planification préliminaire est la phase de préparation avant de commencer la planification réelle du réseau. On doit collecter des informations sur la région, les critères de planification de réseau sont utilisés introduits à l'outil comme entrée sont :

- L'information détaillée sur les L'TBS et l'TMS.
- L'information sur la zone de déploiement (superficie, information démographique)
- Les données géographiques : cartographie, population, zone de couverture et taux de pénétration des données dans cette zone (service demandée, trafic offert, etc.).
- Les services à offrir : voix, données.
- Les listes du site: identifier les lieux pour placer les TBS.
- Le type d'antenne à utiliser.

b) Dimensionnement par couverture

Analyse de la couverture reste fondamentalement l'étape la plus critique dans la conception de réseau TETRA. On va se baser sur le Bilan de liaisons (RLB : *Radio Link Budget*), qui permet d'estimer le taux de perte du trajet (*Path loss*).

Pour cela, il est nécessaire de choisir d'un modèle de propagation approprié. Le résultat final obtenu est la taille de la cellule à couvrir, ce qui donne une estimation sur le nombre total de sites. Cette estimation basée sur les exigences de couverture doit être vérifiée aussi par les besoins de capacité. Cette démarche se résume dans la figure III.2 :

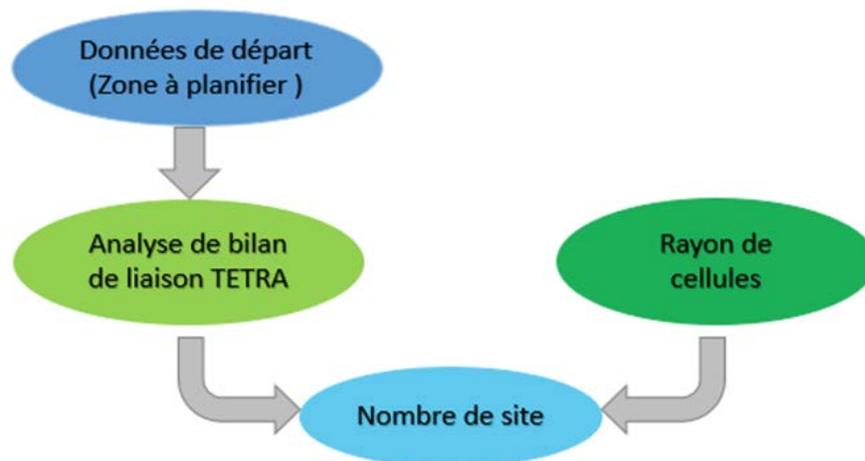


Figure III.2 : Les étapes du processus de dimensionnement par couverture

c) Dimensionnement de capacité

La vérification de la taille des cellules et le nombre des sites obtenue par l'analyse de couverture, sera effectué par la capacité, on va vérifier si le système peut supporter la charge demandée sinon de nouveaux sites doivent être ajoutés.

d) Optimisation

L'Optimisation du réseau est la phase finale qui permet de vérifier la satisfaction des clients et résoudre leurs plaintes, en comparant les résultats obtenus de deux dimensionnement, et on considère le nombre des sites le plus grand.

Nous commencerons notre travail par le dimensionnement de couverture.

III.4 Dimensionnement orienté couverture

Comme on a indiqué précédemment, le dimensionnement de couverture tient compte des exigences en couverture. On va se baser sur le bilan de liaisons (RLB: Radio Link Budget), qui permet d'estimer le taux perte du trajet (*Path Loss*). Pour cela, il est nécessaire de choisir un modèle de propagation approprié.

Le résultat final obtenu est la taille de la cellule à couvrir, ce qui donne une estimation sur le nombre total de sites nécessaire pour couvrir le domaine. Cette démarche se résume dans la figure III.3 :

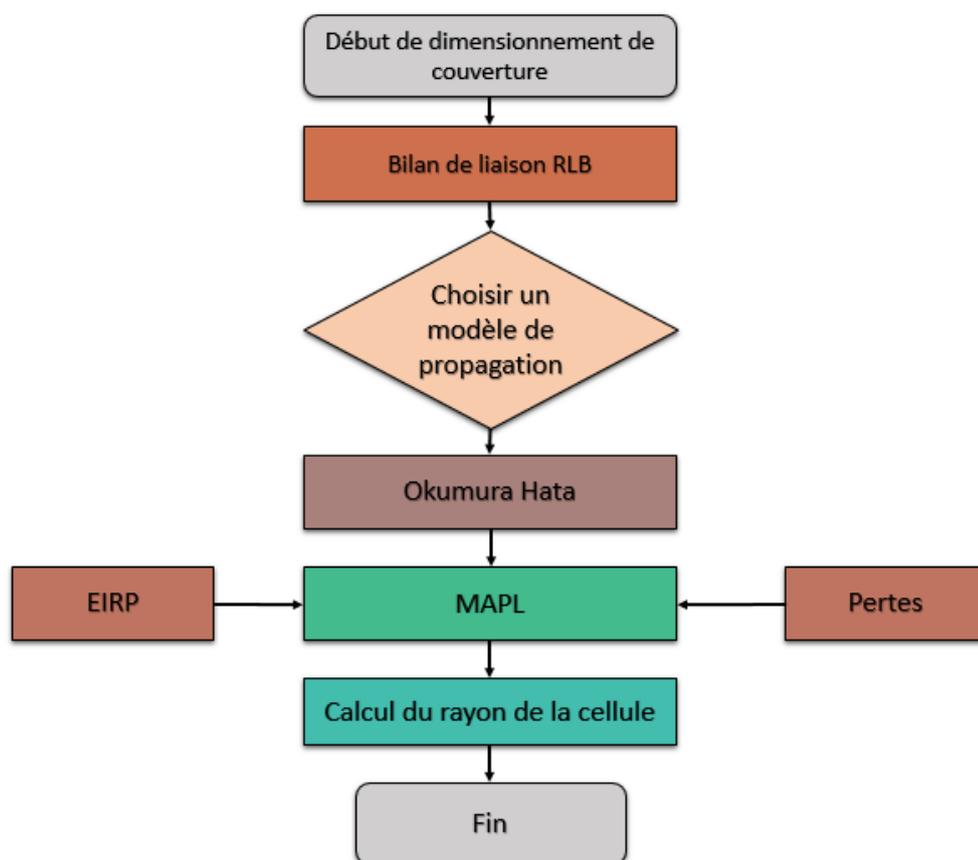


Figure III.3 : Calcul de dimensionnement de couverture.

III.4.1 Propagation dans l'environnement radio

En parcourant un trajet entre l'émetteur et le récepteur, le signal transmis est sujet à de nombreux phénomènes dont la plupart ont souvent un effet dégradant sur la qualité du signal. Cette dégradation se traduit en pratique par des erreurs dans les messages revus qui entraînent des pertes d'informations pour l'utilisateur ou le système. Les dégradations du signal dues à la propagation en environnement mobile peuvent être classées en différentes catégories [19].

a) Zone de Fresnel

La diffraction d'un signal se produit quand l'onde radio rencontre un obstacle. L'énergie apparaît ainsi dans l'ombre, appelée « zone de Fresnel », qui correspond à une atténuation située sous le rayon direct.

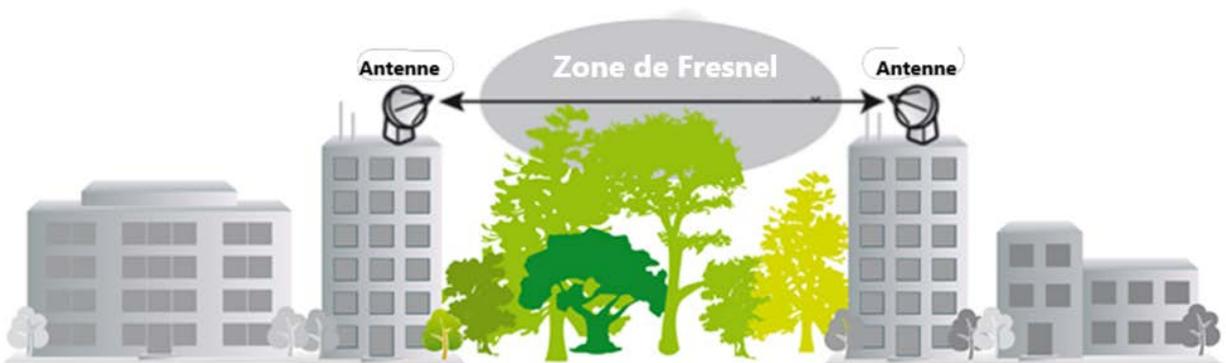


Figure III.4 : Diffraction et zone de Fresnel.

b) Effet trajets multiples

Comme schématisé par la figure (III.5), une onde radio se propage dans tout l'espace, elle va être réfléchiée ou absorbée par les obstacles rencontrés. En zone urbaine, les ondes réfléchies seront naturellement en nombre beaucoup plus important qu'en zone rurale car le nombre de réflecteurs y est plus important. L'onde radio peut en effet se réfléchir sur tout type d'obstacle : montagne, bâtiment, camion, avion, discontinuité de l'atmosphère ...etc.

La réflexion sur un bâtiment dépend de la hauteur, de la taille, de l'orientation du bâtiment et des directions des trajets de l'onde radio. Dans certains cas, le signal réfléchi est très fortement atténué alors que dans d'autres, presque toute l'énergie radio est réfléchiée et très peu est absorbée (cas d'un réflecteur quasi parfait), les réflexions multiples peuvent provoquer donc plusieurs trajets entre l'émetteur et le récepteur (multipath propagation).

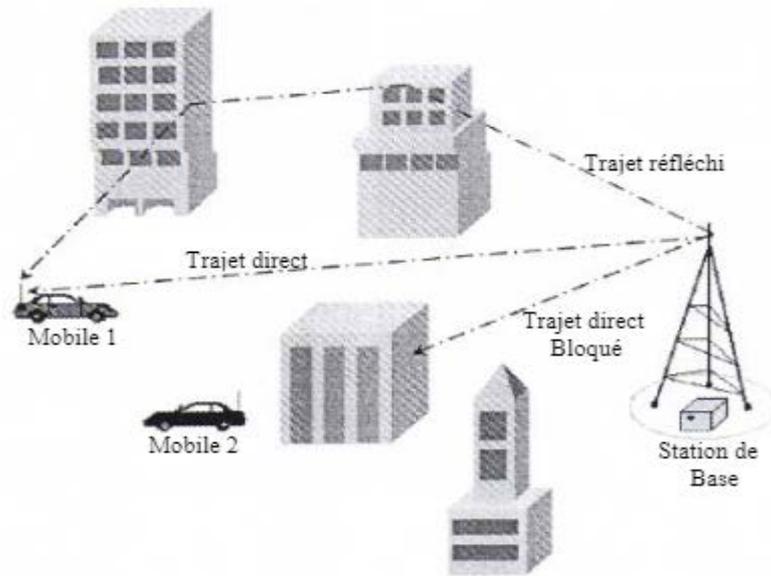


Figure III.5 : Propagation par trajets multiples.

III.4.2 Le bilan de liaison

Le processus de calcul de la couverture permet de déterminer les positions idéales des stations de base. Le calcul de la couverture considère la puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE) de chaque station de base. La PIRE représente la puissance émise au niveau de l'antenne de la station de base. La couverture optimale est donc obtenue par la détermination et l'optimisation des positions des stations de base, des hauteurs, des azimuts et des tilts des antennes ainsi que de la PIRE de chaque station de base.

Les paramètres des stations de base ne sont pas déterminés à l'étape de calcul de couverture et de détermination des positions des sites radio. Il s'agit en particulier des paramètres suivants : la puissance de la station de base, les caractéristiques des feeders (Ligne de transport d'énergie), les coupleurs et les amplificateurs. Les valeurs de ces paramètres sont ajustées et fixées lors de la phase de calcul du bilan de liaison. Chaque cellule doit donc être paramétrée de façon à ce que les contraintes de qualité de service soient respectées.

L'opération suivante est le calcul du bilan de liaison, cette dernière a pour but d'équilibrer les puissances d'émission sur les liens montants et descendants dans chaque cellule en ajustant les paramètres correspondants. L'équilibrage des liaisons doit assurer un fonctionnement symétrique du système en tout point de la couverture. Grâce à cela, les problèmes d'interférence seront limités. Les paramètres que le planificateur devra ajuster sont typiquement : la puissance d'émission, la sensibilité en réception, les équipements tels que les coupleurs [9].

L'équation RLB de base est comme suit (en dB) :

$$\begin{aligned}
 MAPL = & TxPower + TxGain - TxLosses - SeTBS \\
 & + RxGains - RxLosses - RxNoises
 \end{aligned}
 \tag{III.1}$$

Avec :

MAPL : Perte de trajet totale rencontré par le signal envoyé de l'émetteur au récepteur (dB).

TxPower : La puissance transmise par l'antenne d'émission (40-49dBm).

TxGain : Gain de l'antenne d'émission (dBi).

TxLosses : Les pertes de l'émetteur (dB).

SeTBS : Sensibilité du TBS (dBm)

RxGains : Gain de l'antenne de réception (dB).

RxLosses : Les pertes de réception (dB).

RxNoise : Bruit de réception (dB).

III.4.3 Modèles de propagation

Le modèle de propagation permet d'estimer la valeur de l'atténuation de trajet. Le choix du modèle de propagation est un compromis entre la précision de la prévision et l'efficacité de calcul. Il est important de noter que les modèles de propagation dépendent du type de zone comme urbaine, suburbaine et rurale.

III.4.3.1 Catégories des modèles de propagation

En se basant sur l'environnement radio, les modèles de prédiction peuvent être classés en deux principales catégories :

- Modèle Macro-cellule
- Modèle Micro-cellule

a) Modèle Macro-cellule

Les modèles Macro-cellules sont des modèles généralement fondés sur l'analyse des obstacles qui s'y trouvent (colline, forêt, etc.) ; ils sont essentiellement destinés aux installateurs de réseaux mobiles en environnement rural. Ces modèles s'appuient généralement sur des données géographiques de type maillé de sol et de sursol. Une mise au point par ajustement de variables est opérée à l'aide de mesures expérimentales du fait de la pauvreté des informations géographiques fournies et de la simplicité des algorithmes de calcul.

b) Modèle Micro-cellule

Contrairement aux modèles statistiques Macro-cellules qui prédisent une couverture radio moyenne et pas très précise essentiellement en milieu ouvert, les modèles Micro-cellules essaient de prédire une zone de couverture moins étendue mais plus précise. Ces modèles sont essentiellement destinés aux installateurs de réseaux mobiles en environnement urbain ou semi-urbain [20].

III.4.4 Modèles de propagation utilisés

III.4.4.1 Modèle empirique macro-cell Okumura-Hata

C'est le modèle le plus utilisé. Il tient compte de la fréquence, de la radiosité, de la distance entre l'émetteur et le récepteur et de la hauteur de la station de base et du mobile. Il prend en considération également la nature de l'environnement en qualifiant son degré d'urbanisation (Urbain, Suburbain ou Rural).

Le modèle de **Hata** a été adapté pour les limites suivantes :

- Fréquence (f) : 150 à 1000 MHz.
- Hauteur de la station de base (Hb) : 10 à 200 m (dépend toujours de la zone : *clutter*).
- Hauteur du terminal mobile (Hm) : 1 à 10 m.
- Distance (d) : 1 à 20 km.

L'affaiblissement selon ce modèle est donné par les équations suivantes :

a) Urbain :

En milieu urbain, l'affaiblissement en dB appelé ici Lu est donné par :

$$Lu(db) = 69,55 + 26,16 \text{Log}(f) - 13,82 \text{Log}(hb) - a(hm) + [44,9 - 6,55 \text{Log}(hb)] \text{Log}(d) \quad (\text{III.2})$$

Avec le paramètre $a(hm)$ est un facteur de correction dépendant de la hauteur de l'antenne de la station mobile et de l'environnement dont la valeur est :

$$a(hm) \text{ dB} = [1,1 \text{Log}(f) - 0,7] hm - [1,56 \text{Log}(f) - 0,8] \quad (\text{III.3})$$

b) Sous Urbain :

En milieu suburbain, l'affaiblissement Lsu exprimé en dB est donné en appliquant la formule milieu urbain affectée d'une correction :

$$Lsu(dB) = Lu - 2[\text{log}(f/28)]^2 \quad (\text{III.4})$$

c) Rurale :

Deux cas qui se posent :

- **Ouverte**

$$Lro(dB) = Lu - 4,78 [\text{log}(f)]^2 + 18,33 \text{Log}(f) - 40,49 \quad (\text{III.5})$$

- **Quasi-ouverte**

$$Lrqqo(dB) = Lu - 4,78 [\text{log}(f)]^2 + 18,33 \text{log}(f) - 35,94 \quad (\text{III.6})$$

III.4.4.2 Le modèle Standard Propagation Model

Parmi les modèles de prédiction de la propagation, le plus connu est certainement le modèle SPM. Il s'agit d'un modèle empirique facile à implanter sur machine. Expression du modèle on cite parmi eux :

- Les facteurs sont variables.
- La diffraction est prise en considération sur la carte.
- SPM soutient utilisant différentes K1 constante et la distance coefficient K2 pour LOS/ NLOS et proche / lointain région.

Grâce aux nouvelles fonctionnalités précédentes, SPM est plus souple et s'applique à d'autres scénarios. L'expression du modèle est donnée par l'équation suivante :

$$LSPM = K1 + K2 \cdot \log(d) + K3 \cdot \log(HTx_{eff}) + K4 \times \text{Diffraction Loss} + K5 \cdot \log(d) \times \log(HTx_{eff}) + K6(HRx_{eff}) + K7 \cdot \log(HRx_{eff}) + K_{clutter} \times f(clutter) \quad (III.7)$$

Avec :

K1	Décalage constant (dB).
K2	Facteur de multiplication pour log(d).
D	Distance entre le récepteur et l'émetteur (m).
K3	Facteur de multiplication pour log (HTx _{eff}).
HTx_{eff}	Hauteur effective de l'antenne d'émission (m).
K4	facteur de multiplication pour le calcul de diffraction
Diffraction Loss	Perte due à la diffraction sur un chemin obstrué (dBb).
K5	Facteur de multiplication pour log(d) × log(HTx _{eff}).
K7	Facteur de multiplication pour log(HRx _{eff}).
HRx_{eff}	Efficace hauteur de l'antenne mobile (m).
K(clutter)	Facteur de multiplication de F(clutter).

Tableau III.1 : Paramètres du modèles SPM [20].

III.4.5 Calcul de la couverture pour l'Uplink

Les calculs sont effectués selon les étapes suivantes :

- Débit requis.
- Sensibilité récepteur TBS.
- Bruit Uplink (marge d'interférence)
- Bilan de liaison.

III.4.5.1 Débit requis

On commence par définir l'exigence de qualité qui est exprimée comme un débit binaire déterminé qui peut être fournie à un utilisateur sur les bordures de la cellule. Le débit binaire requis dépend du service pour lequel le système est dimensionné.

Notre objectif est d'obtenir une estimation du nombre des sites en fonction des besoins en capacité. Et ces derniers sont définis par les opérateurs de réseau en fonction du trafic, on a connu que réseau TETRA offre un débit 7.2 kbit/s sur un canal de trafic. En cas de besoin, il est possible de regrouper quatre canaux pour atteindre un débit de données de 28.8 kbit/s.

III.4.5.2 Sensibilité TBS récepteur

La sensibilité d'un système de réception correspond à la puissance minimale reçue garantissant un niveau de qualité spécifié ($S \gg S_{e_{min}}$). Ce niveau de qualité peut en général s'exprimer par un rapport signal à bruit S/N minimal (S/N) min spécifié.

$$S_{bts}(dB) = N_t + N_f + 10 \log(WRB) + \gamma = NRU, UL + \gamma \quad (III.8)$$

Avec :

N_t : Densité de puissance de bruit thermique -174 dB m / Hz.

N_f : Le facteur de bruit est le rapport du signal d'entrée sur bruit pour déterminer les performances d'amplificateur. Le Facteur de bruit de TBS récepteur est en [dB].

WRB : La bande passante Bande passante par bloc de ressources.

γ : Rapport signal sur bruit de l'Uplink.

$NRU, UL = N_t + N_f + 10 \log(W)$: Bruit thermique pour les Uplink.

III.4.5.3 Pertes dans les câbles et les connecteurs (dB)

Ce sont les pertes combinées de toutes les composantes du système de transmission entre les sorties de l'émetteur et l'entrée d'antenne. En règle générale, la perte du câble dépend de la fréquence et du diamètre. Un câble mince a plus de perte que le câble d'épaisseur plus grande. La perte du câble est supérieure à une fréquence plus élevée.

- **Marge des lignes d'alimentation (Feeder)**

C'est une perte causée par les divers dispositifs qui sont situés sur le trajet de l'antenne vers récepteur, comme la perte de la ligne d'alimentation selon qui dépend de la longueur de la ligne, les connecteurs et les jumpers (sautes).

La figure ci-dessous montre les connexions typiques du système d'alimentation de l'antenne dans une station de base.

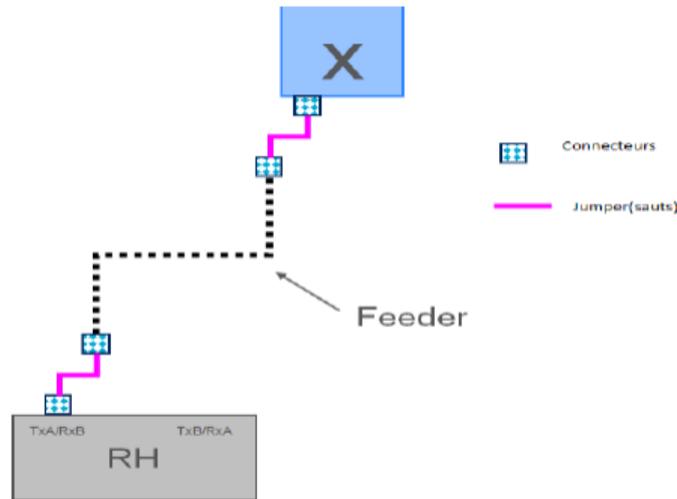


Figure III.6 : Connexions du système d'alimentation de l'antenne.

La formule de calcul de la perte de la ligne est la suivante :

$$\text{Perte Feeder (dB)} = \text{Feeder Loss}/100\text{m} \times \text{Feeder Length}/100\text{m} \quad (\text{III.9})$$

Feeder Length = Hauteur de la station de base + 5m

Feeder Loss = Perte de Jumper + Perte de connecteurs

Perte de Jumper = 1/2 cm feeder × nombre de cavaliers (jumpers)

Perte de connecteurs = nombre de connecteurs × 2 × 0.1 dB

III.4.5.4 Perte du corps (dB) (Body loss)

La perte du corps est la perte du signal par le corps de l'utilisateur. La perte se produit lorsque le corps de l'utilisateur réside dans le chemin du signal entre la station de base et la station mobile. Autrement dit, la perte corps dépend de la façon dont l'antenne de la station mobile est orientée vers la station de base antenne. La valeur typique de la perte de corps est supposée de l'ordre 2 dB [21].

III.4.5.5 Bilan de liaison pour le lien montant

a) PIRE (Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente) :

La puissance rayonnée par une antenne est appelée Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente (PIRE) ou *Effective Isotropic Radiated Power* (EIRP). Elle correspond à la puissance qu'il faudrait fournir à une antenne isotrope pour obtenir le même champ à la même distance. La PIRE est donnée en dBm par la formule suivante :

$$\text{PIRE(dBm)} = \text{Pems} - \text{Pertes} + \text{Gms} \quad (\text{III.10})$$

Pems: Puissance d'émission mobile (MS).

Pertes : Perte du corps humain ($TxbodyLoss$) + pertes du câbles ($LcMS + LfMS$)

Gms : Gain de l'antenne d'émission du MS

La figure ci-dessus illustre le bilan de liaison pour la liaison montant.

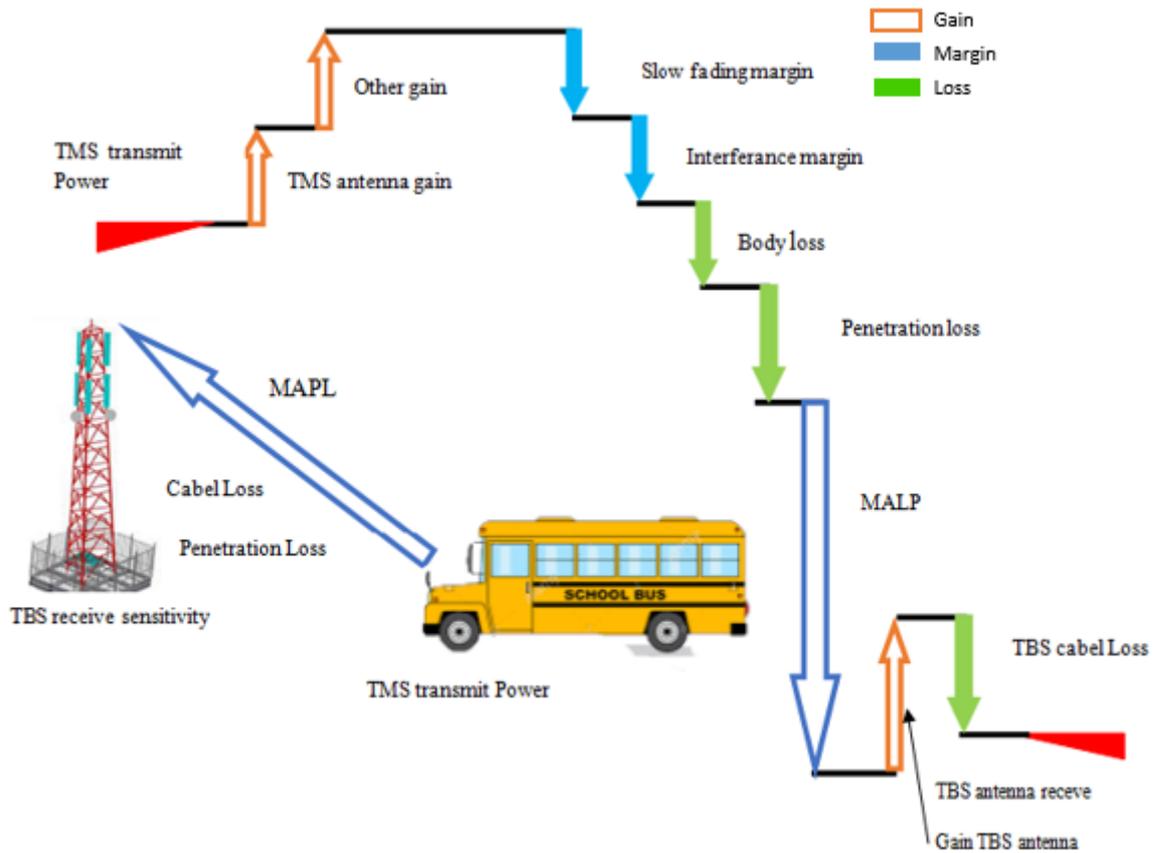


Figure III.7 : Modèle bilan de liaison Uplink.

b) MAPL (Maximum Allowable Path Loss) :

L'affaiblissement maximal de parcours, exprimé en dB. C'est le paramètre qu'on veut déterminer à travers l'établissement d'un bilan de liaison. Pour calculer le **MAPL** il faut d'abord calculer le champ équivalent E (dBm) :

$$E(\text{dBm}) = S_{bts} + (M_f + M_{In}) + (L_{cbts} + L_{fbts} + T_{xbody loss}) - G_{abts} - G_{dbts} \quad (\text{III.11})$$

S_{bts} : Sensibilité du récepteur (dbm).

$(M_f + M_{In})$: Marge d'évanouissement + Marge d'interférence.

L_{cbts} : Perte du combineur de la bts (dB).

L_{fbts} : Perte due au câble à la BTS (db).

$T_{xbody loss}$: Perte du corps humain (dB).

G_{dbts} : Gain de diversité entre les secteurs (dB).

G_{abts} : Gain d'antenne de réception TBS (db).

L'affaiblissement de propagation **MAPL** (dB) est donné par :

$$MAPL = PIRE - E \quad (\text{III.12})$$

III.4.6 Calcul de la couverture pour Downlink

a) PIRE :

La PIRE est décrit par l'équation suivante :

$$PIRE(dBm) = Pe_{bts} - Pertes + G_{BTS} \tag{III.13}$$

Pe_{bts} : La puissance d'émission de la BTS (dBm).

$Pertes$: $LC_{BTS} + Lf_{BTS} + Perte\ du\ corps\ humain\ (Rx\ body\ loss)$.

G_{BTS} : Gain de l'antenne d'émission du BTS.

La figure ci-dessus illustre le bilan de liaison pour la liaison descendant.

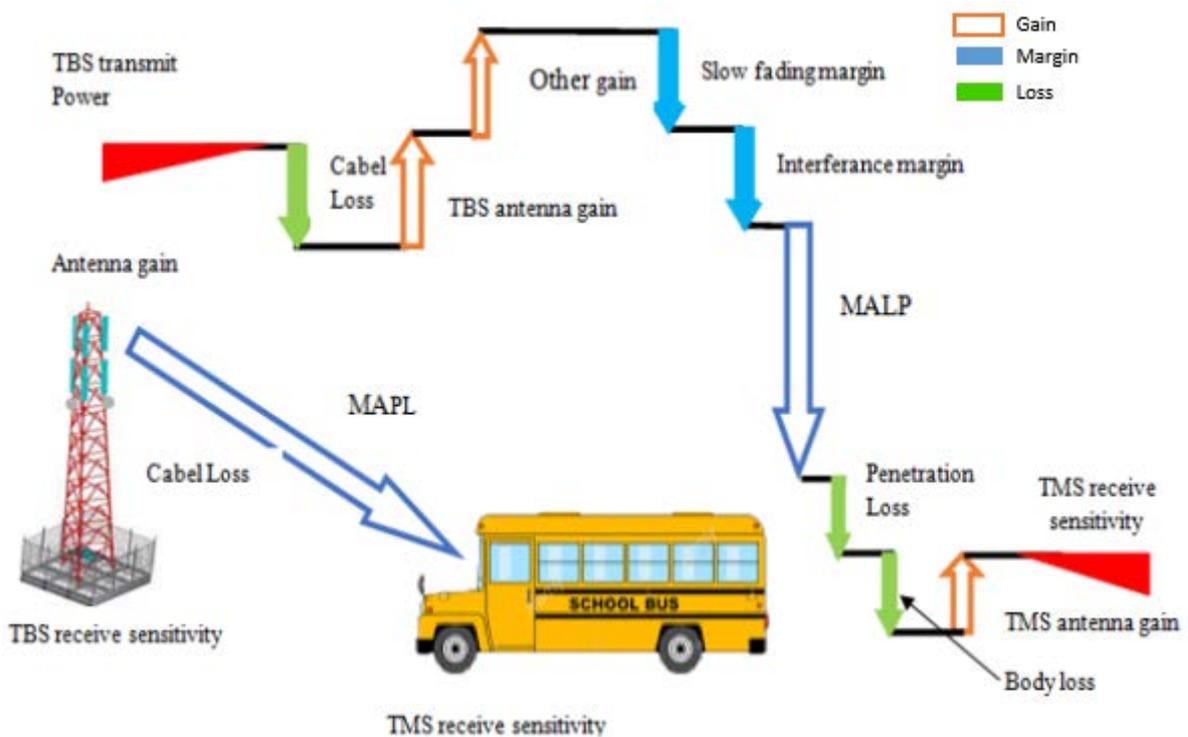


Figure III.8 : Modèle bilan de liaison Downlink.

b) MAPL :

Le champ équivalent E (dbm) est donné comme suite :

$$E(dBm) = Stms + (Mf + Min) + (LcMS + Lf MS + Rx\ body\ loss) - GMS \tag{III.14}$$

L'affaiblissement de propagation $MAPL$ (dB) est exprimé par la formule :

$$MAPL = PIRE - E \tag{III.15}$$

c) La sensibilité du l'équipement utilisateur récepteur

L'équation de la sensibilité est comme suite :

$$STMS(dB) = Nt + Nf + 10log(WRB) + \gamma = NRB,DL + \gamma \tag{III.16}$$

III.4.7 Estimation du rayon de la cellule

Après avoir déduit l'affaiblissement du parcours maximum (MAPL) par l'institution d'un bilan de liaison immuable, nous tentons de déterminer le rayon de la cellule en utilisant le modèle de propagation adapté.

En effet, lorsque l'affaiblissement de parcours est pareil à sa valeur maximale, la distance parcourue est semblable au rayon de la cellule. Nous allons saisir un exemple pour bien admettre le principe.

Pour être un peu plus clair on peut prendre un exemple, en supposant que l'environnement est urbain et qu'on va y appliquer le modèle Okumura-Hata. Selon la formule (III.2), on obtient:

$$MAPL = 69.55 + 26.16 \text{Log}(F) - 13,82 \text{Log}(hb) - a(hm) + [44.9 - 6.55 \text{Log}(hb)]. \text{Log}(R_{Cell})$$

Donc :

$$\text{Log}(R_{cell}) = \frac{[MAPL - (69.55 + 26.16 \cdot \text{Log}(F) - 13,82 \cdot \text{Log}(hb) - a(hm))]}{[44.9 - 6,55 \cdot \text{Log}(hb)]}$$

D'où le rayon de la cellule est donné par :

$$R_{cell}(Km) = 10^{\frac{[MAPL - (69.55 + 26.16 \cdot \text{Log}(F) - 13,82 \cdot \text{Log}(hb) - a(hm))]}{[44.9 - 6,55 \cdot \text{Log}(hb)]}} \quad (III.17)$$

III.4.8 Estimation du nombre de sites

Une fois le rayon de la cellule R_{cell} est déterminé, on peut calculer S_{cell} la superficie de couverture de la cellule. Cette dernière, dépend bien du nombre de secteurs par site (omnidirectionnel, bi-sectoriel ou tri-sectoriel).

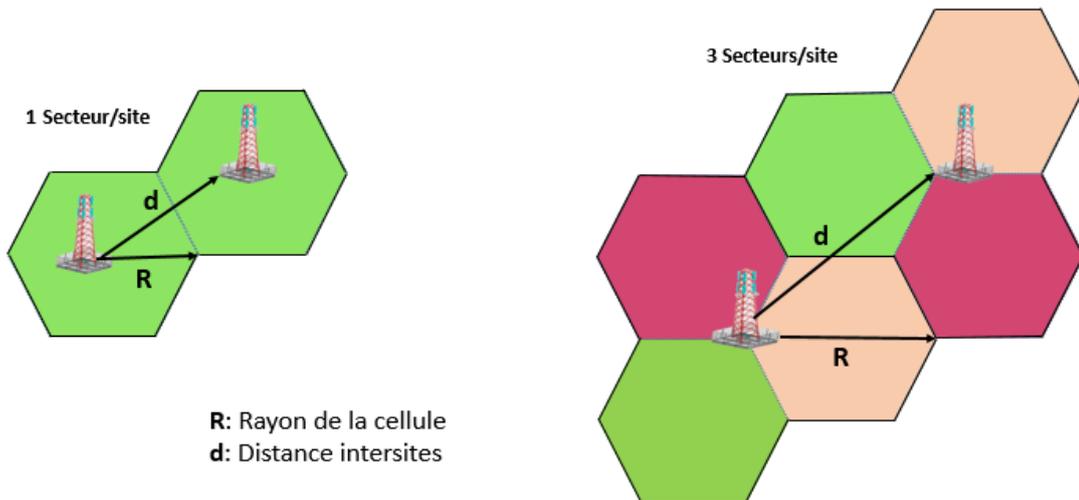


Figure III.9 : Modèle hexagonales de cellule.

La figure ci-dessus illustre la méthode de calcul de la zone des sites à partir de 2 modèles hexagonales de cellule ou la surface de la zone, si nous choisissons le motif hexagonal est :

$$S = K \cdot R^2 \quad (III.18)$$

Où S est la surface couverte, R le rayon de maximal de la cellule et K est une constante.

- *Pour un site omnidirectionnel*

$$d = \sqrt{3}R \quad (\text{III.19})$$

$$S_{S1} = \frac{3\sqrt{3}}{2} \times R^2 = 2.6 \times R^2 \quad (\text{III.20})$$

- *Pour un site a 3 secteurs*

$$d = \frac{3}{2} \times R \quad (\text{III.21})$$

$$S_{S3} = \frac{9\sqrt{3}}{8} \times R^2 = 1.95 \times 2.6 \times R^2 \quad (\text{III.22})$$

Après la résolution de l’empreinte du site, nous pouvons déterminer le nombre de sites N_s adéquat pour la couverture pour une zone à l’aide de cette formule :

$$N_s = \frac{S_z}{S_s} \quad (\text{III.23})$$

S_z : C’est la surface totale de la zone, dépend du type de la zone (Urbaine, Suburbaine, Rural, etc..), dans notre application la surface de la zone est un paramètre donné « input » pour garantir un résultat exact.

III.5 Dimensionnement par capacité

La capacité disponible dans chaque station de base doit être planifiée en fonction de l’usage qui en est prévu. À cet égard, les éléments suivants sont importants :

- Emplacement (centre-ville, zone urbaine, banlieue, campagne).
- Présence d’infrastructures spéciales à proximité (aéroport, stade de football, salle de concerts, centre commercial, etc.).
- Nombre de ressources patrouillant habituellement dans la zone, nombre de groupes de communication différents qu’elle doit supporter et schéma des appels (groupes, privés, téléphonie).

Ce serait gaspiller les deniers publics que de dire que chaque station de base doit être équipée de 4 carriers (porteuses), juste pour le cas où, peu importe qu’elle ne soit guère utilisée dans des circonstances ordinaires. On peut attendre du gestionnaire du réseau qu’il étudie les schémas d’utilisation et déplace la capacité après une période initiale d’utilisation qui corrobore ou invalide les estimations faites en phase de planification [9].

La capacité peut aussi être renforcée provisoirement pour faire face à une soudaine augmentation prévue des besoins de capacité pour un événement planifié peu récurrent. Cependant, dans le cadre d’un incident grave spontané du moins au cours des quelques premières heures. Cette phase fait appel essentiellement à ces paramètres clés :

- La capacité de la cellule dans le sens montant et le sens descendant.
- Le volume de trafic généré par les abonnés de la zone de déploiement : déterminé à travers le nombre d'abonnés dans la zone et le trafic offert par abonné.

Dans le cas de notre réseau TETRA, qui s'intéresse aux lignes de bus des étudiants universitaires de l'université de Tlemcen (ville de Tlemcen), le dimensionnement par capacité n'est pas pris en considération à cause de la faible capacité de la société à couvrir, qui représente le nombre total des bus.

III.5.1 Débit de la cellule

Notre but est d'obtenir une estimation du nombre des sites en fonction des besoins en capacité. Et ces derniers sont définis par les opérateurs de réseau en fonction du trafic, on sait que le réseau TETRA offre un débit 7.2 kbit/s sur un canal de trafic. En cas de besoin, il est possible de regrouper quatre canaux pour atteindre un débit de données de 28.8 kbit/s.

III.5.2 Allocation des fréquences

Pour résoudre le problème d'allocation de fréquences, on repose essentiellement sur les modèles des réseaux à structure régulière. Dans ce type de modèle, chaque fréquence est réutilisée selon un motif régulier et fixe. Sur la *Map* (Cartographie numérique), il est facile d'appliquer le motif de réutilisation tel qu'il est défini théoriquement par 3 cellules [9].

III.6 L'outil de dimensionnement du réseau TETRA

Puisque le processus de planification est complexe, il est nécessaire de développer un outil permettant de faciliter la tâche de planification. Dans la conception de notre outil et pour répondre à nos besoins, nous avons choisi le langage Matlab qui permet de réaliser les interfaces graphiques qui aide l'opérateur à calculer et vérifier certains paramètres du dimensionnement du réseau.

III.6.1 Interface d'accueil

Lors du démarrage de notre application « **TETRA_Planning** », nous apercevons la fenêtre principale qui affiche une interface d'accueil de dimensionnement d'un réseau TETRA, telle que présente la figure (III.10). Cette interface comporte :

- Logo de la faculté de Technologie et l'université de TLEMEN.
- Logo de notre simulateur.
- Quelques informations supplémentaires sur les développeurs : Les noms des étudiants et l'encadreur, etc.

Un bouton nommé « **Démarrer** » pour le démarrage de notre application proprement dit, tout en appelant une autre interface.

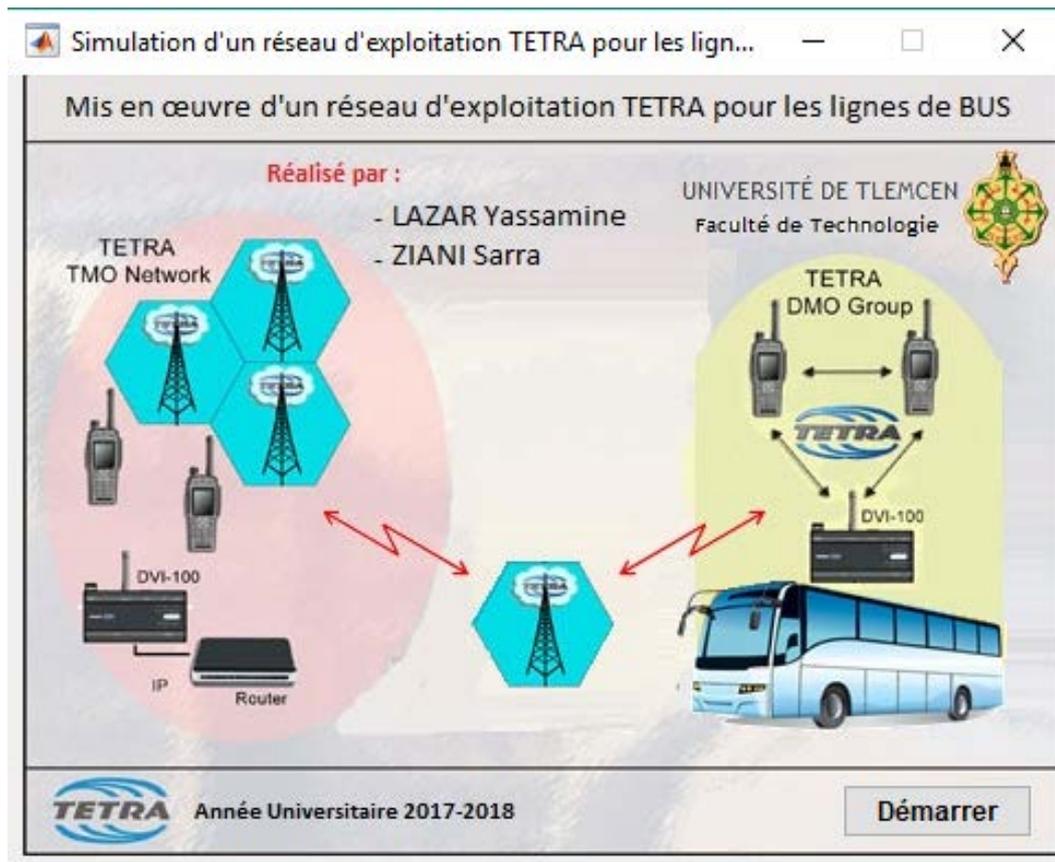


Figure III.10 : Interface d'accueil de l'application.

III.6.2 Dimensionnement d'un réseau Tetra « Uplink » et « Downlink »

Dans cette fenêtre (Figure III.11), l'utilisateur doit choisir les différents paramètres de bilan de liaison dans les deux sens, montant « Uplink » et descendant « Downlink » :

- Puissance d'émission du MS
- Gain d'antenne d'émission du MS
- Pertes de couplage du MS
- Pertes du corps humain
- Sensibilité du récepteur BTS
- Perte de câble du BTS
- Gain d'antenne de réception BTS
- Gain de diversité du BTS
- Marge de fading
- Marge de véhicule

L'interface contient des paramètres par défaut comme montre la figure III.11.

Bilan de liaison « UpLink » MS->BTS		Bilan de liaison « DownLink » BTS->MS	
Puissance d'émission MS (dBm)	30	Puissance d'émission BTS (dBm)	43.98
Gain d'antenne d'émission du MS (dBi)	0	Gain d'antenne d'émission du BTS (dBi)	11
Pertes de couplage du MS (dB)	0	Pertes de couplage du BTS (dB)	1
Pertes de câbles du MS (dB)	0	Perts de Câbles BTS (dB)	1
Pertes du corps (Tx Body loss)(dB)	6	Pertes du corps (Rx Body loss) (dB)	4
Sensibilité du récepteur BTS (dBm)	-112	Sensibilité du récepteur MS (dBm)	-105
Gain d'antenne de réception BTS (dBi)	11	Gain d'antenne de réception MS (dBi)	0
Gain de diversité du BTS (dBi)	0	Gain de diversité du MS (dBi)	0
Marge Fading (dB)	7	Marge Fading (dB)	7
Marge Incar (Véhicule) (dB)	6	Marge Incar (Véhicule) (dB)	6

Figure III.11 : Paramètres de bilan de liaison en « Uplink » et en « Downlink ».

III.6.3 Résultat de dimensionnement

Dans cette fenêtre, on trouve les paramètres de modèle de propagation Okumura-Hata que l'utilisateur doit paramétrer en choisissant le degré d'urbanisation de la zone (Urbain, Sous-Urbain, Rural Ouvert, Rural Quasi-ouvert), les hauteurs respectives du terminal mobile et la station de base, la fréquence de transmission et la surface de la zone à couvrir.

Après avoir entré tous les paramètres, il suffit de cliquer sur le bouton **Calculer** pour obtenir les résultats du dimensionnement de notre réseau TETRA en Uplink et en Downlink (Figure III.12). Cette fenêtre est destinée à afficher, les informations suivantes :

- Puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE)
- Champs équivalent (E)
- Affaiblissement de propagation maximal (MAPL)
- Affaiblissement le plus contraignant
- Rayon maximal des cellules
- Distance inter-sites maximale

- Surface de couverture du site
- Nombre de stations de bases
- Affaiblissement du modèle de propagation

The screenshot shows the 'Tetra' application window with the following data:

Modèle de propagation	
Le type de zone à dimensionner	Urbaine
Hauteur de l'antenne du BTS (m)	100
Hauteur de l'antenne du MS (m)	1.5
Fréquence de transmission (Mhz)	400
Surface de la zone à couvrir (Km ²)	37.39

Resultats du bilan de liaison	
« UpLink »	
La PIRE (dBm)	24
Le Champ équivalent E (dBm)	-108
MAPL (dB)	132
« DownLink »	
La PIRE (dBm)	48.98
Le Champ équivalent E (dBm)	-88
MAPL (dB)	136.98

Resultats du dimensionnement	
MAPL le plus contraignant (dB)	132
Rayon max des cellules (Km)	2.51856
distances Inter-sites max (Km)	3.77784
Surface de couverture de site (Km ²)	16.4922
Nombre de stations de base (BTS)	3
Affaiblissement Okumura Hata (dB)	149.597

Buttons: Retour, Calculer, Suivant

Figure III.12 : Résultat de dimensionnement en « Uplink » et en « Downlink ».

III.7 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons représenté les étapes de dimensionnement et les différents paramètres correspondants pour un réseau TETRA. Nous avons représenté le bilan de liaison radio tout en précisant les éléments qui influent sur ce dernier. En introduisant les concepts de base et les calculs mathématiques nécessaires au dimensionnement sur le plan couverture. Nous avons, ainsi présenté notre application *TETRA_Planning* qui a été implémentée en tenant compte des règles de dimensionnement et de planification de réseau TETRA.

En plus d'un simple outil de dimensionnement, le simulateur *TETRA_Planning* permet, grâce à ses interfaces graphiques implémentées et développées sous Matlab, une gestion efficace et une bonne utilisation des informations de dimensionnement, ainsi une facilité de calcul des différents paramètres nécessaires d'un site comme le rayon d'une cellule, le nombre de site.

En effet, une bonne application de processus de dimensionnement et de la planification permet d'améliorer considérablement les performances de réseau en termes de couverture. Dans le chapitre suivant, on va s'intéresser sur une étude pratique de la planification et d'optimisation du réseau TETRA pour le réseau de Bus des étudiants de l'université de Tlemcen dans la ville de TLEMEN, on se focalise sur les grandes lignes de Bus et en utilisant l'outil de planification Atoll pour atteindre nos objectifs.

Chapitre IV :

Planification et déploiement d'un réseau TETRA

IV.1 Introduction

Dans ce dernier chapitre, nous allons vous exposer les étapes de planification d'un réseau radio PMR basé sur la norme TETRA. Pour cela, nous utilisons l'outil de planification et d'optimisation des réseaux cellulaires « Atoll » pour déployer un nouveau réseau TETRA pour les lignes de Bus universitaires de la ville de TLEMEN, tout en basant sur les résultats de calcul obtenus par notre outil de dimensionnement développé dans le chapitre précédent.

Pour répondre à nos besoins, le présent chapitre focalise sur l'utilisation du logiciel Atoll qui permet de planifier et optimiser les réseaux cellulaires et qui peut être utilisé sur tout le cycle de vie des réseaux pour garantir une meilleure qualité de service aux clients en termes de capacité et de couverture.

Nous commençons, ce chapitre, par une présentation générale de l'outil Atoll, puis nous décrivons les étapes de mise en œuvre et la simulation de notre réseau ainsi que l'étude des différentes prédictions fournies par notre simulateur. Cette étude va nous permettre d'aborder et d'analyser la partie planification qui nous intéresse dans notre projet de planification radio.

IV.2 Présentation de l'outil ATOLL

Atoll est une plateforme multi-technologique de design et d'optimisation de réseau sans fil, qui appuie les opérateurs mobiles dans tout le cycle de vie du réseau, du design initial à la densification et d'optimisation.

Le logiciel exploite différentes données en entrée à savoir le modèle de propagation, les paramètres des antennes, les paramètres des sites selon la technologie adoptée au niveau du projet à réaliser. *Atoll* permet de créer des projets avec les technologies GSM, GPRS, EDGE, UMTS, HSPA, CDMA2000, WiMAX, Wi-Fi et le LTE et LTE-A.

Enfin après avoir déployé un réseau, *Atoll* permet de réaliser de multiples prédictions comme :

- Couverture par niveau de champ.
- Couverture par émetteur.
- Etude du trafic.
- Zone de recouvrement.
- Couverture par niveau de C/I.

IV.2.1 Procédure de la planification

Les étapes de configuration d'Atoll sont :

- Création d'un projet TETRA.

- Importer la carte de TLEMCEM-5m (résolution des pixels 5m).
- Le système de coordonnées choisi est WGS84.

Nous avons créé les paramètres radios suivants :

- Site (un nom, une position et une hauteur).
- Transmetteur (contient une ou plusieurs antennes).
- Cellule.

IV.2.2 Interfaces de logiciel

L'interface de démarrage de l'outil de planification lance l'observateur d'événements montrant l'état d'exécution de l'outil comme montre la figure suivante :

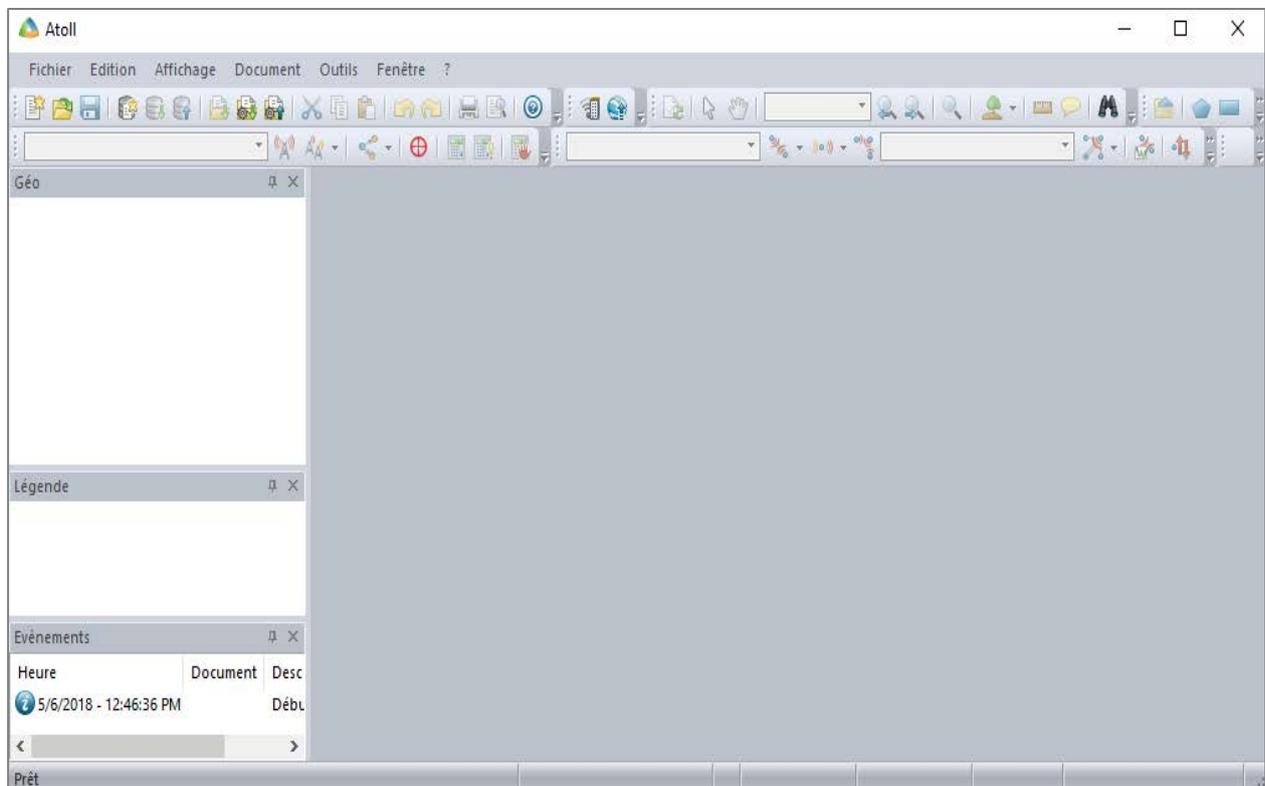


Figure IV.1 : L'interface de démarrage d'ATOLL.

Pour commencer la planification sous l'outil Atoll, il faut tout d'abord créer un nouveau projet. La figure IV.2 montre comment créer un nouveau projet à partir d'un document Template. Pour notre projet, nous choisissons le système TETRA.

Notons ici qu'Atoll ne possède pas, parmi les différentes Templates prédéfinies, une Template pour le système TETRA, nous étions obligés d'ajouter une nouvelle Template pour la technologie TETRA tout en respectant les caractéristiques techniques de cette norme, comme les fréquences de travail, les largeurs de bande passante, le nombre de canaux, le type d'antennes

et ses caractéristiques (Type, gain, largeur d'ouverture, puissance d'émission... etc.) ainsi que le type des cellules.

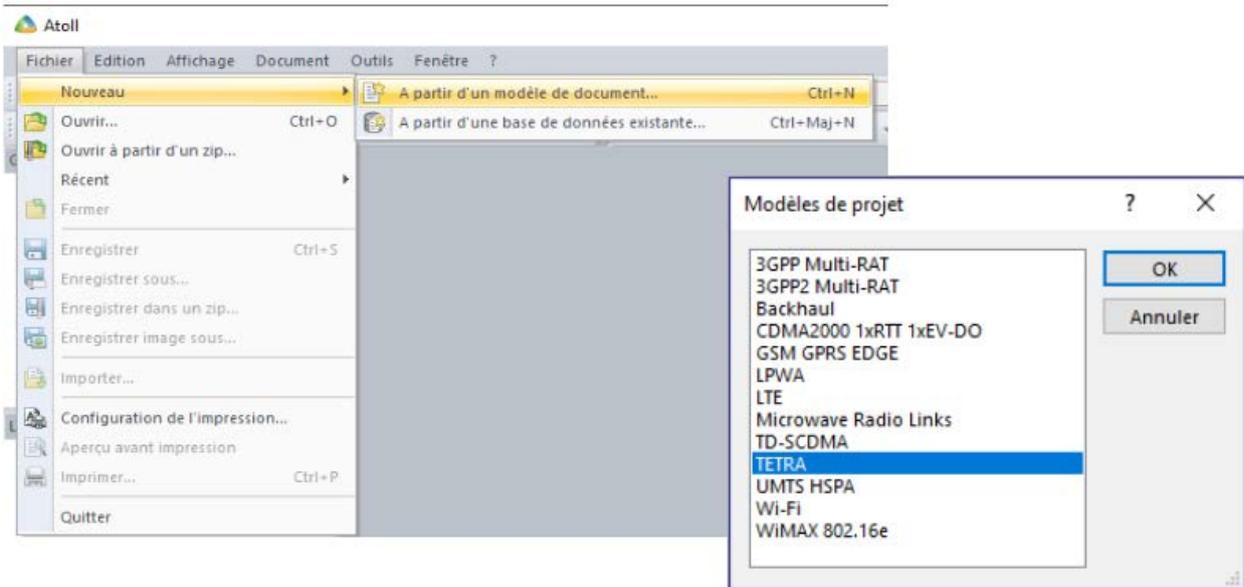


Figure IV.2 : Choix du projet.

IV.2.3 Systèmes de coordonnées

Le système de coordonnées WGS84 est le système géodésique standard mondial, notamment utilisé par le système GPS ; il s'est rapidement imposé comme une référence pour la cartographie numérique. Un système géodésique est un système de référence permettant d'exprimer les positions au voisinage de la Terre.

Les deux figures IV.3 et IV.4 expliquent les étapes à suivre pour le choix du système de coordonnées convenable a notre projet.

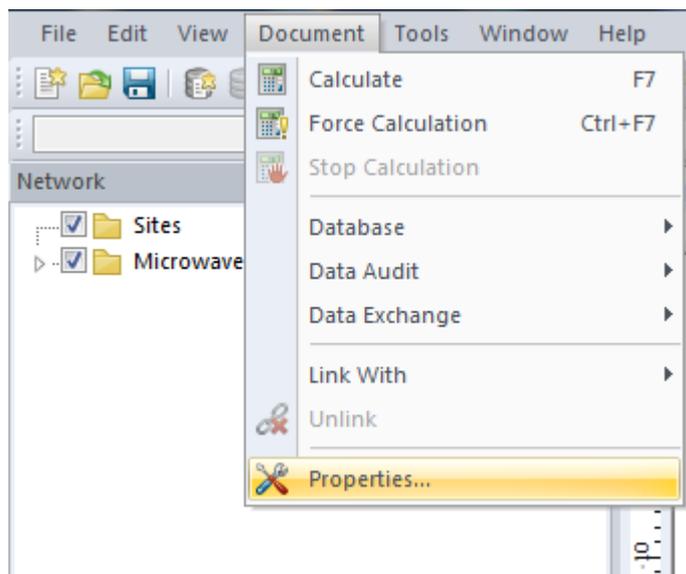


Figure IV.3 : Choix du système de coordonnées.

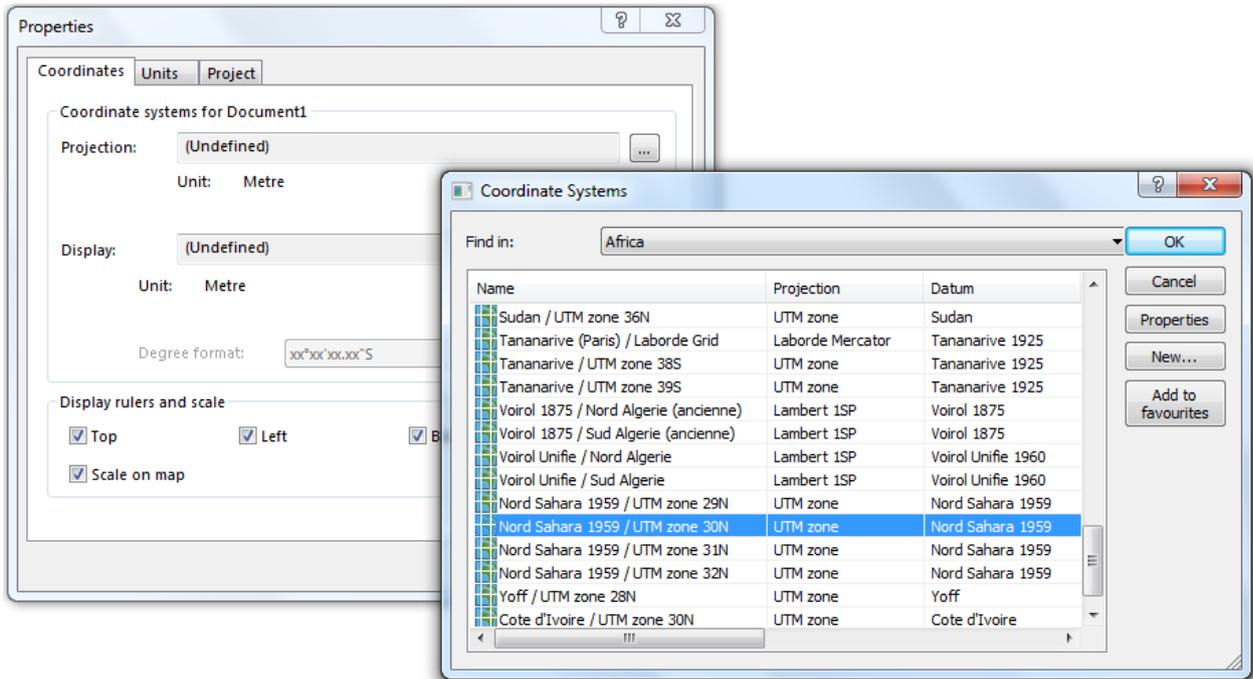


Figure IV.4 : Liste des systèmes de coordonnées.

IV.2.4 Importer les cartes numériques

Le profil des cartes du trafic basé sur l'environnement utilisateur ne doivent être utilisés que pour une précision sur le trafic qui est du même niveau que l'encombrement statistique disponible dans un projet. Avant de commencer le calcul, il est nécessaire d'importer la carte sur laquelle on va planifier la zone désirée.

Tous d'abord, nous allons importer la carte de la ville de TLEMCCEN (Carte avec Clutter classes, Clutter height, vector... etc.) comme le montre la figure suivante.

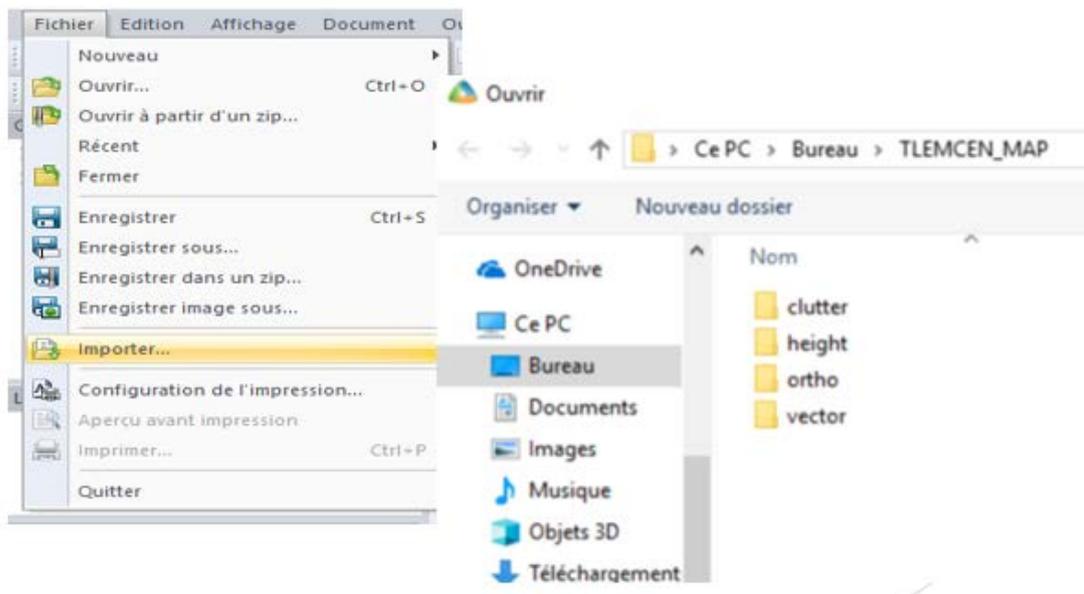


Figure IV.5 : Importation de la carte numérique de la ville de Tlemccen.

IV.2.5 Zone géographique à planifier

La zone géographique couvre une partie de Wilaya de Tlemcen (Figure IV.6) (la ville de Tlemcen). La ville se situe à l'Ouest de l'Algérie, elle présente beaucoup de zones d'habitation. On trouve de nombreux immeubles, plusieurs quartiers résidentiels, quelques espaces verts, des axes routiers, ainsi que des zones industrielles (Figure IV.7).

Pour préciser la zone géographique et l'environnement sur lesquels nous allons travailler, nous avons besoin de 4 entrées essentielles :

- **Clutter** : C'est le fichier image représentant la nature du relief dans la région sur laquelle nous allons déployer notre réseau. Elle permet de classer les surfaces selon leurs caractéristiques en : Open, Sea, inland_water, park, industrial, etc.
- **Heights** : C'est un dossier d'altitudes qui permet de donner l'élévation par rapport au niveau de la mer. Il sera utilisé lors du calcul du niveau de signal en tenant compte aussi de l'élévation des bâtiments dans la zone.
- **Ortho**: C'est un fichier ou un tableau précisant la distribution des bâtiments sur la carte de la zone en spécifiant la surface qu'ils occupent sur cette zone.
- **Vector** : contient des fichiers pour tracer les différents chemins (les routes principales et secondaires, les rues, les aéroports, l'autoroute, chemin de fer).

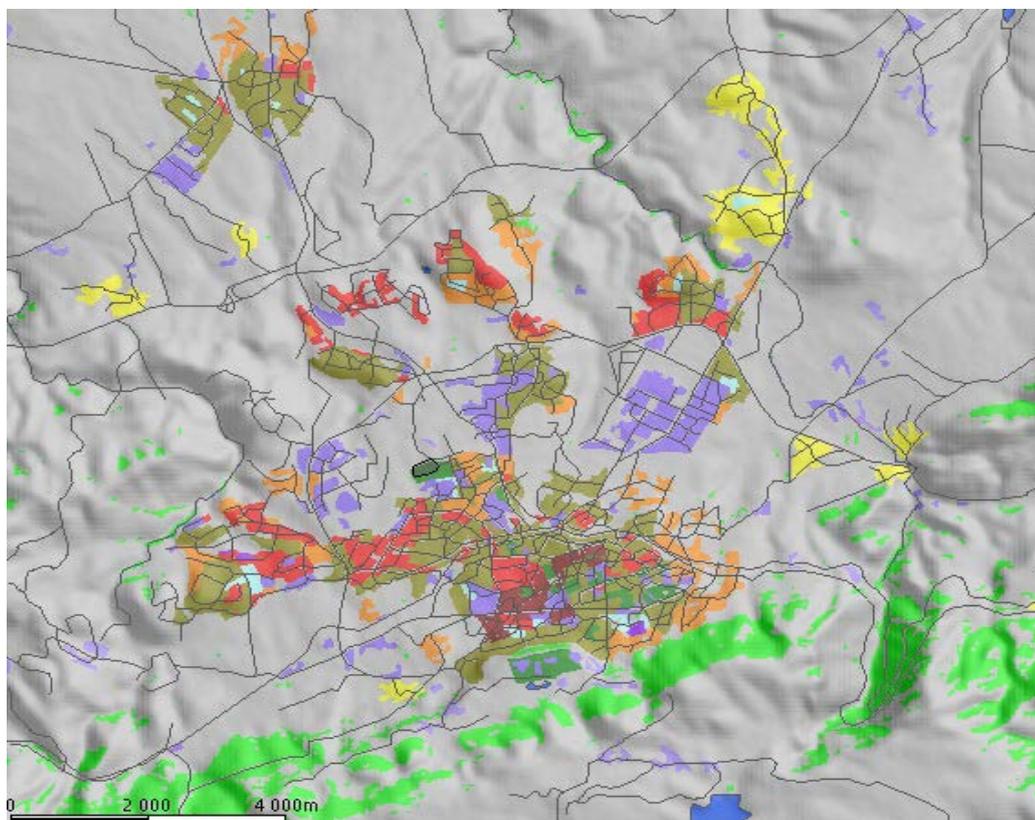


Figure IV.6 : Carte avec Clutter classes, Clutter height et Vector.

		Value	Legend	
1		1 - OPEN	1 - OPEN	<input checked="" type="checkbox"/>
2		2 - SEA	2 - SEA	<input checked="" type="checkbox"/>
3		3 - INLAND WATER	3 - INLAND WATER	<input checked="" type="checkbox"/>
4		4 - MEAN INDIVIDUAL	4 - MEAN INDIVIDUAL	<input checked="" type="checkbox"/>
5		5 - MEAN COLLECTIVE	5 - MEAN COLLECTIVE	<input checked="" type="checkbox"/>
6		6 - DENSE COLLECTIVE	6 - DENSE COLLECTIVE	<input checked="" type="checkbox"/>
7		7 - SKYCRAPERS	7 - SKYCRAPERS	<input checked="" type="checkbox"/>
8		8 - VILLAGE	8 - VILLAGE	<input checked="" type="checkbox"/>
9		9 - INDUSTRIAL	9 - INDUSTRIAL	<input checked="" type="checkbox"/>
10		10 - OPEN IN URBAN	10 - OPEN IN URBAN	<input checked="" type="checkbox"/>
11		11 - FOREST	11 - FOREST	<input checked="" type="checkbox"/>
12		12 - PARK	12 - PARK	<input checked="" type="checkbox"/>
13		13 - DENSE INDIVIDUAL	13 - DENSE INDIVIDUAL	<input checked="" type="checkbox"/>
14		14 - GROUP OF SKYCRAPERS	14 - GROUP OF SKYCRAPERS	<input checked="" type="checkbox"/>
15		16 - SCATTERED URBAN	16 - SCATTERED URBAN	<input checked="" type="checkbox"/>
16		18 - SWAMP	18 - SWAMP	<input checked="" type="checkbox"/>
17		19 - CHOTT_SEBKRA	19 - CHOTT_SEBKRA	<input checked="" type="checkbox"/>
18		20 - AIRPORT	20 - AIRPORT	<input checked="" type="checkbox"/>

Figure IV.7 : Tableau représente la légende de Tlemcen ville.

Le transport universitaire est un élément vital dans l'ensemble des prestations que fournissent les services de la direction des œuvres universitaires. La DOU Tlemcen dispose, pour ce faire, de 80 bus dédiés au circuit urbain assurant quotidiennement 6 rotations entre les différentes résidences et les différents pôles universitaires : pôle Chetouane, pôle Imama, pôle centre-ville, pôle Kiffane. Chaque jour, les 80 Bus transportent les 14 400 adhérents vers les 8 facultés que compte l'université Abou-Bekr-Belkaid -Tlemcen, à savoir la faculté des sciences, la faculté de technologie, la faculté de droit et des sciences politiques, la faculté des lettres et des langues, la faculté de la nature et de la vie, la faculté de médecine, faculté des sciences économiques et commerciales et la faculté des sciences humaines et sociales.

Pour localiser la zone de couverture on choisit l'onglet **Coverage Export Zone**, ensuite nous faisons le contour complet. Dans notre cas, sur la carte en cliquant sur la petite icône hexagonale de couleur blanche à droite. Nous faisons une clique droite sur la ligne pour visualiser la surface exacte de la zone à planifier.

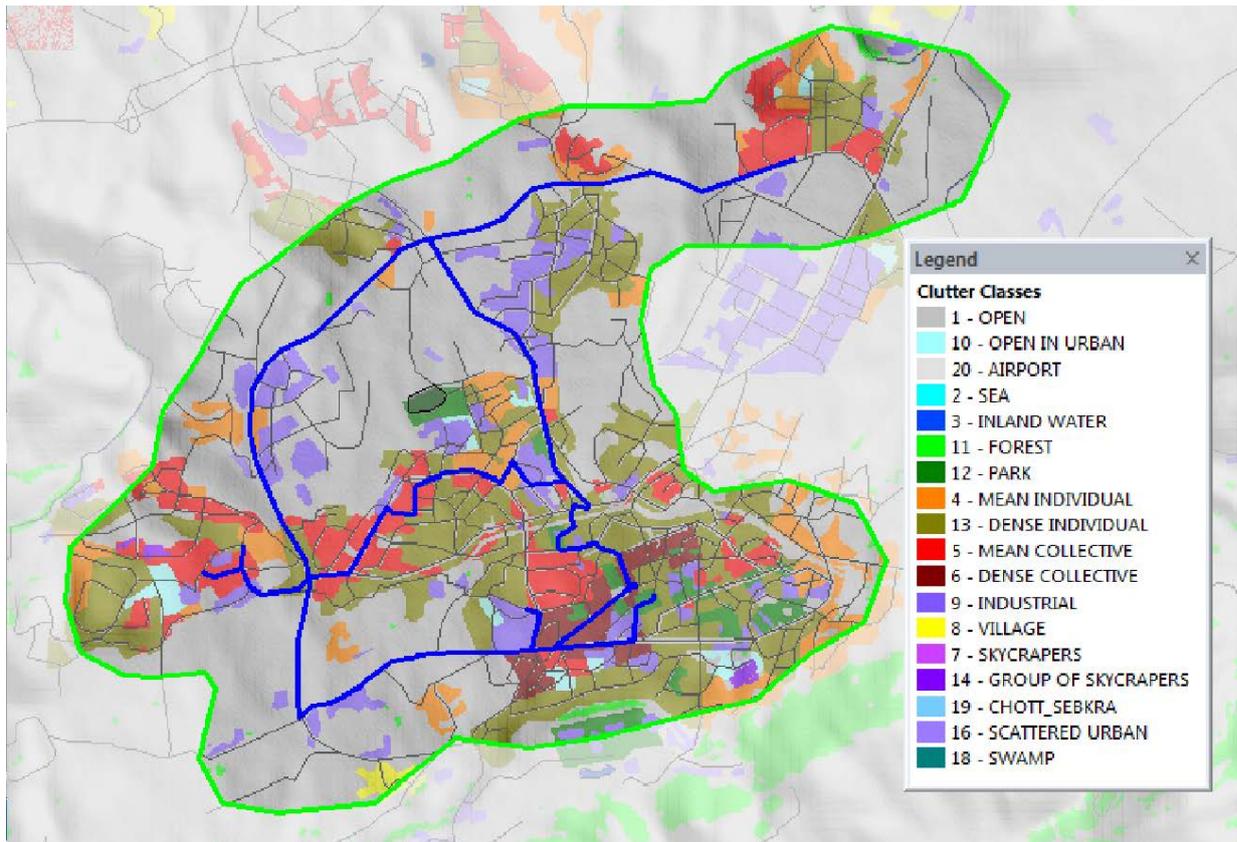


Figure IV.8 : Focus de la zone à planifier.

Le **Focus zone** (en vert): c'est la zone exacte à planifier, dans laquelle ATOLL génère ses rapport et statistiques. La figure précédente donne un aperçu de la zone à planifier, qui couvre un peu plus de 37,39 Km². Cette zone se caractérise par une forte densité de population. Chaque couleur désigne la densité de la zone. Nous pouvons remarquer sur la figure IV.8, la carte des routes des lignes de Bus des étudiants de l'université de Tlemcen (ligne bleu en gras). Le Bus est un moyen de transport couramment utilisés par les étudiant.

IV.3 Ajout des sites

Pour introduire les sites, nous avons choisi la méthode du motif hexagonal. Atoll calcule de façon automatique le nombre des sites nécessaires pour couvrir notre zone. Le logiciel Atoll propose un outil qui cherche automatiquement le(s) meilleur(s) emplacement(s) à donner au site pour les optimiser.

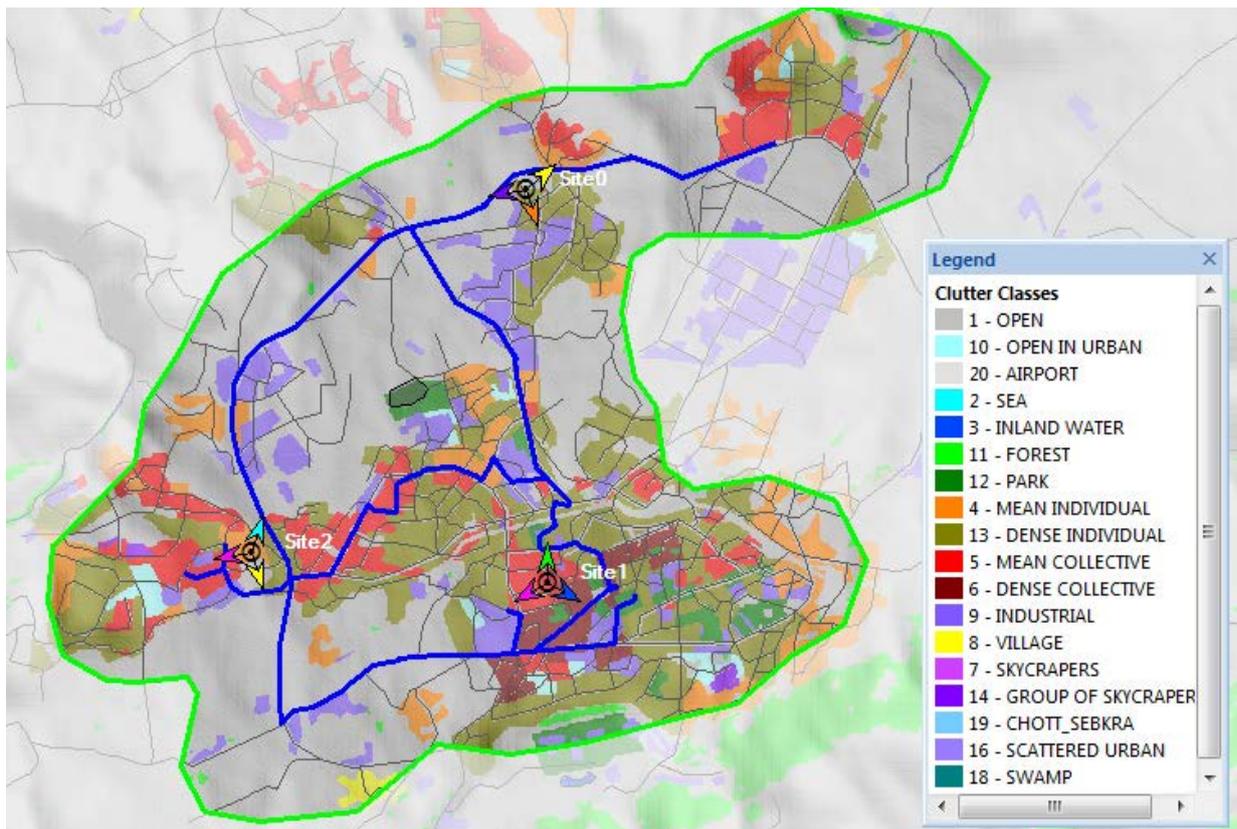


Figure IV.9 : Emplacement des sites TETRA sur la Map.

D'après le résultat de simulation de dimensionnement que nous avons réalisé par notre outil TETRA_Planning (chapitre précédent), nous avons besoin de 3 TBS (stations de base TETRA) pour couvrir la zone autour du réseau de Bus. La figure précédente montre la distribution des sites TETRA dans la zone choisie.

IV.3.1 Analyse des tronçons

Il est impératif de bien connaître le profil terrain de la zone en question pour voir si ces sites proposés vont assurer une bonne couverture ou non. Nous procédons par des études élémentaires des tronçons qui séparent chaque deux site successif. Si on prend l'exemple du tronçon entre le site 1 et le site 2. Le résultat d'analyse des tronçons entre les sites est schématisé par la figure IV.10.

La distance qui sépare ces deux sites est à peu près égale à 2871,3m. Le site 2 se trouve à (840m) une altitude élevée par rapport au site 1(798m) est respecté les prédictions du bilan de liaison. Il existe aucun obstacle entre les deux sites.

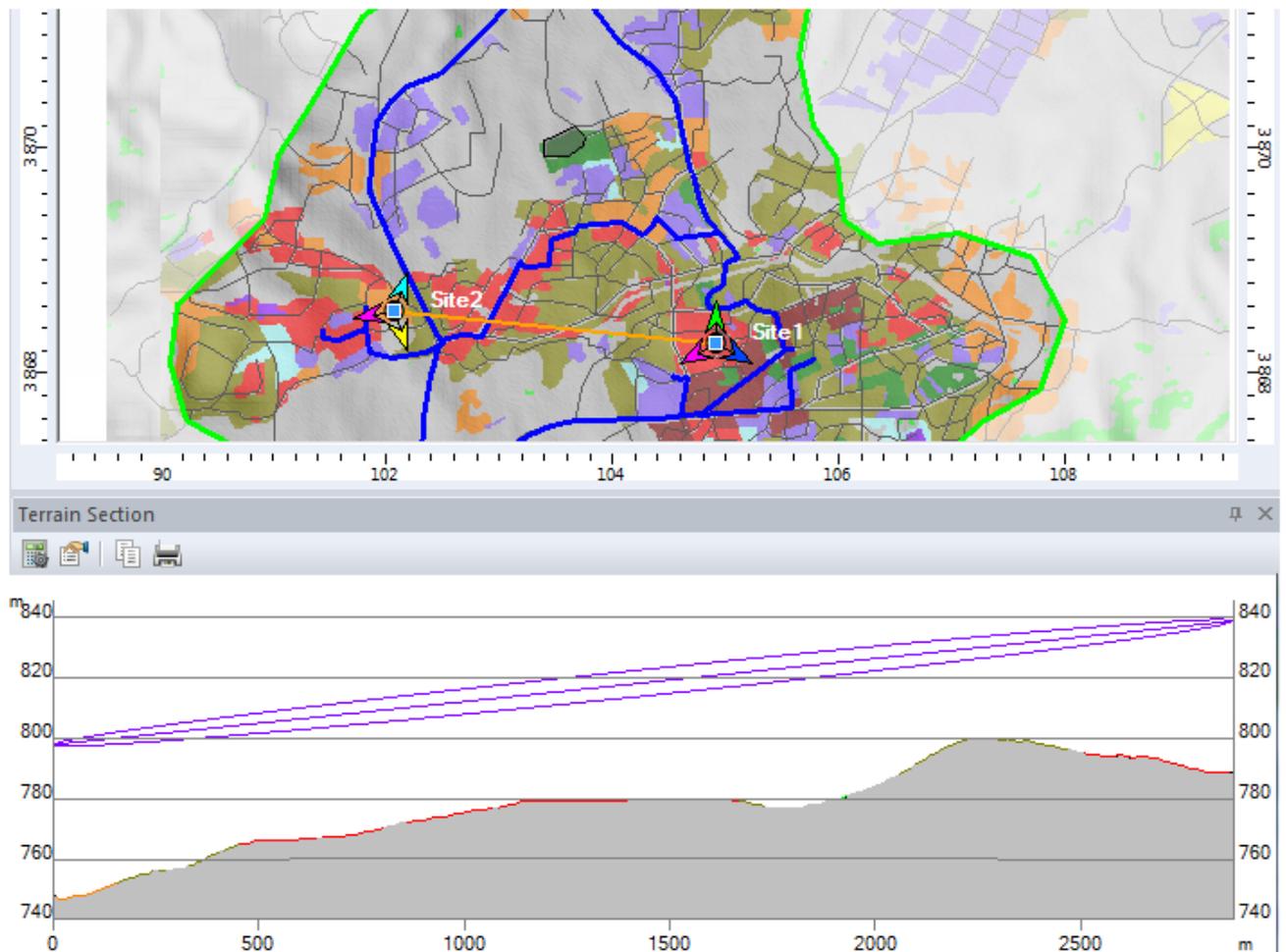


Figure IV.10 : Test de la liaison site 1 – site 2.

IV.4 Etude des prédictions

Atoll permet de réaliser de multiples prédictions ;

- Couverture par niveau de champ,
- Couverture par émetteur et étude du trafic,
- Zone de recouvrement
- Couverture par niveau de C/I ... etc.

Et selon les besoins :

- Type de zone,
- Type d'antenne et type de services (Débit).

La figure IV.11 représente le menu de choix de type de prédictions standards existants dans Atoll.

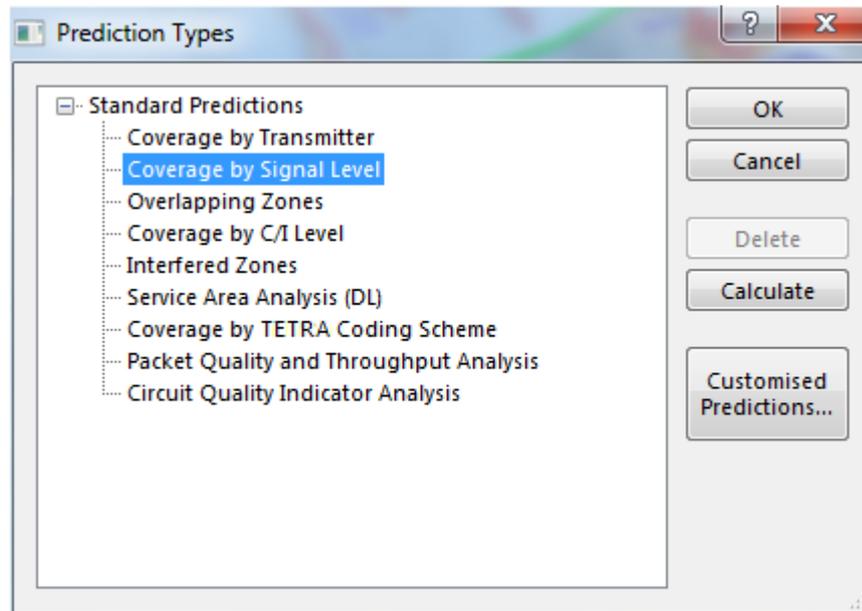


Figure IV. 11 : Choix de type de prédiction.

IV.4.1 Prédictions de la couverture par niveau de signal

Cette prédiction permet d'estimer la puissance reçue par un mobile en chaque point de la zone de calcul. L'objectif de cette étude est de détecter d'éventuelles zones aveugles et essayer de les éliminer en procédant à des modifications de la configuration des sites et des émetteurs comme un déplacement de site, un changement de l'azimut d'un émetteur, un réglage de puissance ou une inclinaison (tilt) d'une antenne.

La figure IV.12 montre la prédiction de la couverture par niveau de signal. Cette simulation présente la couverture par niveau de réception du signal conformément à une palette de couleur et les zones colorées en rouge montrent un niveau de signal très élevé autour de chaque cellule.

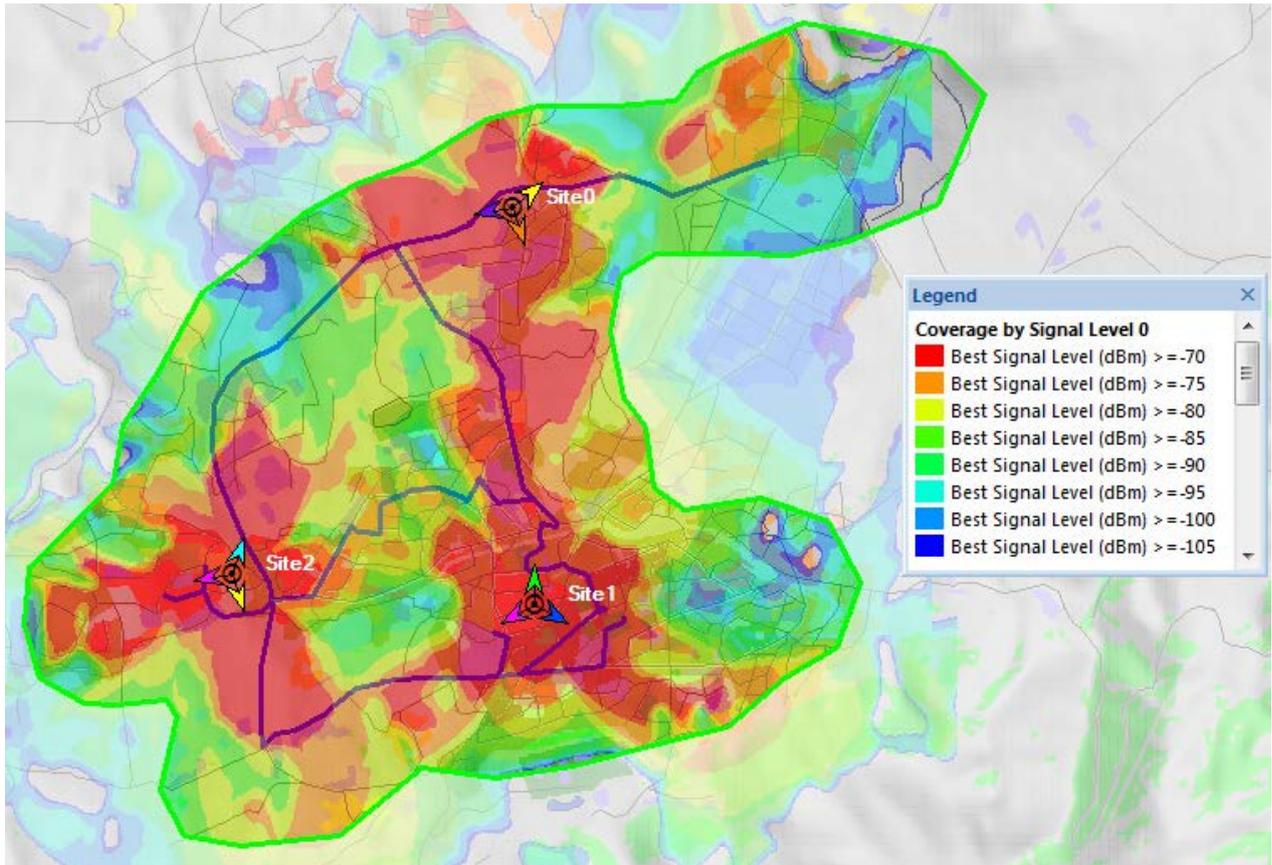


Figure IV.12 : Prédiction de la couverture par niveau du signal.

La figure suivante illustre les statistiques du résultat obtenu après le calcul qui est fait par ce type de prédiction. En remarquant que la zone sélectionnée des lignes des bus est bien couverte.

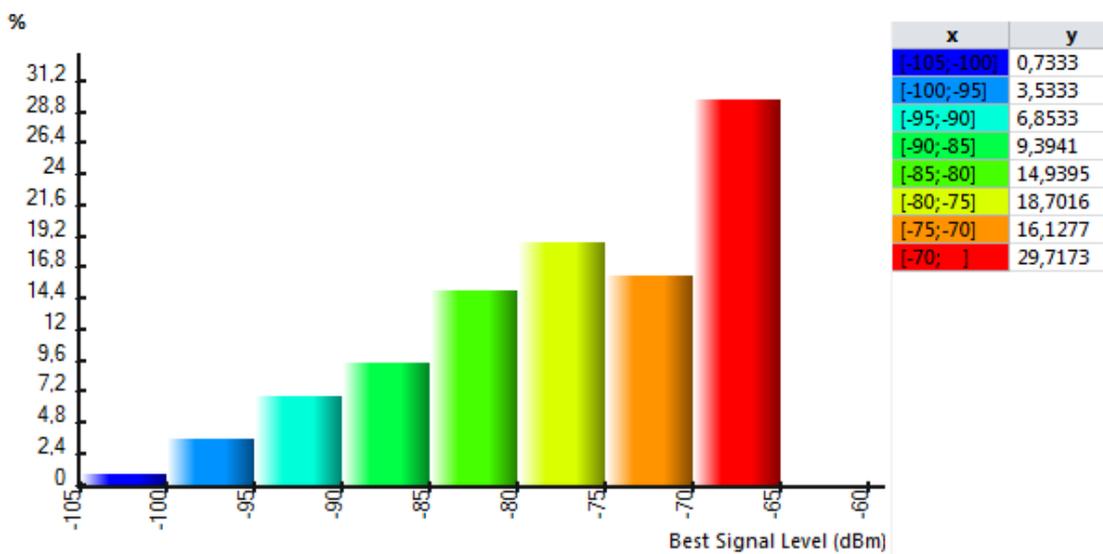


Figure IV.13 : Statistiques des mesures de niveaux du signal.

Nous remarquons que notre réseau TETRA offre un pourcentage de couverture très important (autour de 29,72%) représentant les excellents niveaux de champ (supérieur à -70

dBm) et un faible pourcentage (inférieur à $11,11\% = 0,73+3,53+6,85$) représentant le faible niveau de champ (inférieur à -90 dBm).

IV.4.2 Prédiction de la zone de recouvrement

Le problème posé par l'interférence entre les cellules est dû à la présence de zones de recouvrement entre des secteurs utilisant le même canal TETRA ou entre les canaux de même cellule qui se recouvre (figure IV.14).

Dans cette simulation, les zones colorées en rouge montrent un chevauchement important dû à l'émission de 4 signaux issus de 4 cellules qui desservent la même zone.

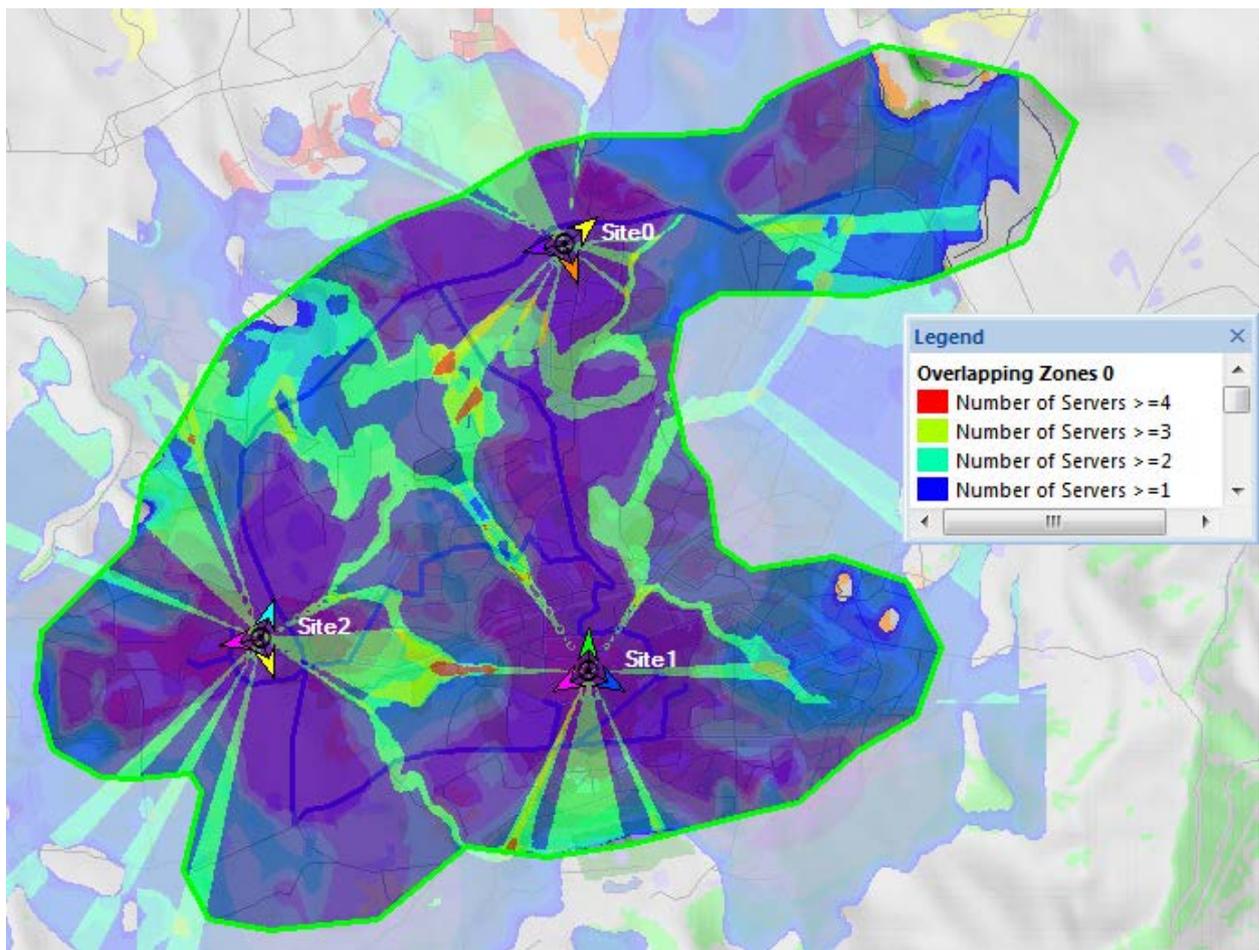


Figure IV.14 : Prédiction par les zones de recouvrement entre les cellules TETRA.

Selon les statistiques de la figure suivante, le résultat obtenu après le calcul qui est fait par ce type de prédiction montre une surface très importante de $28,333$ Km² (qui représente $78,40\%$ de la surface totale de la zone) sans aucune interférence entre cellules et des zones de recouvrement entre des secteurs de surface très faible utilisant le même canal TETRA.

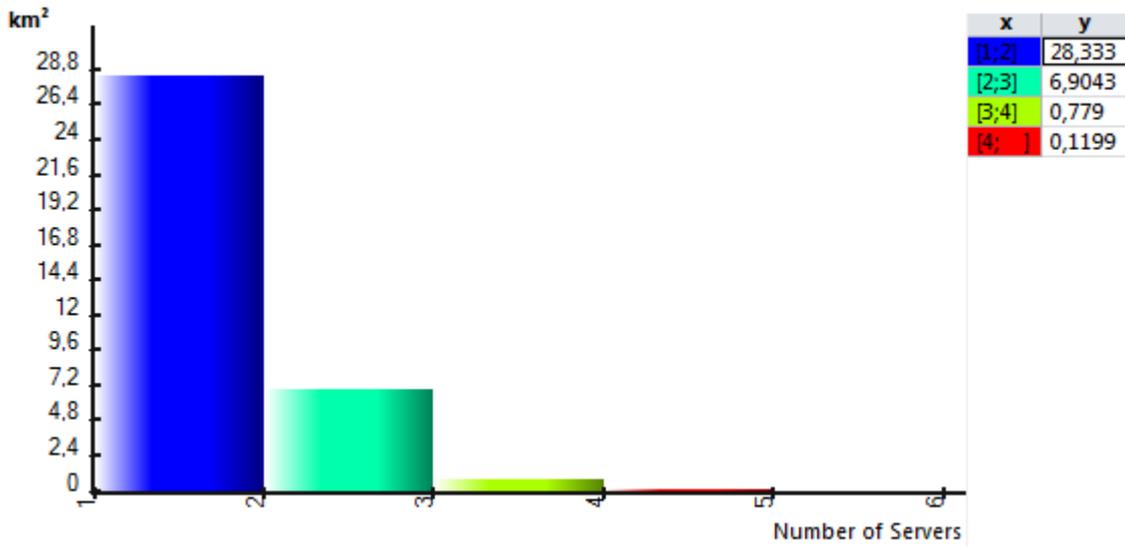


Figure IV.15 : Statistiques des zones de recouvrement entre les cellules TETRA.

IV.4.3 Prédiction par secteur (Emetteur)

Cette prédiction nous permet de déterminer les limites des différents secteurs de cellules du réseau pour chaque site. La figure suivante montre la prédiction de transmission de chaque site avec ces 3 secteurs ;

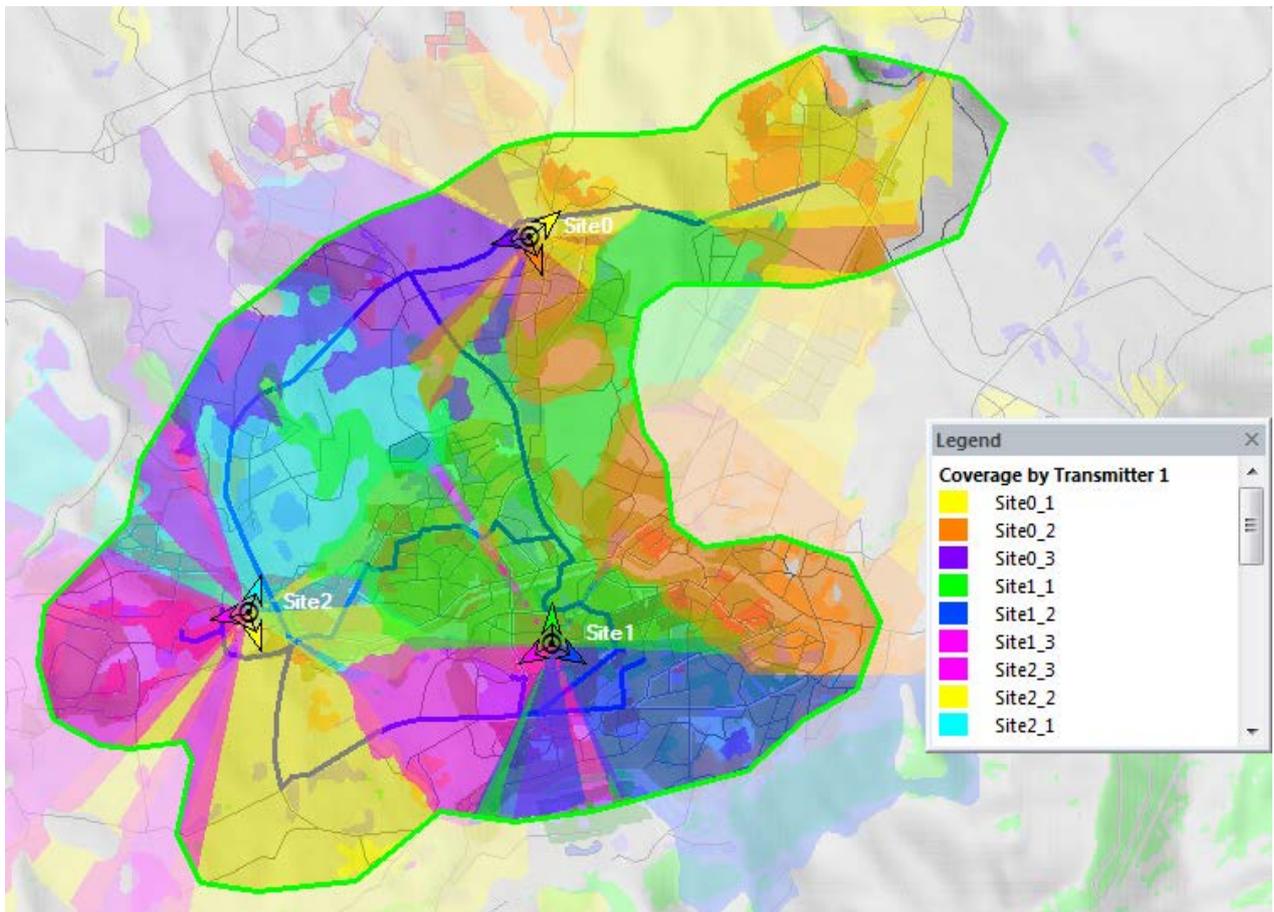


Figure IV.16 : Prédiction de la couverture par secteur (Emetteur).

IV.5 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons mis en évidence notre démarche de dimensionnement et de planification d'un réseau TETRA à travers un outil pratique sur un cas réel représente le réseau de lignes de Bus des étudiants de l'université Tlemcen. Cette étude pratique a été réalisée en première étape de dimensionnement, par notre application Matlab qui nous a assuré le calcul et la vérification de certains paramètres du dimensionnement de réseau que nous avons développé, puis en deuxième étape par le logiciel de planification et d'optimisation Atoll qui nous a assuré la planification et l'optimisation du notre réseau TETRA.

Le déploiement du réseau TETRA est effectué selon un processus bien précis, et d'une autre part l'outil Atoll nous a aidés de prendre une vision claire sur les résultats théoriques qui approchent la réalité, ce qui est très nécessaire pour avoir une idée sur le processus qui sera implémenté sur le terrain.

Conclusion Générale

Les réseaux à ressources partagée TETRA se positionnent comme une solution idéale pour permettre d'établir de façon rapide, fiable et sécurisée des réseaux radios privés selon les besoins de l'entreprise. Ils représentent aujourd'hui l'une des meilleures alternatives en la matière et aident à minimiser les coûts d'utilisation des fréquences, tout en favorisant les contrôles d'utilisation et la qualité de service.

Durant le présent projet de fin d'étude, il nous a été confié d'étudier et mettre en place le système de radiocommunication professionnelle PMR basé sur la norme TETRA. Pour cela notre travail a été décomposé en quatre étapes majeures :

La première partie était dédiée au concept de réseaux cellulaires et leurs évolutions ainsi les réseaux de radiocommunication professionnelle privé PMR. Le second chapitre consistait à étudier d'une façon très précise la norme TETRA, Nous y a présenté l'architecture de la norme, les techniques employées dans la couche physique, les services offerts par TETRA et les stratégies *Trunking* utilisées pour la transmission de la voix et de donnée.

La troisième partie a été consacrée à la propagation en contexte radio mobile, ou nous avons cités les différents phénomènes qui peuvent influencer sur la qualité du signal, comme on a présenté les différents modèles de prédiction à savoir le modèle empirique d'Okumura-Hata et le modèle standard de propagation SPM. A la fin de cette partie on a cité les étapes nécessaires de dimensionnement radio d'un système à ressource partagée et nous avons présentés l'outil développé en décrivant les interfaces graphiques avec des valeurs réelles pour les interprétés par la suite dans la partie suivante.

Au niveau du dernier chapitre, nous avons présenté les différentes étapes du processus de la planification radio et mis en œuvre d'un réseau d'exploitation TETRA pour la gestion des lignes de Bus au niveau de l'université de Tlemcen. Cette partie pratique nous a permis de mettre en évidence les règles d'ingénieries citées au niveau des chapitres précédents.

Notre projet de fin d'études intitulé « Mise en œuvre un réseau d'exploitation TETRA pour les lignes de Bus Universitaires » nous a permis d'approfondir nos connaissances sur la planification et le dimensionnement des réseaux.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]. « 2G, 3G quelle différence - Homo Mobilus ? », homo-mobilus.fr/sites/homo-mobilus.fr/files/pdf/fiche/fiche_diff%C3%A9rence_2g_3g.pdf, Date de consultation : Février 2018.
- [2]. GIRODON Stéphane, « Réseaux GSM, GPRS, UMTS : Architecture évolutive pour une stratégie services », rapport de stage –DESS, MTI - IAE Aix en Provence, 2002.
- [3]. ELAABIDI Lassaad, « GSM : Global System for Mobile Communications », Cynapsys Software Engineering, Mars 2010, <https://www.slideshare.net/Cynapsys/formation-gsm>, Date de consultation : Février 2018
- [4]. HRIZI Hanen, SAIDANE Salma, « Dimensionnement des Réseaux Radio 3G et 4G », Projet de fin d'Études pour l'obtention de diplôme Licence Appliquée en Sciences et technologies de l'Information et de la Communication, Option RST, Tunisie Telecom, 2013.
- [5]. ELAABIDI Lassaad, « GSM : Global System for Mobile Communications », Cynapsys Software Engineering, Mars 2010, <https://www.slideshare.net/Cynapsys/formation-gsm>, Date de consultation : Février 2018
- [6]. FAHAM Mohammed, « Réseaux GSM/GPRS » ; Cours pour master en télécommunication R&T, Université de Tlemcen, 2016.
- [7]. YANNICK Bouguen, ERIC Hardouin, François-Xavier Wolff, « LTE et les réseaux 4G », édition groupe Eyrolles, ISBN : 978-2-212-12990-8, 2012.
- [8]. AYMARD Ngo-Dibakala, « Développement d'un service applicatif télécom dans l'environnement réseau TETRA », Centre d'enseignement CNAM de la défense, 31 janvier 2012.
- [9]. 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.
- [10]. OURHOU Younes, EL MORABITI Mohamed, « Intégration de la station de base TB3, optimisation radio du réseau EADS TETRA et déploiement d'un outil de supervision du réseau de transmission de MORATEL », Mémoire de projet fin d'étude pour l'obtention du diplôme ingénieur d'état un système électronique et télécommunication, 28 juin 2011

- [11]. MAHINTH Christensen, « *TETRA mobile communication* », Slides of Executive - Marketing at Ripples Learning innovative, Published on Jun 14, 2009.
- [12]. GERMAIN Michèle, « *Les réseaux PMR* », Livre blanc de la collection "Professeur ATENA" Cassidian ETSI, Kathrein MESA, 2014.
- [13]. RHANIZAR Oussama, « *Planification Radio du Réseau TETRA* », Mémoire de fin d'études pour l'obtention d'un diplôme d'ingénieur d'Etat en Télécommunications, Ecole Nationale des Sciences Appliquées, ENSA, Tétouan-Maroc, 2011.
- [14]. Rohde & Schwarz, « *Systèmes de radiocommunication mobile numérique TETRA* », Actualités de RADIOMOBILES, No 178 (2003 / II).
- [15]. Office fédéral de la communication OFCOM, « *Notice d'information Tétra : Radiocommunication terrestre à ressources partagées* », rapport de OFCOM, 7 juillet 2015, https://www.bakom.admin.ch/dam/bakom/fr/dokumente/faktenblatt_tetra.pdf.download.pdf/notice_d_information.pdf, Date de consultation Mars 2018.
- [16]. « *Réseaux mobiles professionnels : Etat des lieux et besoins futurs en fréquences* », publié en Octobre 2012, https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/consult-PMR-oct2012.pdf, Date de consultation Avril 2018.
- [17]. P. Minot, « *TETRA Theoretical training : version 8.0a* », Tetraform, ETELM Theoretical TETRA training, <https://fr.scribd.com/document/258343389/Tetraform-8-Anglais>, Date de consultation Mars 2018.
- [18]. MEHDAOUI Khadija, « *QoS et extension du réseau TETRA de la ville Casablanca* », Mémoire de Projet de fin d'étude Pour l'obtention du diplôme Ingénieur d'Etat en systèmes électroniques & télécommunications, FST Fès, Juin 2014.
- [19]. BAASSOU Choukri, « *Dimensionnement et Caractérisation des réseaux mobiles.* » thèse pour l'obtention d'un diplôme de Magister, Université de Batna, 2012.
- [20]. FELLAHI Ghislaine, « *Planification et optimisation d'un réseau de la 4G (LTE) pour la Wilaya de Tlemcen* », Mémoire Pour l'obtention du diplôme de Master en Télécommunications, Option : (RST), Juin 2015

- [21]. BETAOUAF Djezila, BOUMECHERA Wissem. « *Développement d'un Outil de Dimensionnement et de Planification d'un Réseau 4G-LTE* », Mémoire Pour l'obtention du diplôme de Master en Télécommunications, Option : (RMST), Mai 2015

Résumé :

Le système TETRA est un réseau radiocommunication numérique mobile destiné à des utilisateurs définis. Cette norme européenne a permis d'encadrer l'allocation des ressources radios pour les services publics, notamment l'armée et les services de secours, ou les autorités de transport. La technologie TETRA offre un réseau de communications privé qui apporte la flexibilité, l'évolutivité et la sécurité nécessaires pour répondre aux besoins présents et futurs des entreprises de transport public.

L'objectif principal de ce projet de fin d'étude est de déployer un réseau de radiocommunication numérique partagé, utilisant une infrastructure TETRA assurant une meilleure couverture radio des lignes de Bus de l'université et une flexibilité des services de phonie et de données. Le déploiement de réseau TETRA s'est effectué sur une échelle d'une ville. Nous proposons à développer un outil de simulation basé sur des modèles mathématiques puis en exploitant l'outil de planification et l'optimisation "Atoll" pour mener à bien cette phase qui consiste à planifier et dimensionner le réseau TETRA en termes du nombre de stations de bases à implémenter et de débit offert.

Mots clés : Système TETRA, PMR, réseaux de transport, dimensionnement, Optimisation, Station de base, capacité.

Abstract:

The TETRA system is a digital mobile radio network for designed for defined users. This European standard norm has made it possible to regulate of the radio resources allocation for public services, in particular the army and emergency services, or transport authorities. TETRA technology offers a private communications network that provides the flexibility, scalability and security necessary to meet the present and future needs of public transport companies.

The main objective of this final project of the study is to deploy a shared digital radio network using a TETRA infrastructure, ensuring better radio coverage of University Bus lines and flexibility of voice and data services. The deployment of the TETRA network was carried out on a scale of city. We propose to develop a simulation tool based on mathematical models then using the planning and optimization tool "Atoll" to carry out this phase which consists in planning and dimensioning the TETRA network in terms of the implemented number of base stations and the offered throughput.

Keywords: TETRA system, PMR, networks of transport, dimensioning, optimization, base station, capacity

