

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 : Technologies des Systèmes de Télécommunication (TST)

Par :

DEFFA Abdelghani
DAR KEBIRA Fatima zohra

Sujet

Planification et conception d'un réseau PMR basé sur la norme TETRA

Soutenu publiquement, le 13 / 06 / 2017, devant le jury composé de :

Mr. MERZOUGUI. R
Mr. HADJILA. M
Mr. ZERROUKI. H

M.C à l'Université de Tlemcen
M.C à l'Université de Tlemcen
M.C à l'Université de Tlemcen

Président
Examineur
Encadreur

Dédicace

Grace à dieu qui ma tracé le chemin et m'a donné le pouvoir et le courage de continuer jusqu'à la fin j'ai pu réaliser ce travail que je dédie :

A l'âme de ma mère Hadja et ma tante Saliha que dieu les accueille dans son vaste paradis ;

A la lumière de mes yeux l'ombre de mes pas et le bonheur de ma vie, mon père Ahmed qui m'a apporté son appui durant toutes mes années d'études, pour son sacrifice.

A ma chère tante Fatema et son marie Lakhdar ;

A mes sœurs Aicha et son marie « Ahmed », Nihel, Sihem et Ikram et Kheira;

A mon frère Mohammed et Zahreddin et Yassin et Abd el ilah et Faysal;

A toute ma grande famille Dar kebira, Melih ;

A toute mes cousines Wafaa et Nor el hoda , Warda, hadjar, fatima,;

A toute mes cousins Adam, Adel, Issam, Mohammed;

A mes chères amies Ikram, Khir, Fatima, Rabiaa, Amina, Wassila, Horia, Zineb, Nadia, Nadjet, Amara;

A mes chers amis Fouad et nsibi Ismail ;

A tous ceux qui me sont chers « Sihem Kadaoui » et « Fatima Meftahi » ;

A mes collègues des études ;

A tous mes amis de promotion TST 2016/2017

F. Z Dar kebira

30/05/2017

Dédicaces

À L'AIDE DU DIEU J'ARRIVE À RÉALISER CE MODESTE

TRAVAIL QUI J'AI DÉDIÉ À :

- **MA CHÈRE MÈRE** tu es pour moi la source de tendresse, l'affection et l'amour.
- **MON PÈRE** pour son encouragement continue tout au long de mes études.

VOUS ÊTES TOUJOURS MA FIERTÉ ET MON BIEN ÊTRE PAR VOTRE AMOUR ET TOUTS LES SACRIFICES QUE VOUS AVEZ CONSENTIS À MON ÉGARD AFIN QUE J PUISSE BIEN MENER MES ÉTUDES, VOUS M'AVEZ M'IMPLIQUER DU DEVOIR, DE LA RESPONSABILITÉ ET DE L'HUMILITÉ.

- Mes chères frères et sœurs : Zohra, Fatima, Aicha, Fatiha, Wahiba, MADJID, les jumeaux "Zeineb et Rahma", Khadîdja et Azzoz.

AUCUNE DÉDICACE NE SAURAIT ÊTRE ASSEZ ÉLOQUENTE POUR EXPRIMER MES HONNÊTES SENTIMENTS DE FRATERNITÉ ET DU RESPECT QUI JE PORTE POUR VOUS.

- Mes petits neveux : *Assile, Ihssan, Iokman, Islam, Ahmed, Ritage, F. Ritage, Achraf et Mouaiz.* A tout ma famille sans exception.
- A tout mes collègues de la promotion TST, et (OPTIQUE et MECANIQUE-UNIV-Setif) Sont oublier ma ancien encadreur Ferria Kouider pour leur motivation.
- *A tous ceux qui nous sont chers Fakhri, Omar, Islam, Mourad, Said, Halim, K. Mouhamed et D. Fetah.*

A VOUS TOUS JE DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL ET JE VOUS SOUHAITE UNE BON CONTINUITÉ.

D. Ghanino,
05/06/2017

Remerciement

*Merci **ALLAH** de nous avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et la volonté et la patience de mener à terme le présent travail.*

*Nous remercions notre encadreur, Monsieur **ZERROUKI Hadj**, Maitre de conférences à l'université de Tlemcen, de son aide et son soutien durant la réalisation de notre travail. Il nous a orientées vers le succès avec ses connaissances en partageant nos idées et sans oublier ses encouragements tout au long de notre épreuve, et sa disponibilité à tout moment.*

*Nous tenons à remercier Monsieur **MERZOUGUI Rachid**, Maitre de conférences à l'université de Tlemcen, qui a bien voulu nous faire l'honneur de présider le jury de notre soutenance.*

*Nous adressons également nos respectueux remerciements à Monsieur **HADJILA Mourad**, Maitre de conférences à l'université de Tlemcen, pour son aide et son soutien durant la réalisation de ce travail en acceptant d'être examinateur. Nos remerciements s'adressent aussi à Monsieur **ARCHAROUI Abdelmadjid**, Ancien ingénieur à Mobilis ATM et sans oublier Monsieur **ZATLA Sofiane** ingénieur à SONALGAZ, pour les temps qui nous a accordé et les précieuses informations requises de sa part. Notre profonde gratitude s'adresse à Monsieur **KAMECHE Samir**, Maitre de conférences à l'université de Tlemcen le chef filière **TST**, et tout les enseignant de département de Télécommunication - université de Tlemcen.*

Notre Vif remerciement s'adresse également à nos amis, pour leur présence chaleureuse et leur encouragement.

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce travail.

A jamais merci pour nous pousser à toujours dépasser nos limites.

Résumé :

La norme Radio TETRA (TERrestrial Trunked RADio), est une norme Européenne de l'ETSI. Les réseaux privés radio TETRA se différencient des systèmes publics de téléphonie mobile, tels que le GSM ou l'UMTS, par la rapidité d'établissement des communications, les appels prioritaires et de groupe. Les entreprises intervenant sur des sites étendus ou mobiles se retrouvent fréquemment confrontés à des problèmes de communications internes. Pour pallier à cela, et plutôt que d'utiliser des liaisons GSM coûteuses, on met en place des réseaux radios privés. Les réseaux TETRA se positionnent comme une solution idéale à cette problématique.

Le présent projet de fin d'étude s'inscrit dans le cadre de l'étude, la planification et la conception d'un réseau radiomobile professionnel (PMR) basé sur la technologie TETRA. Le travail consiste à détaillé une étude théorique approfondie sur la norme TETRA, l'exploitation de l'outil de simulation et l'optimisation "Atoll" pour mener à bien cette phase qui a consisté à planifier et dimensionner le réseau TETRA en termes du nombre de stations de bases à implémentées, les puissances mises en jeu et les antennes utilisées ... etc.

Mots clés : Norme TETRA, système PMR, Atoll, Calibration, dimensionnement, modèle de propagation, planification, capacité.

Abstract :

The TETRA (TERrestrial Trunked RADio) Radio standard is a European ETSI standard. TETRA private radio networks differ from public mobile telephony systems, such as GSM or UMTS, by speed of call setup, priority calls and group calls. Businesses on large or mobile sites often find themselves confronted with internal communications problems. To counter this, and instead of using costly GSM links, private radio networks are set up. The TETRA networks are positioned as an ideal solution to this problem.

This final project is part of the study, planning and design of a professional mobile radio (PMR) network based on TETRA technology. The work consists of a detailed theoretical study on the TETRA standard, the use of the simulation and optimization tool "Atoll" to carry out this phase which consisted in planning and dimensioning the TETRA network in terms of the number of base stations to be implemented, the powers involved and the antennas used ... etc.

Key words: TETRA standard, PMR system, Atoll, Calibration, dimensioning, propagation model, planning, capacity.

Figure I.1 : Architecture du réseau GSM.....	6
Figure I.2 : Architecture du réseau GPRS.....	9
Figure I.3 : Architecture UMTS : utilisation des deux domaines	10
Figure I.4 : Principe de l'étalement de spectre	12
Figure I.5 : Utilisation de la bande de fréquences pour l'UMTS	13
Figure I.6 : Mode TDD et FDD dans l'UMTS	13
Figure I.7 : Structure de trame de l'UMTS.....	14
Figure I.8 : Réseaux sans site fixe.....	17
Figure I.9 : Réseaux monosite.....	17
Figure I.11 : Réseaux à couverture multisite.....	18
Figure II.1 : Architecture TETRA.....	27
Figure II.2 : Console administration TETRA	28
Figure II.3 : L'architecture interne d'un poste dispatching.....	29
Figure II.4 : Switch TETRA	30
Figure II.5 : La micro TBS répéteur mobile	31
Figure II.6 : Mobile TETRA	32
Figure II.7 : Mode direct sans répéteur	32
Figure II.8 : Mode direct avec répéteur (micro TBS)	33
Figure II.9 : Structure canal au niveau TETRA.....	33
Figure II.10 : Constellation modulation $\pi/4$ -DQPSK	34
Figure II.11 : Structure de l'hyper trame TETRA	35
Figure II.12 : Structure de demi-slot TETRA	35
Figure II.13 : Différent types de time slot.....	36
Figure II.14 : Exemple d'établissement d'appel individuel dans TETRA.....	39
Figure III.1 : Processus de dimensionnement.....	45
Figure III.2 : Le processus de dimensionnement par couverture.....	46
Figure III.3 : Processus de dimensionnement de couverture pour le Downlink et l'Uplink	47
Figure III.4 : Diffraction et zone de Fresnel.....	48
Figure III.5 : Effet des trajets multiples	49
Figure III.6 : Connexions du système d'alimentation de l'antenne	54
Figure III.7 : Modèle bilan de liaison Uplink.....	55
Figure III.8 : Bilan de liaison Downlink.....	56
Figure III.9 : Modèle hexagonales de cellule	57
Figure III.10 : Page d'accueil de l'application	60
Figure III.11 : Paramètres de modèle de propagation et de bilan de liaison « UpLink »	60

Figure III.12 : Paramètres de modèle de propagation et de bilan de liaison « DownLink »	61
Figure III.13 : Résultat de dimensionnement en UpLink et en DownLink	62
Figure IV.1 : La page principale d'Atoll.....	66
Figure IV.2 : Création d'un nouveau projet	66
Figure IV.3 : Choix du système de coordonnées.....	67
Figure IV.4 : Liste des systèmes de coordonnées	67
Figure IV.5 : Importation de la carte numérique.....	67
Figure IV.6 : Map finale de la ville d'Oran.....	69
Figure IV.7 : Légende de la surface selon leurs caractéristiques	69
Figure VI.8 : Focus de la zone à planifier.....	70
Figure IV.9 : Emplacement des sites TETRA sur la Map.....	71
Figure IV.10 : Test de la liaison site 1 – site 2.....	72
Figure IV.11 : Test de la liaison site 2 – site 3.....	72
Figure IV.12 : Test de la liaison site 1 – site 3.....	73
Figure IV.13 : Choix de type de prédiction	74
Figure IV.14 : Prédiction de la couverture par niveau du signal en DL	74
Figure IV.15 : Statistiques des mesures de niveaux du signal DL.....	75
Figure IV.16 : Prédiction de la couverture par niveau du signal UP	75
Figure IV.17 : Prédiction par les zones de recouvrement entre les cellules TETRA.....	76
Figure IV.18 : Statistiques des zones de recouvrement entre les cellules TETRA	76

Tableau I.1: Les bandes de fréquences PMR analogique et numérique 20

Tableau II.1: Les différents types de canaux logiques 38

Tableau III.1: Paramètres du modèle SPM 51

Tableau III.2: Pertes de la pénétration..... 52

Introduction Générale

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). 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. En outre, la technique numérique permet d'améliorer sensiblement la qualité et la sécurité des systèmes de radiocommunication.

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

Le présent rapport, préparé dans le cadre du projet de fin d'études pour objectif de la planification radio du réseau TETRA pour la couverture d'une partie de ville d'Oran et plus précisément, le Tramway d'Oran.

Ce mémoire sera divisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre donnera un aperçu général des différentes normes de téléphonie mobile tel que la 1 ère génération (1G) comme l'était, au départ, la téléphonie fixe, le GSM (2G) qui donnaient accès au service voix en mobilité, le GPRS (2,5 G), l'UMTS (3G) qui permet aux utilisateurs d'avoir accès à un vrai internet mobile avec l'intégration de nouveaux services, une vue sur réseau le LTE, et enfin une introduction a la technologies de radiocommunication mobile professionnelle (PMR).

Le second 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.

Chapitre I

Les systèmes de radiocommunication et PMR

I.1 Introduction

Le système radiocommunication professionnelle est la forme la plus ancienne de communication mobile. Généralement simple en terme d'équipement et de gestion, il offre de nombreux avantages par rapport aux autres réseaux cellulaires. Ce dernier n'a pas connu d'évolution technique jusqu'aux années 1970 où 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 communication et on va mettre en évidence les réseaux PMR, qui sera aussi traité dans ce chapitre.

I.2 L'évolution des systèmes Radiocommunication

I.2.1 La première génération des téléphones mobiles (1G)

La première génération des téléphones mobiles est apparue dans le début des années 80 en offrant un service médiocre et très coûteux de communication mobile. La 1G avait beaucoup de défauts, comme les normes incompatibles d'une région à une autre, une transmission analogique non sécurisée (écouter les appels) pas de *roaming* vers l'international (*roaming* est la possibilité de conserver son numéro sur un réseau d'un autre opérateur ou un autre pays).

La première génération utilisée uniquement pour la transmission de la voix basé sur la technique FDMA, c'est le système AMPS.

I.2.2 La deuxième génération des téléphones mobiles (2G)

Le GSM est apparu dans les années 90. Il s'agit de la norme 2G. Son principe, est de passer des appels téléphoniques, s'appuyant sur les transmissions numériques permettant une sécurisation des données (avec cryptage), il a connu un succès et a permis de susciter le besoin de téléphoner en tout lieu avec la possibilité d'émettre des messages (SMS, limités à 160 caractères). Ainsi qu'il autorise le *roaming* entre pays exploitant le réseau GSM.

Devant le succès, il a fallu proposer de nouvelles fréquences aux opérateurs pour acheminer toutes les communications, et de nouveaux services sont aussi apparus. Le débit de 9.6 kbps proposé par le GSM est insuffisant, dans ce concept, ils ont pensé à développer de nouvelles techniques de modulations et de codages qui ont permis d'accroître le débit pour la nouvelle génération [1].

I.2.2.1 Présentation de la norme GSM

Le GSM est la première norme de téléphonie cellulaire de seconde génération qui soit pleinement numérique, c'est la référence mondiale pour les systèmes radio mobiles. Avec plus de 7,4 milliards d'abonnements mobiles étaient souscrits à fin 2016, selon les estimations de l'International Telecommunication Union (ITU), Le réseau GSM offre à ses abonnés des services qui permettent la communication de stations mobiles de bout en bout à travers le réseau. La téléphonie est le plus importante des services offerts. Ce réseau permet la communication entre deux postes mobiles où entre un poste mobile et un poste fixe. Les autres services proposés sont la transmission de données à faibles débits et la transmission de messages alphanumériques courts [1]. L'architecture globale du réseau GSM est schématisée par la figure I.1.

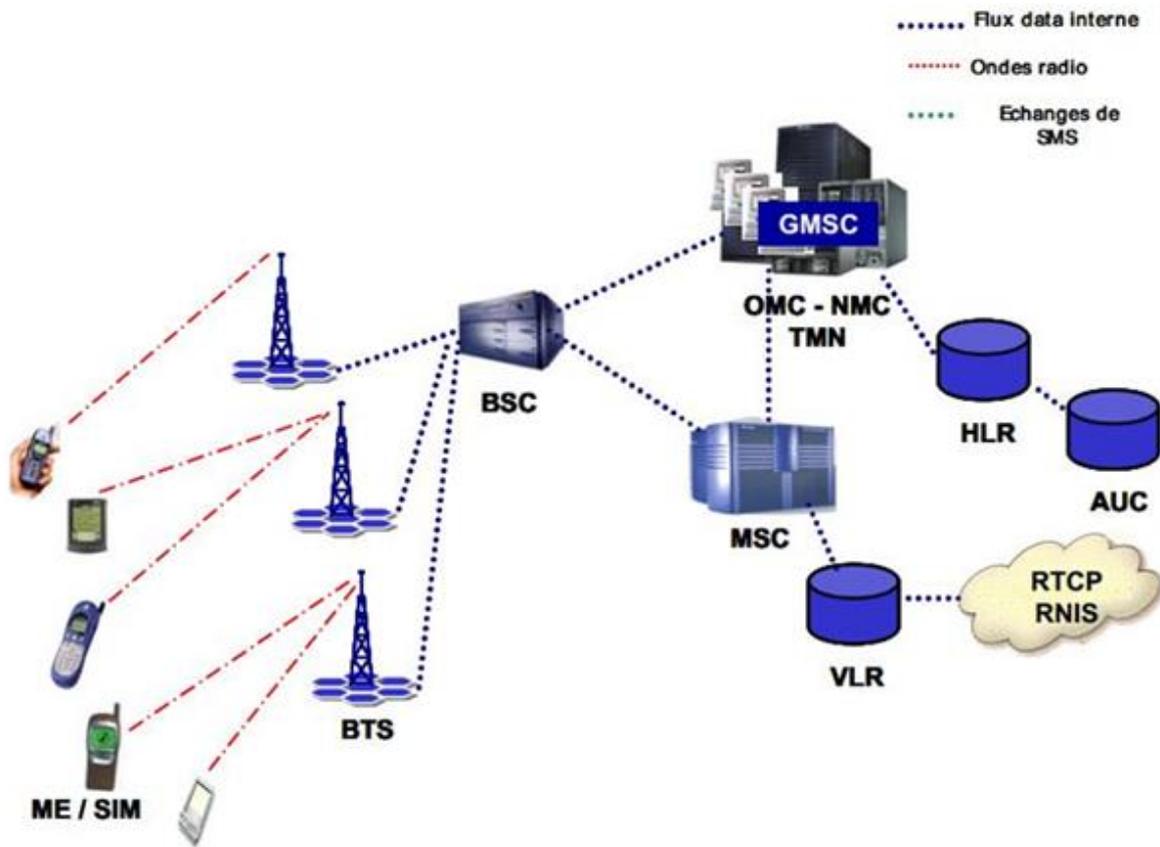


Figure I.1 : Architecture du réseau GSM [2].

I.2.2.1.1 Le sous-système radio BSS

BSS pour base station sub-system, c'est un sous-système de l'architecture GSM qui assure les transmissions radioélectriques et gère la ressource radio. Le BSS comprend les BTS qui sont des émetteurs-récepteurs ayant un minimum d'intelligence et les BSC qui contrôlent un ensemble de BTS.

a. Station de base (BTS)

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.

b. Contrôleur de station de base (BSC)

Chaque BSC contrôle un certain nombre de BTS, Il constitue un nœud de communications vers et en provenance de ces BTS. La connexion entre les BTS et le BSC est une liaison à haut débit (2 Mbit/s) qui peut être réalisée par un câble (ligne louée) ou par un faisceau hertzien consistant en une transmission par ondes radio à une fréquence très élevée (supérieure à 15 GHz dans le cas des opérateurs de téléphonie mobile). Parmi ces rôle est de contrôler les mesures effectuées par la BTS pour mesuré les puissances d'émission du mobile et/ou de la BTS, Prend la décision de l'exécution d'un *Handover*).

I.2.2.1.2 Le sous-système d'acheminement NSS

Son rôle est d'assurer les fonctions de commutations et de routage. C'est donc lui qui permet l'accès au réseau public RTCP ou RNIS. En plus des fonctions indispensables de commutation, on y retrouve les fonctions de gestion de la mobilité, de la sécurité et de la confidentialité qui sont implantées dans la norme GSM. Il se compose de plusieurs équipements, en citant quelques-uns :

a. Commutateur (MSC)

Le MSC (*Mobile- service Switching Centre*) est parfois appelé centre de commutation des mobiles, généralement, il est associé au base de donnée VLR, Ces entités sont responsables de l'acheminement des communications dans le réseau et assurent également l'interconnexion entre le réseau de téléphone cellulaire et le réseau fixe traditionnel, la transmission des messages courts, Il dialogue avec le VLR pour gérer la mobilité des usagers (transfert des informations de localisation,...).

b. Fonctions du HLR

Le HLR est la base de données centrale contenant toutes les informations administratives relatives aux abonnés d'un réseau donné utilisant deux clés d'entrée :

- IMSI (*International Mobile Subscriber Identity*)
- MSISDN (*Mobile Subscriber Integrated Services Digital Network*)

c. Fonctions du VLR

L'enregistreur de localisation des visiteurs est une base de données associée à 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 à 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.

d. Fonctions de l'AUC

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).

I.2.2.1.3 Le sous-système d'exploitation et de maintenance OSS

OSS (*Operation Sub-System*) permet à l'opérateur d'exploiter son 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 un interfaçage avec le réseau fixe RTC existant.

a. Présentation de l'OMC et du NMC

Deux niveaux de hiérarchie sont définis dans la norme GSM. Les OMC (*Operations and Maintenance Center*) et les NMC (*Network and Management Centre*). Cette organisation a été définie afin de permettre aux opérateurs télécoms de gérer la multiplicité des équipements (émetteurs, récepteurs, bases de données, commutateurs ...) et des fournisseurs. Le NMC permet l'administration générale de l'ensemble du réseau par un contrôle centralisé. Ainsi que les OMC permettent une supervision locale des équipements (BSC/MSC / VLR) et transmettent au NMC les incidents majeurs survenus sur le réseau. Les différents OMC assurent une fonction de médiation.

I.2.3 De GSM (2G) vers le réseau GPRS (2.5G)

Le réseau GPRS vient ajouter un certain nombre de modules sur le réseau GSM sans changer le réseau existant (Figure I.2). Ainsi son but est de conserver l'ensemble des modules de l'architecture GSM, nous verrons par ailleurs que certains modules GSM seront utilisés pour le fonctionnement du réseau GPRS. La mise en place d'un réseau GPRS va permettre à un opérateur de proposer de nouveaux services de type "Data" à ses clients. Le GPRS est en mode paquets [3].

Le réseau GPRS utilise le système (*packet switching*) au les data est décomposée a des paquets pour transférer parmi les avantage de ce système :

- Rapidité de transfère des donnée
- la possibilité de transfère de donnée même que la source et le destinataire né pas connecté au même temps.
- La possibilité de communication même que la source et la destination utilisée des protocoles déferents.

❖ **Le nouveau service de GPRS**

- Accès vers WEP
- Envoyé le message et les défirent type des data.
- Recevoir et lecture des FAX et les emails

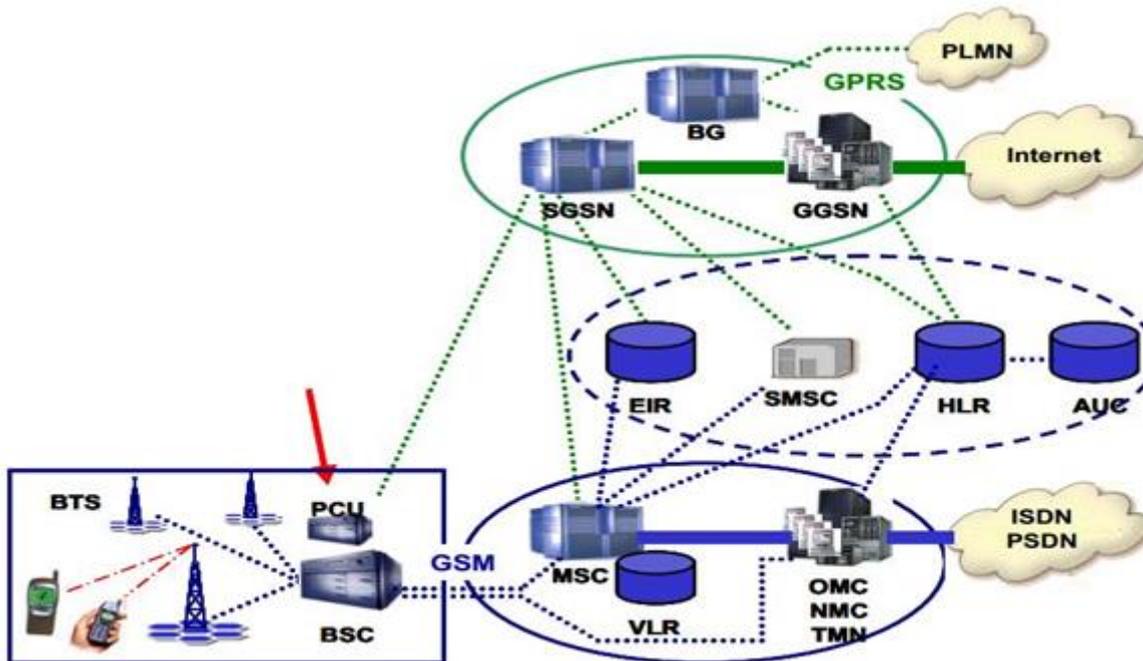


Figure I.2 : Architecture du réseau GPRS [3].

I.2.3.1 Le nœud de service (SGSN) et le Gateway (GGSN)

Le nœud de service (SGSN) Le nœud de service dénommé SGSN (*Serving GPRS Support Node*) est relié au BSS du réseau GSM. Le SGSN est en connections avec l'ensemble des éléments qui assurent et gèrent les transmissions radio : BTS, BSC, HLR. Parmi ses fonctions :

- Joues le rôle d'un par feu
- Le routage
- etc...

Les termes SGSN et GGSN désignent des entités fonctionnelles qui peuvent facilement être implantées dans un même matériel. L'ensemble des SGSN, des GGSN, des routeurs IP et des liaisons entre équipements est appelé réseau fédérateur GPRS. A noter enfin que chaque SGSN et chaque GGSN disposent au minimum d'une adresse IP fixe au sein du réseau. Les autres rôles de GGSN:

❖ *Le module PCU*

La norme GPRS introduit également un équipement appelé PCU (*Packet Control Unit*) généralement situé sur les BTS (figure I.2), les BSC ou le SGSN. Le PCU a pour fonction de gérer la planification de transmission et l’acquittement des blocs sur les canaux de données.

I.2.4 De GPRS vers L'UMTS

Le réseau UMTS est complémentaire aux réseaux GSM et GPRS. Le réseau GSM couvre les fonctionnalités nécessaires aux services de type Voix en un mode circuit, le réseau GPRS apporte les premières fonctionnalités à la mise en place de services de type Data en mode paquets, et l’UMTS vient compléter ces deux réseaux par une offre de services Voix et Data complémentaires sur un mode paquet.

Après le GSM le réseau GPRS constituait finalement une étape vers le réseau UMTS. Sur le plan technique, les architectures des trois réseaux GSM, GPRS et UMTS sont complémentaires et interconnectées afin d’optimiser la qualité de service rendue à l’abonné. Nous verrons dans cette Partie de ce chapitre l’évolution en termes de services de la 2G – le GSM –vers la 3G – l’UMTS – en passant par la 2.5G – le GPRS. Nous analyserons également l’évolution des acteurs du marché et de la stratégie des opérateurs télécoms.

L’architecture d’un réseau UMTS (figure I.3) 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 cœur CN (*Cœur Network*) et la troisième à l’équipement terminal UE (*User Equipment*) [4].

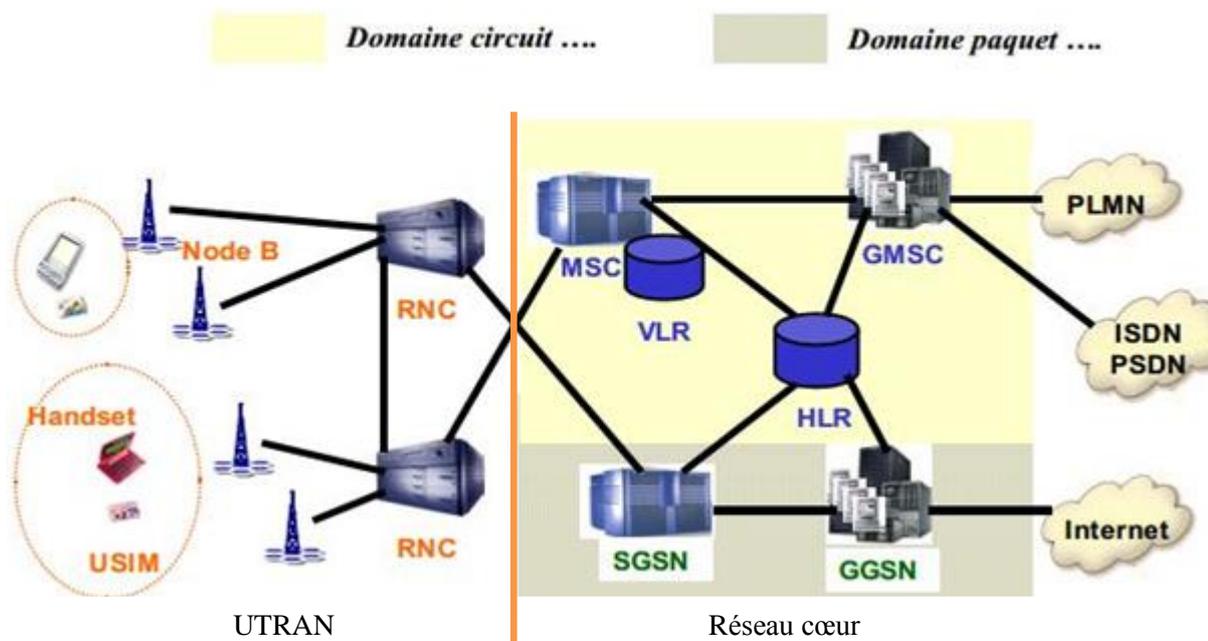


Figure I.3 : Architecture UMTS : utilisation des deux domaines [2].

I.2.4.1 *Le domaine circuit*

Le domaine circuit permettra de gérer les services temps réels dédiés aux conversations téléphoniques (vidéo-téléphonie, jeux, application multimédia). Ces applications nécessitent un temps de transfert rapide. Lors de l'introduction de l'UMTS le débit du mode domaine circuit sera de 384 Kbits/s. L'infrastructure s'appuiera alors sur les principaux éléments du réseau GSM : MSC/VLR (bases données existantes) et le GMSC afin d'avoir une connexion directe vers le réseau externe [4].

I.2.4.2 *Le domaine paquet*

Le domaine paquet permettra de gérer les services non on temps réels. Il s'agit principalement de la navigation sur l'internet, et de l'accès utilisation des e-mails. Ces applications sont moins sensibles au temps de transfert, c'est la raison pour laquelle les données transiteront en mode paquet. Le débit du domaine paquet sera sept fois plus rapide que le mode circuit, environ 2Mbits/s. L'infrastructure s'appuiera alors sur les principaux éléments du réseau GPRS : SGSN (bases de données existantes en mode paquet GPRS, équivalent des MSC/VLR en GSM) et le GGSN (équivalent du GMSC en GSM) qui jouera le rôle de commutateur vers le réseau internet et les autres réseaux publics ou privés de transmission de données [2].

I.2.4.3 *Les équipements d'un réseau UMTS*

La mise en place du réseau UMTS implique la mise en place de nouveaux éléments sur le réseau.

a. *Le Node B*

Le Node B est un ensemble de stations de base (BS) et de contrôleur de site qui sont chargés en outre de gérer la macro-diversité (1 mobile → plusieurs node B). Chaque station de base gère une cellule. Elle existé plusieurs mode de duplexage : FDD (*Frequency Division Duplex*) ou TDD (*Time Divition Duplex*) qui remplace FDMA et le TDMA dans le GSM. Les Node B gèrent la couche physique de l'interface radio et le codage du canal. Elle communique directement avec le mobile sous l'interface dénommée Uu.

b. *Le RNC*

Le RNC est un contrôleur de Node B et est encore ici l'équivalent du BSC dans le réseau GSM. Le RNC contrôle et gère les ressources radio en utilisant le protocole RRC (*Radio Ressource Control*) pour définir procédures et communication entre mobiles (par l'intermédiaire des Nodes B) et le réseau.

Le RNC s'interface avec le réseau pour les transmissions en mode paquet et en mode circuit. Le RNC est directement relié à un Node B, il gère alors :

- Le contrôle de charge et de congestion (saturation) des différents Node B
- Le contrôle d'admission et d'allocation des codes pour les nouveaux liens radio (entrée d'un mobile dans la zone de cellules gérées ...).

I.2.4.4 Le principe de W-CDMA

L'interface radio de l'UMTS se base sur le W-CDMA (*Wideband-Code Division Multiple Access*). Cependant, le W-CDMA se base sur une technique plus ancienne qui est le CDMA (*Code Division Multiple Access*). Afin de comprendre les concepts du W-CDMA, il est important de comprendre la technique du CDMA.

Le CDMA (*Code Division Multiple Access*) est utilisé dans de nombreux systèmes de communication. Il permet d'avoir plusieurs utilisateurs sur une même onde porteuse. Les transmissions sont numérisées, dites à étalement de spectre (figure I.4). L'étalement du spectre rend le signal moins sensible aux fluctuations sélectives en fréquence. Le signal est ainsi transmis sur une bande de fréquences beaucoup plus large que la bande de fréquences nécessaire [5].

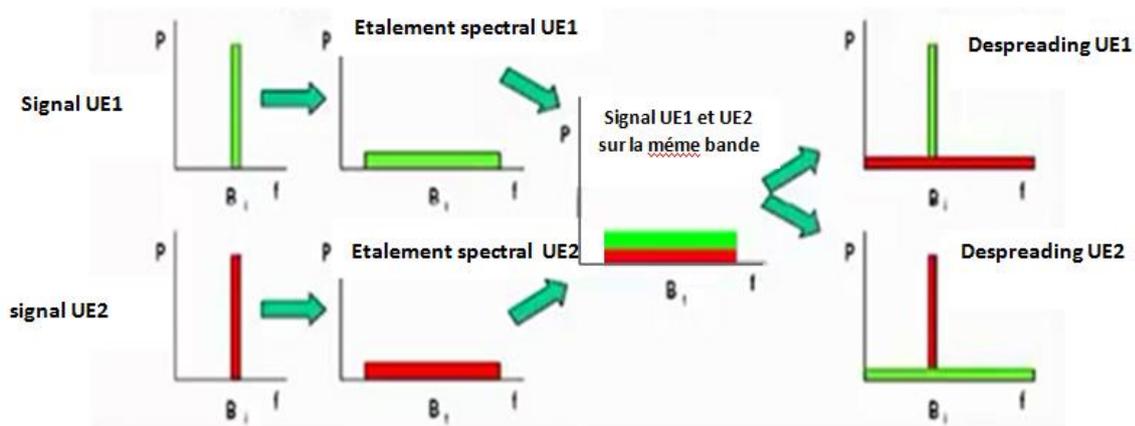


Figure I.4 : Principe de l'étalement de spectre

Les avantages de technique CDMA sont les suivants :

- ✓ Sécurité de la transmission : le signal codé est détectable comme étant du bruit.
- ✓ Concentration de trafic
- ✓ Efficacité spectrale
- ✓ Handover
- ✓ Gestion du plan de fréquences

I.2.4.5 L'organisation fréquentielle

Les bandes de fréquences allouées pour l'IMT 2000 (*International Mobile Telecommunications, 2000* : correspond à la bande et aussi l'année) sont 1885-2025 MHz et 2110-2200 MHz. L'UMTS propose la répartition suivante (figure I.5) :

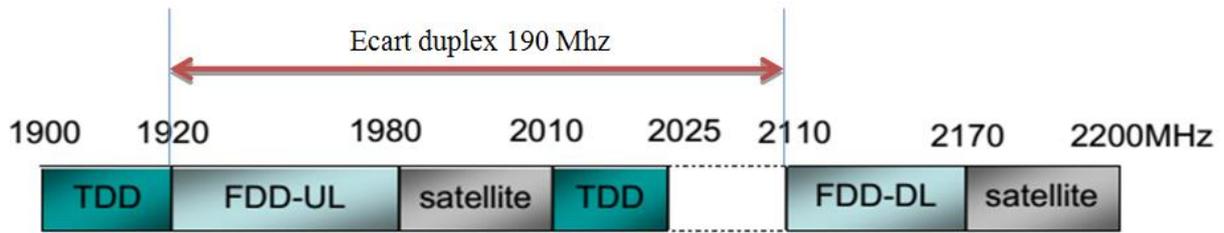


Figure I.5 : Utilisation de la bande de fréquences pour l'UMTS.

La division duplex dans les bandes est 2×60 MHz, est fréquentielle (FDD). L'écart duplex vaut 190 MHz. On utilise dans ces bandes un accès W-CDMA (*Wideband-CDMA*). La division duplex dans les bandes dites "non appairées", c'est à dire 35 MHz et 15 MHz, est temporelle (TDD). On utilise dans ces bandes un accès TD-CDMA (figure I.6).

❖ *La modulation*

Elle est de type :

QPSK : pour la liaison descendante (DL)

BPSK : pour la liaison montante (UL)

Qui est remplacé la modulation GMSK dans le réseau GSM

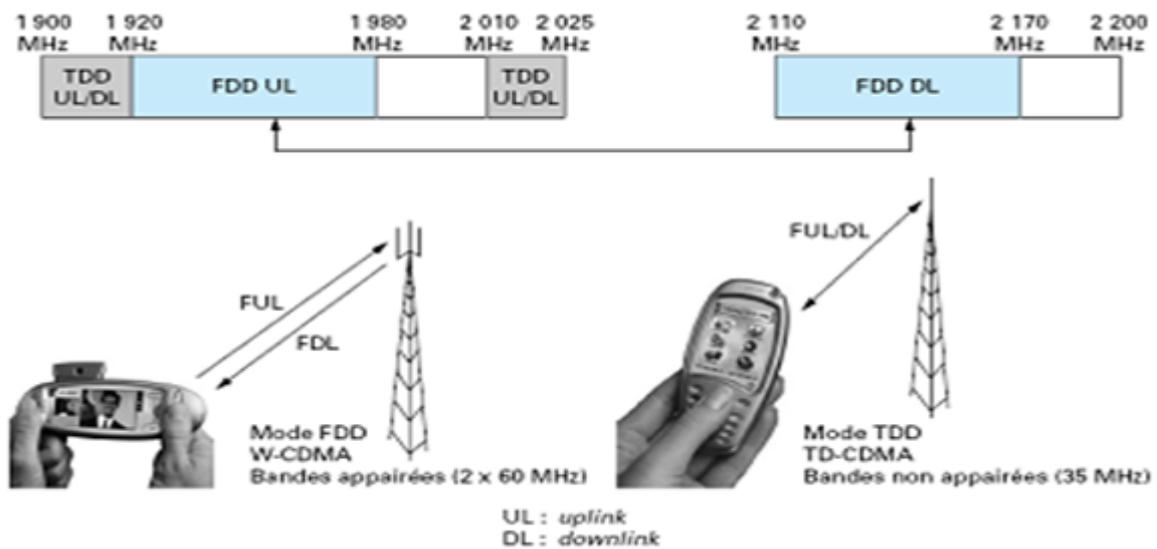


Figure I.6 : Mode TDD et FDD dans l'UMTS [2].

I.2.4.6 Organisation temporelle

L'organisation temporelle de l'UMTS est basée sur une Super trame de duré 720 ms, comportant elle-même 72 trames de 10 ms. Chaque trame de 10 ms est divisée en 15 slots chaque slots est de duré 667µs, comme elle est illustrée par la figure suivante.

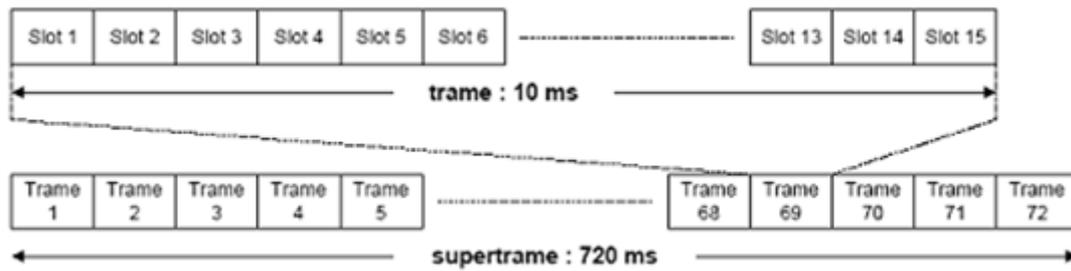


Figure I.7 : Structure de trame de l'UMTS [2].

❖ **Les nouvelles services ajoutés par UMTS**

- Augmentation de la qualité de la voix
- La possibilité de transmettre les données avec un débit important allant jusqu'à 2 Mbit/s
- Un temps d'établissement d'appel très court par rapport au réseau GSM
- Offrir de nouveaux services (la visiophonie, multimédia, les jeux...)
- Augmentation du niveau de sécurité

I.2.5 Passage de 3G (UMTS) vers HSDPA

La technologie HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) représente la première étape d'évolution de la méthode d'accès au réseau mobile de troisième génération UMTS (*Universal Mobile Telecommunications Service*). Cette technologie permet d'obtenir des débits théoriques supérieurs à 10 Mbps sur le lien descendant et de supporter des services à valeur ajoutée, tels que l'accès Internet à haute vitesse, le téléchargement de fichiers audio et vidéo, la visiophonie, la réception de programmes télévisés.

Le HSDPA offre la possibilité de télécharger à des débits de l'ordre de 14,4 Mbit/s. Il se base sur la technologie de transmission WCDMA (*Wideband-Code Division Multiple Access*) mais l'inconvénient de cette technologie est le débit montant Uplink qui reste inchangé à 384 Kbit [5].

I.2.6 Le réseau LTE

LTE (*Long Term Evolution*) est le nom d'un projet au sein du 3GPP qui vise à produire les spécifications techniques de la future norme de réseau mobile de quatrième génération (4G).

LTE propose des débits élevés pour le trafic temps-réel, avec une large portée. Théoriquement, le LTE peut atteindre un débit théorique de 50 Mb/s en lien montant et 100 Mb/s en lien descendant basé sur de nouvelles techniques comme l'OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) dans la liaison descendante et SC-FDMA (*Single Carrier - Frequency Division Multiple Access*) dans la liaison montante.

La norme LTE, définie par le 3GPP, a été considérée comme une norme de troisième génération «3.9G» (car proche de la 4G), spécifiée dans le cadre des technologies IMT-2000, car dans les «versions 8 et 9» de la norme, elle ne satisfaisait pas toutes les spécifications techniques imposées pour les normes 4G par l'Union internationale des télécommunications (UIT) [5].

I.2.7 Le réseau LTE-A

Comparé au LTE, le *LTE Advanced* (LTE-A) se différencie, pour l'essentiel, par une série d'améliorations indépendantes les unes des autres et qui préservent la compatibilité ascendante avec les normes et les terminaux LTE existants.

LTE Advanced est donc une évolution de la norme LTE avec des compléments fonctionnels qui permettent une introduction progressive des nouvelles fonctions dans les réseaux LTE préexistants. Les stations de base eNode-B compatibles avec les normes LTE Advanced restent compatibles avec les terminaux simplement LTE, y compris dans les bandes de fréquences agrégées (utilisées en mode « *Carrier Aggregation* ») [5].

I.3 Le réseau PMR

I.3.1 Introduction PMR

Moins connus du grand public que les réseaux cellulaires, le système de radiocommunication professionnelle constitue pourtant la forme la plus ancienne de communications mobiles. Le système de radiocommunication professionnelle PMR est généralement simple voir très simple en terme d'équipement et de gestion, il offre de nombreux avantages par rapport aux réseaux cellulaires tant du point de vue autonomie de gestion que par les services offerts.

Ce dernier n'a pas connu d'évolution technique majeure jusqu'aux années 1970. Le principe sur lequel est basé le PMR consiste à allouer une seule fréquence pour un ensemble d'utilisateurs, ce qui a mené à une utilisation moins optimale du spectre radio.

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

I.3.2 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.

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

I.3.3 Un réseau privé

Le réseau PMR appartient à son utilisateur qui en finance le déploiement et qui en assure l'exploitation. Le réseau est adapté à ses besoins en termes de capacité de trafic, de couverture et de services. 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 maximum de ressources réseau assuré [6].

I.3.4 Les autres réseaux

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

I.3.5 Classification 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 monosite et réseaux multisite [7].

I.3.5.1 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. La figure (I.9) montre l'architecture des communications courte portées.

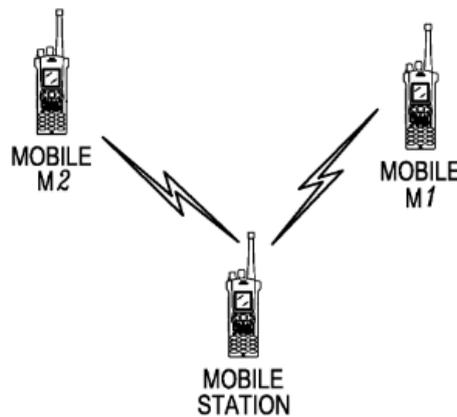


Figure I.8 : Réseaux sans site fixe.

I.3.5.2 Réseaux monosite

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 monosite.

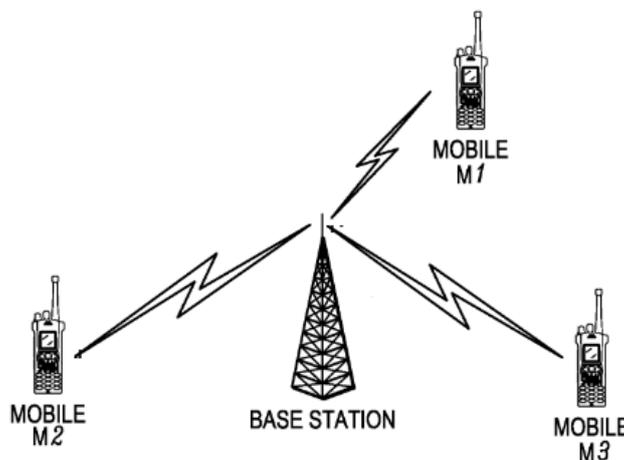


Figure I.9 : Réseaux monosite.

I.3.5.3 Réseaux multisites

Il se peut que les utilisateurs interviennent sur des zones plus étendues (autoroutes, département, pipe-line.....). L'utilisation de plusieurs sites est nécessaire. Les sites sont reliés entre eux soit par faisceaux hertziens (FH), soit par fibre optique afin de permettre les communications entre zones différentes (figure I.11).

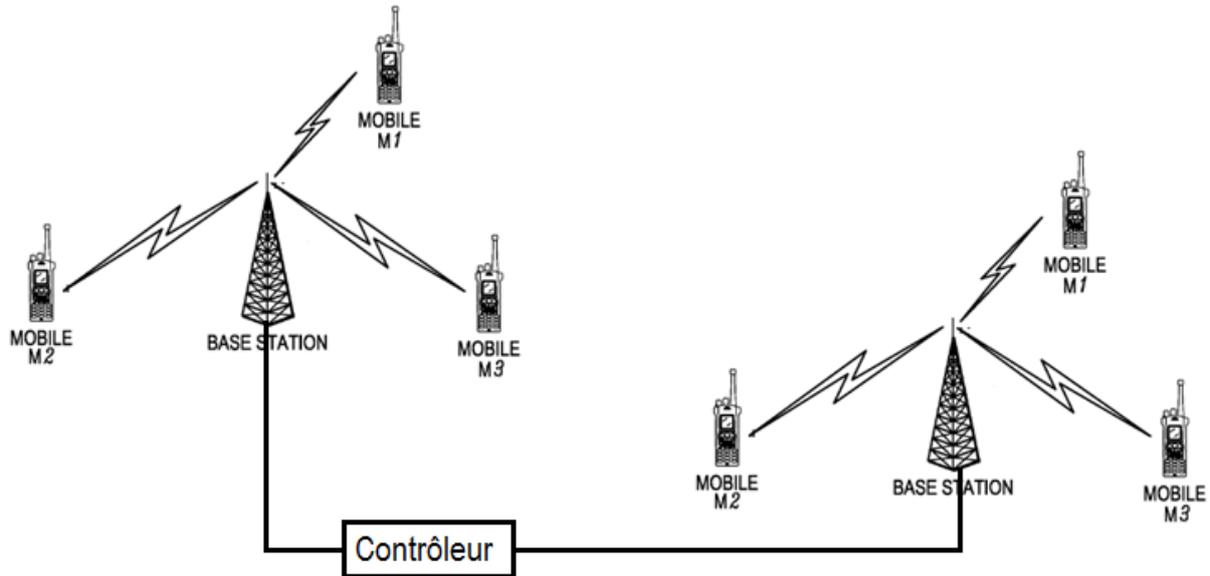


Figure I.10 : Réseaux à couverture multisite.

I.3.6 caractéristiques de réseau PMR

Nous mettons ici en évidence les caractéristiques d'un réseau PMR [7] :

- Haut niveau de sécurité : confidentialité, permanence de service.
- Bonne qualité de la phonie : les communications doivent être parfaitement audibles.
- Bandes de fréquences réservées (et sous licence) :
 - pour éviter tout risque d'interférence et de collision avec d'autres réseaux,
 - l'attribution d'une largeur de spectre radio aux réseaux est faite selon leurs besoins de trafic afin d'éviter les risques d'encombrement réseau.
- Optimisation des coûts : l'utilisateur va chercher à réduire le nombre de relais radio qui sont des éléments chers de son réseau dont il est le seul utilisateur.
 - cellules étendues pour une bonne couverture de zones rurales avec peu de relais,
 - bonne efficacité spectrale pour optimiser l'utilisation des fréquences dont la licence est chère.
- Interface air éprouvée sur des technologies qui ont fait leurs preuves :
 - résistance aux brouillages,

- bonne pénétration dans les bâtiments (couverture indoor) ; ce point va aussi dans le sens de la réduction des coûts en évitant des équipements spécifiques pour les parties couvertes.
- Services voix et données intégrés sur le même équipement (terminal et infrastructure).
- Modularité – Extensibilité : l'accroissement des besoins d'un utilisateur ne doit pas remettre en cause l'investissement.

I.3.7 Les technologie de PMR

I.3.7.1 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 indiscretes 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 [6].

- 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.3.8 Le 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 indiscreètes, 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.

I.3.9 Les différentes standardisations de PMR

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.

- 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.
- 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.
- 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.

- 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.3.10 Les Fréquences utilisées

Le spectre radio est une ressource extrêmement convoitée dont l'allocation est régie par des organismes internationaux (ITU, CEPT). Historiquement, les fréquences ont été allouées de manière désordonnée dans tous les pays du globe. Ceci a pour conséquence de nuire à l'interopérabilité des réseaux. Les organismes de régulation, dont il a été fait état ci-dessus, œuvrent afin de mener à bien une certaine harmonisation des fréquences. Chacun de ces organismes édicte ses règles dans le cadre fixé par l'organisme de rang supérieur : ITU pour la CEPT et la CEPT pour l'ANFR.

En marge de ces organismes, l'Union Européenne est intervenue pour uniformiser les fréquences utilisées par les Forces de Sécurité Publique dans tous les pays de l'Union (Accord de Vienne), afin de rendre possible l'interopérabilité des polices prévue par l'accord de Schengen. Suite à cet accord, les polices de tous les pays de l'Union Européenne utilisent la même bande 380-400 MHz, dite « bande de Schengen ».

Voyons la répartition des fréquences PMR, les fréquences de la PMR analogique sont dans la bande VHF (30- 300 MHz) et celles de la PMR numérique dans la bande UHF (300-3000 MHz). Le tableau suivant peut en donner une petite idée bien que toutes les bandes de fréquence, surtout en PMR analogique, ne soient pas citées [6].

On peut noter quelques exceptions. La PMR 446, analogique, est dans la bande UHF. Le réseau RUBIS, numérique, de la Gendarmerie Nationale est dans la bande VHF, l'utilisateur ayant souhaité, lors de la migration au numérique, conserver ses anciennes fréquences. D'autres pays d'Europe utilisent également une bande PMR 870-960 MHz, non disponible en France, car initialement allouée au GSM.

Bande	Utilisation
30 – 40 MHz	PMR Analogique
68 – 85,5 MHz	PMR Analogique PMR Numérique (Gendarmerie)
137 – 174 MHz	PMR Analogique
164,7 – 171,3 MHz	RPX
380 – 400 MHz	PMR Numérique Sécurité Publique Europe (Schengen)
310 – 340 MHz	PMR Analogique
410 – 430 MHz	PMR Numérique
450 – 470 MHz	PMR Numérique dont RPX (et PMR 446 analogique)
870 – 960 MHz	PMR (ultérieurement large bande), actuellement occupée par la GSM

Tableau I.1 : Les bandes de fréquences PMR analogique et numérique.

❖ *Canalisation*

La PMR utilise des canaux radio multiples de 12,5 kHz. Les réseaux analogiques fonctionnent souvent avec des canalisations de 25 kHz. Quelques rares réseaux utilisent une canalisation 10 kHz. Chaque canal radio est duplex, c'est-à-dire composé d'un canal dans le sens montant et de son homologue dans le sens descendant, séparés par un espace duplex dont la valeur dépend de la bande de fréquence (10 MHz dans les bandes de fréquence 300-400 MHz).

I.3.11 Les avantages des systèmes 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 :

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. Par ce que elle pouvant être utilisés dans des environnements particuliers (industrie, utilisation des gaz, électricité) et dans des conditions spéciales (de température et de pression). A cet égard les systèmes PMR doivent répondre à des caractéristiques bien adaptées.

I.3.12 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 [6] :

- 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.4 Conclusion

Les réseaux de téléphonie se sont beaucoup plus développés, qu'ils soient filaires ou hertziens. Ces dernières années, un besoin se crée, celui d'être connecté en permanence à un réseau mobile pour cela on a vu l'apparition de nouveaux réseaux sans fil pour la communication à distance.

Les systèmes PMR 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 du deuxième chapitre.

Chapitre II

La norme TETRA

II.1 Introduction

Dès le début des années 90, l'Union Européenne a chargé l'ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) d'établir une norme européenne pour les radiocommunications professionnelles numériques. A la fin d'année 1995, les différentes nations concernées ont adopté les composantes essentielles de la norme TETRA (*TERrestrial TRunked RADio*) 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 est une norme cellulaire numérique de radiocommunication à ressources partagées, destinée à la transmission de la voix et de données. Le principe technique unifié de TETRA devrait garantir une grande flexibilité et de trouver des solutions économiquement plus avantageuses. Elle a été conçue 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 21^{ème} siècle.

TETRA est une norme de l'ETSI décrivant un système de transmission radio en technologie numérique. Autour de cette norme reconnue par l'ensemble des Pays Européens, TETRA est un système de radiocommunication mobile de hautes performances conçu essentiellement pour des utilisateurs professionnels services d'urgence, transports publics, etc. L'ensemble des spécifications du système TETRA assure une capacité radio intégrée et complète pour des communications directes de mobile à mobile avec ou sans partage des ressources avec diverses options communications vocales, transmission de données en mode circuit, transmission de brefs messages de données et services en mode paquet [8].

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 couvrent trois services de télécommunication distincts :

- voix plus données.
- transmission optimisée de données par paquets.
- mode direct.

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*). TEDS repose sur la technique multi-porteuse adaptative comprenant 8 sous-porteuses de 25 kHz ainsi que sur une modulation QAM linéaire. Avec des modes de modulation supérieurs et la commutation de 6 canaux de radiocommunication au maximum pour une largeur de bande de transmission de 150 kHz (soit en tout 48 sous porteuses), on obtient des débits allant jusqu'à 134 kbit/s par intervalle de temps, voire supérieurs à 500 kbit/s en occupant 4 intervalles TETRA a donc muté d'un système NB (à bande étroite) à un système WB (à large bande). Les premiers réseaux compatibles TEDS ont été mis en service fin 2013 [9].

Parmi les autres systèmes concurrents à la norme TETRA, notons EDACS (*Enhanced Digital Access Communications System*) développé par Ericson, TETRAPOL développé par MATRA-COM et la norme américaine APCO25 basée sur la technique FDMA [5].

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.

L'architecture de réseau TETRA est généralement sont formés 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.

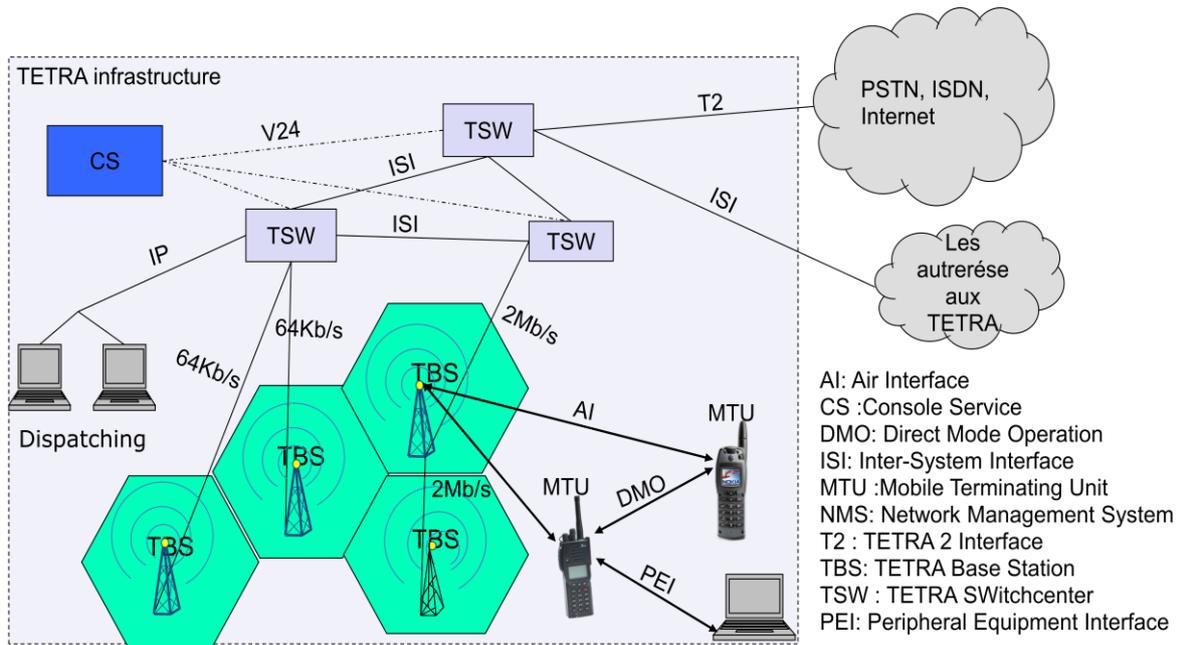


Figure II.1: Architecture TETRA [10].

- L'interface air (AI) : est le type de liaison qui existe entre le terminal radio et la station de base.
- L'interface d'exploitation des terminaux (TEI) : est la liaison qui existe entre un mobile et un terminal permettant la transmission de données. Comme exemple la communication entre un PC et un mobile.
- L'interface Inter Système (ISI) : est la liaison existant entre des réseaux TETRA.

Les améliorations offertes par le standard TETRA permettent entre autres :

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

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

Parmi ses fonctions les suivantes [11]:

- 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.

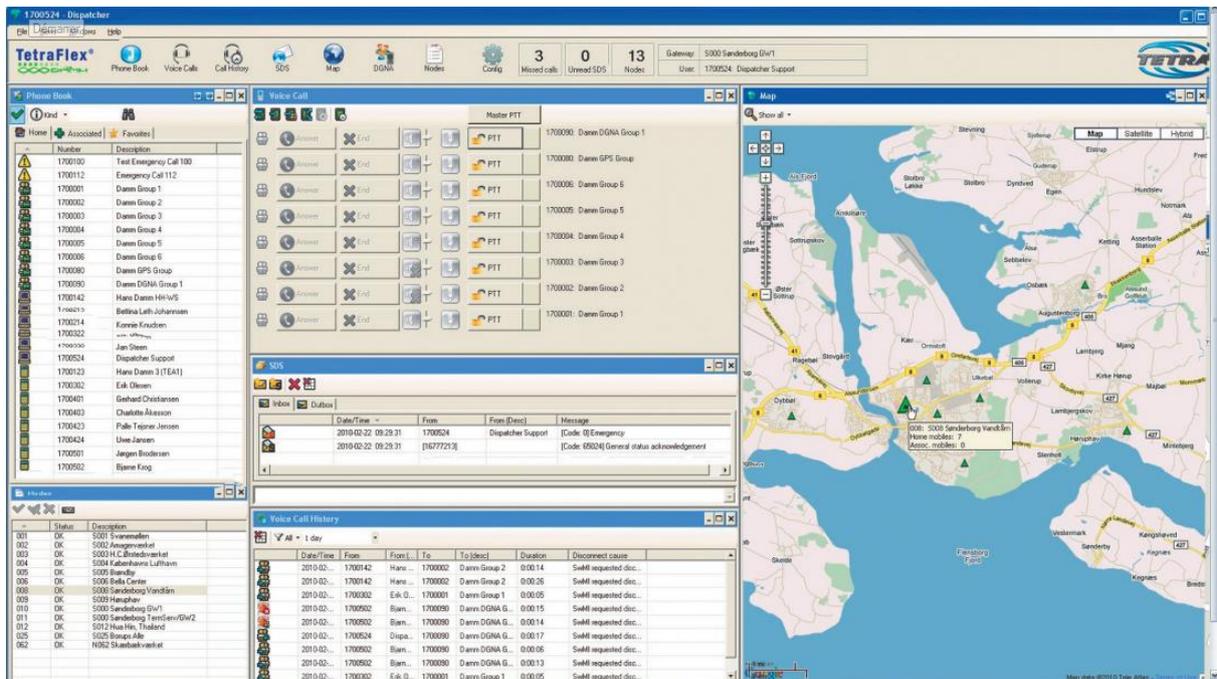


Figure II.2 : Console administration TETRA [12].

II.3.2 Le dispatching

Un dispatching est un ensemble de postes de travail phonie et/ou données communiquant de manière privilégiée avec les mobiles ; un mobile est rattaché à un et un seul dispatching, il dialogue avec ce dispatching sans avoir à se soucier du poste de travail exact avec lequel il dialogue réellement. L'un des rôles d'un dispatching consiste donc à gérer l'attribution des tâches entre ses postes de travail, cette gestion n'est pas du ressort du switch. Ainsi, une flotte de mobiles peut être affectée à un dispatching : lorsque l'un de ces mobiles appelé son dispatching, il ne se soucie pas de qui va prendre

la communication. De même, pour les transmissions de données, un mobile émet sa position géographique vers son dispatching sans avoir à se soucier par quels calculateurs cette information va être traitée [13].

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

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

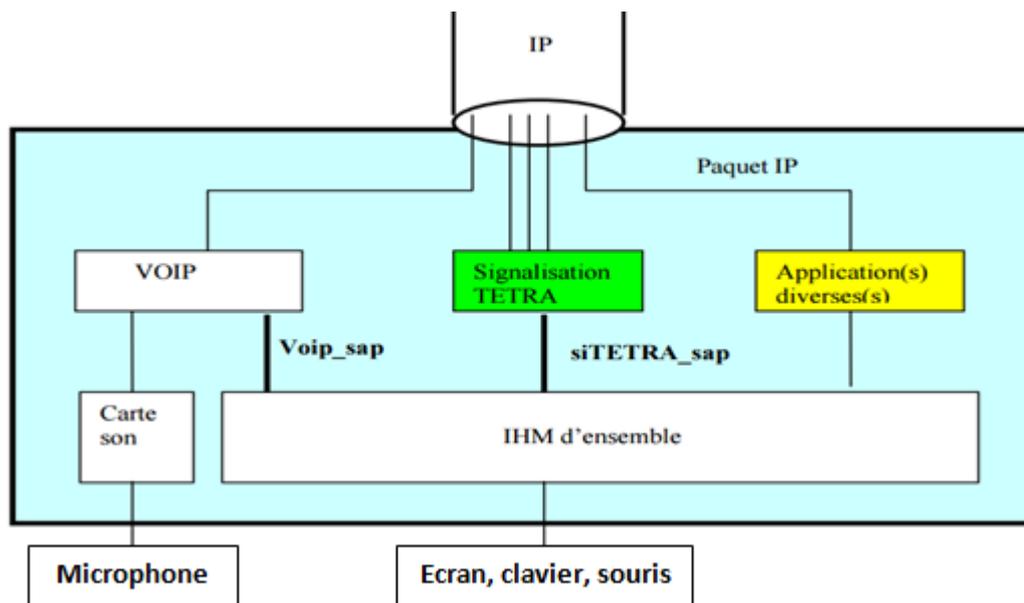


Figure II.3 : L'architecture interne d'un poste dispatching [13].

Parmi les fonctions de dispatching les suivantes [11] :

- 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 TSW (Figure II.4) 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.4: *Switch TETRA [14].*

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, parmi lesquels nous citons :

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.5, 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.



Figure II.5 : La micro TBS répéteur mobile.

II.3.5 Le mobile TETRA (TMS)

Avec ses 10 Watts de puissance RF et sa technologie de passerelle et de répéteur la plus éprouvée sur le marché, le mobile TETRA permet d'étendre la communication à d'autres domaines au-delà de la couverture réseau. Un lecteur audio de 8 W fournit un son fort et clair et le module GPS intégré permet de suivre les satellites GPS et le réseau de satellites en utilisant le dernier support GPS différentiel, la technologie CW anti-brouillage 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 [11].



Figure II.6 : *Mobile TETRA* [14].

II.3.5.1 La robustesse des terminaux

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

II.4 Les différent type de communication TETRA

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

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.7). 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.

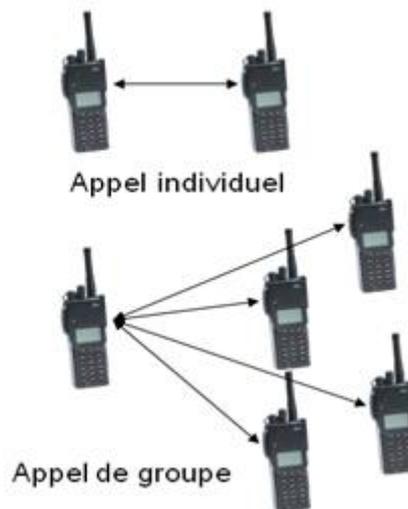


Figure II.7 : *Mode direct sans répéteur* [10].

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.

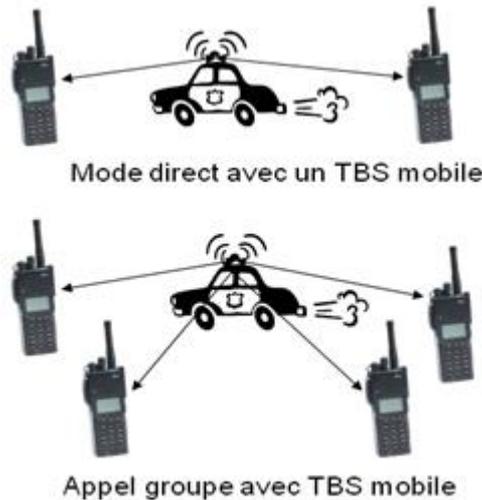


Figure II.8 : Mode direct avec répéteur (micro TBS) [10].

II.5 Les interfaces radio TETRA

TETRA utilise le système TDMA (*Time Division Multiple Access*). Un canal radio comporte 4 canaux physiques (intervalles de temps). Dans sa version originale (Version 1), 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 (figure II.9), avec la modulation de phases $\pi/4$ -DQPSK (*Differential Quadrature Shift Keying*) [6]. Le spectre de fréquence alloué aux systèmes TETRA allant une bande 380 à 400 Mhz avec 10 Mhz d'écart duplex.

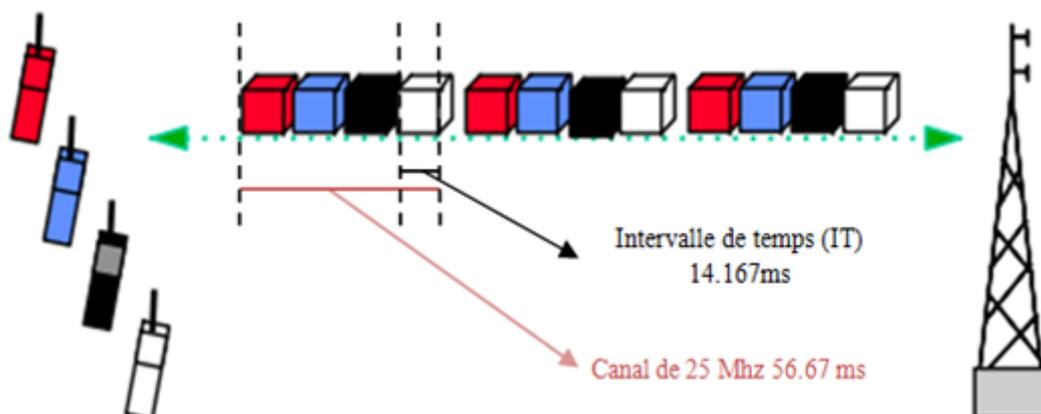


Figure II.9 : Structure canal au niveau TETRA.

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.

Le débit requis pour chaque station de base est de 64 Kb/s, ce débit est suffisant pour acheminer les 3 ou 4 voies de trafic et l'éventuelle voie de signalisation commune. Le mode de multiplexage interne utilisé (multiplexage statistique) est très efficace pour la transmission de données longues simultanément avec la phonie (le multiplexage temporel est moins efficace). Le débit de 64 Kb/s correspond à l'un des 30 IT de 2 Mb/s lorsque ce type de jonction est utilisé, la mise au format une liaison entre deux TBS est automatiquement réalisée par les équipements, il reste seulement à déclarer le numéro d'IT.

II.5.1 La modulation utilisée

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

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

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 [3].

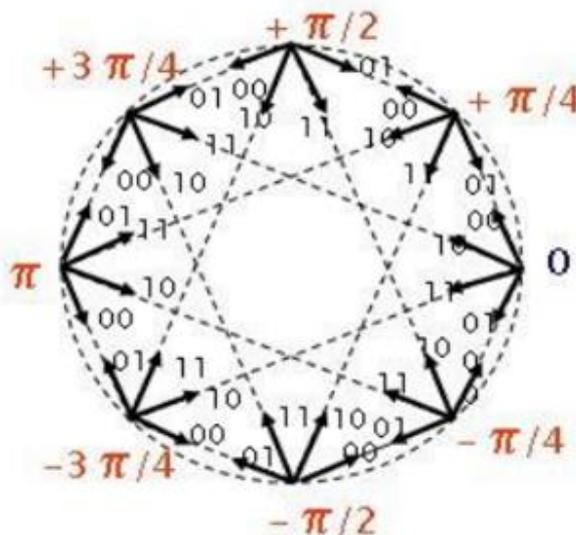


Figure II.10 : Constellation modulation $\pi/4$ -DQPSK.

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 [15]:

- $n \times 7,2$ 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.

II.5.2 Structure des slots

Les paquets dans le réseau TETRA sont organisés de manière hiérarchique en trame, multi trame et hyper trame, conformément aux diagrammes ci-après :

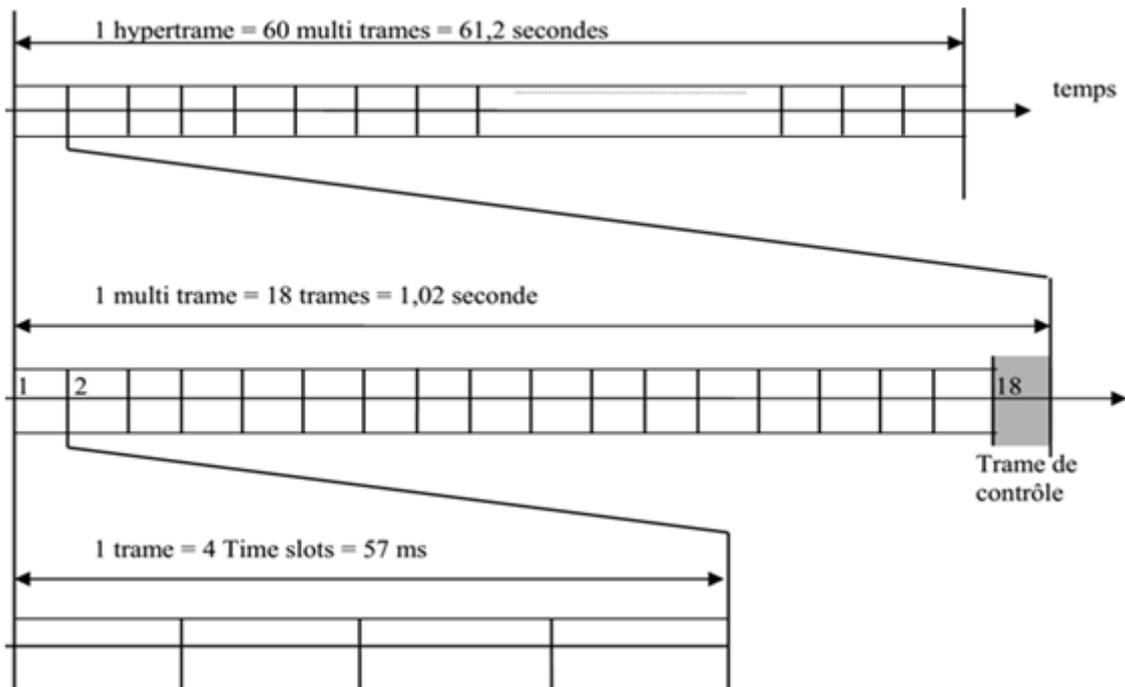


Figure II.11 : Structure de l'hyper trame TETRA.

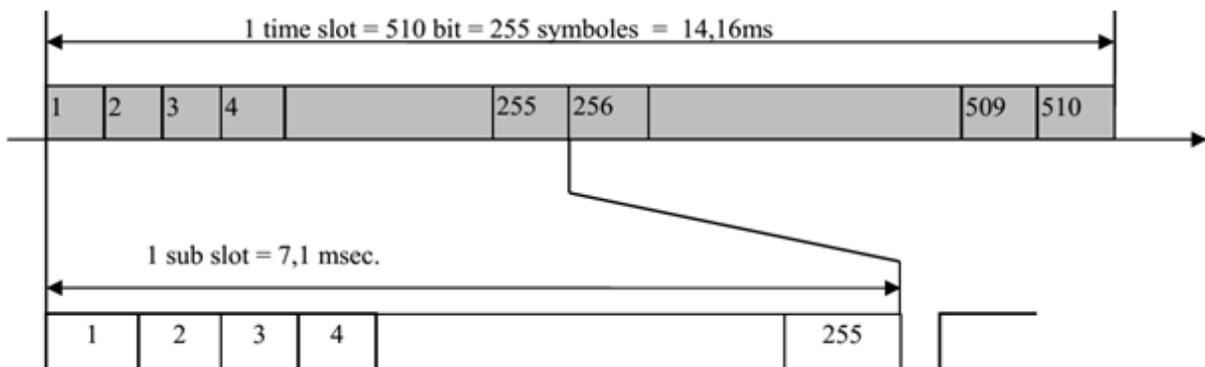


Figure II.12 : Structure de demi-slot TETRA.

Il existe 6 types de paquets possibles dans la norme TETRA, comme il schématisé par la figure II.13.

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 [4] :

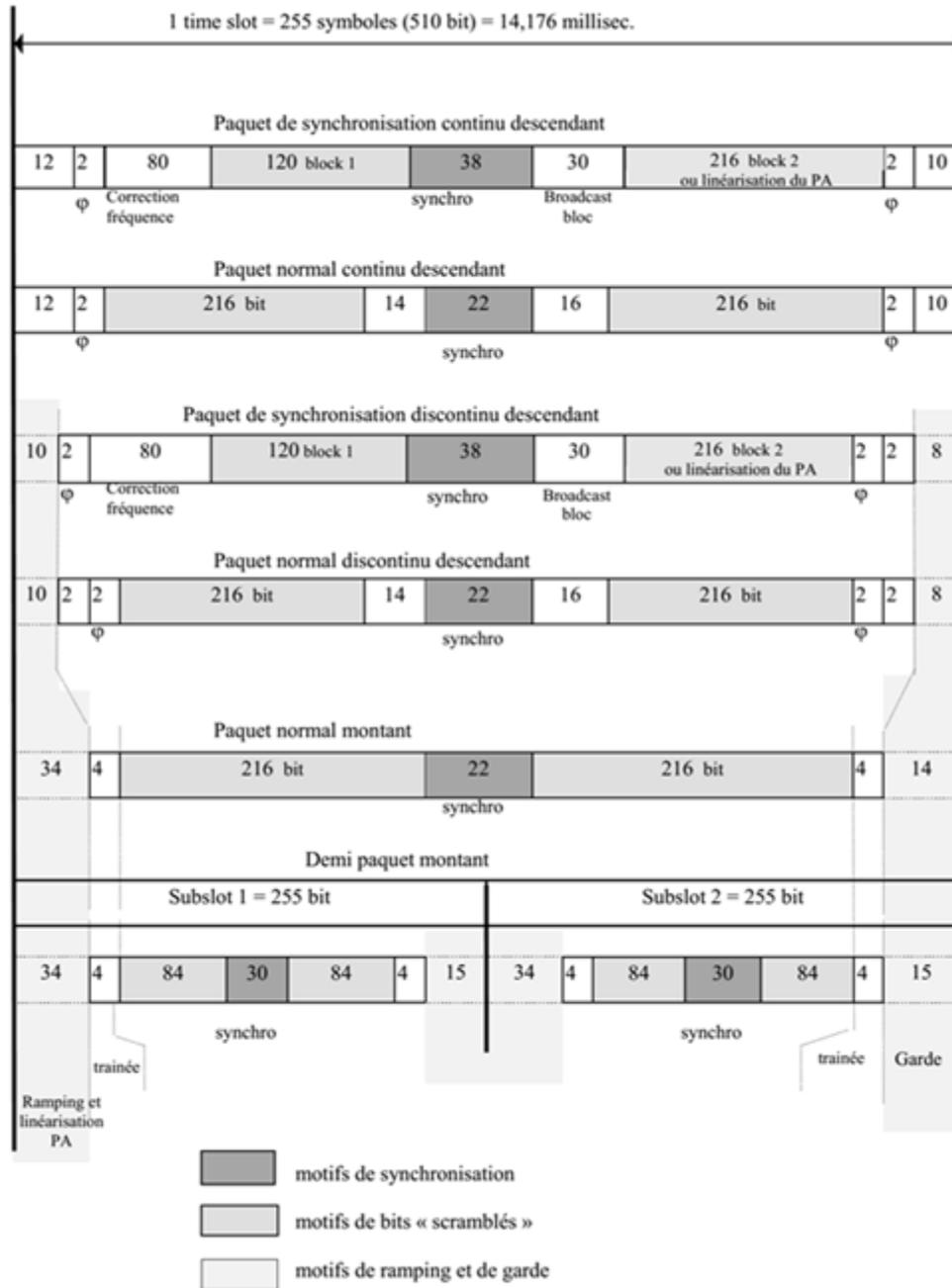


Figure II.13 : Défèrent types de time slot

a. Sur le canal montant (UL)

- ❖ 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. On 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.

b. Sur le canal descendant (DL)

- ❖ *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.6 Les canaux radio

II.6.1 Les canaux de contrôle

Les canaux de contrôle sont des entités qui servent de « porteurs » pour les canaux logiques de signalisation- ce sont des canaux CCCH (*Common Control CHannel*) qui se décomposent en [7] :

- **Canal MCCH**: (*Main Control CHannel* - canal de signalisation principal) Il y a un et un seul MCCH par site radio ; ce canal n'est donc associé qu'à une seule des fréquences radio utilisées sur le site. En général, ce canal est présent dans tous le time slot 1 des trames de 1 à 18. Lorsqu'un mobile arrive sur un site, c'est toujours le canal radio supportant le MCCH qu'il recherche. Sur un site, la station de base qui supporte le MCCH allume un voyant spécifique sur sa face avant. C'est le Switch qui détermine quelle station de base supporte le MCCH en fonction des directives dans la base de données techniques et des éventuelles alarmes de site.
- **Canal SCCH** : (*Secondary Control CHannel*) c'est un canal de signalisation réservé pour certains groupes de mobiles. Lorsqu'un mobile appartenant à l'un de ces groupes se présente sur un site, il arrive sur le MCCH et il est invité à rejoindre son SCCH. Un canal SCCH peut être installé sur n'importe quelle des fréquences radio utilisées sur un site – ainsi un canal SCCH peut être traité, sur le même site, par une station de base différente de la station de base portant le MCCH. La déclaration des canaux SCCH n'est pas implantée dans les versions actuelles.
- **Canal ASCCH**: (*ASsociated Control CHannel*) c'est un canal de signalisation utilisé en extension d'un canal MCCH ou SCCH. Un canal ASCCH doit être pris sur la même fréquence radio (sur la même BS) que le canal MCCH ou SCCH dont il est l'extension. Ce canal sert donc de dégagement en cas d'engorgement sur les canaux MCCH ou SCCH ; ils sont utilisés de manière très particulière

pour poursuivre des échanges commencés sur les canaux MCCH ou SCCH - en aucun cas, les requêtes initiales mobiles vers infrastructure ne sont transmises sur ce canal ; il n'y a donc aucun trafic événementiel sur ces canaux. C'est le TSW qui décide de l'affectation temporaire d'un canal ASCCH.

Ces canaux transportent les informations de trafic vocal ou de données en mode circuit.

II.6.2 Canaux de trafic vocal

Le codec à fréquences vocales correspondant aux services de communication vocale, mécanismes de correction et de détection d'erreurs compris, n'a pas été défini dans la norme ARIB (1995). Toutefois, cette norme définit la structure de trame du canal vocal – trame vocale de 90 ms comprenant au total 672 bits, y compris les bits additionnels de correction d'erreur. L'opérateur du système peut librement choisir le débit binaire du codec et la technique de limitation des erreurs, jusqu'à un total de 7,467 kbit/s.

II.6.3 Canaux de trafic de données

Un protocole de transmission de données en mode circuit est disponible pour les applications correspondantes. Le protocole des données transmises par commutation de circuits offre un flux de paquets duplex intégral.

Ultérieurement, le système IDRA offrira une possibilité de transmission de données par paquets. Le temps d'émission de transmission des paquets est attribué dynamiquement aux systèmes utilisateur en fonction de leurs besoins de communication instantanés. Le protocole de communication de données par paquets offrira une capacité de détermination automatique du débit en bauds de telle sorte que l'utilisateur pourra choisir entre différents taux nets de transmission discontinue [16].

II.7 Procédures de gestion des appels

Au niveau de TETRA l'appel peut être établi selon deux modes : soit avec contrôle de présence, soit sans contrôle de présence, 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.

Dans l'établissement d'appel avec contrôle de puissance (figure II.14), un mobile M1 souhaite établir une communication avec un mobile M2 émet un message de demande d'*accès-setup*. Une fois la station de base reçoit le message répond par un acquittement *d-call* procédent et envoi sur place un message *d-setup* au mobile M2 afin de vérifier sa présence. Le mobile M2 réagit par, s'il est présent par un message *u-connecte*. Une fois la station de base reçoit l'acquiescement, elle alloue aux mobile M1 et M2 un canal de trafic en émettant simultanément les messages déconnecte *déconnect-ack*.

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 [7].

TETRA possède plusieurs mécanismes pour la communication de manière sûre. Une première protection réside dans le cryptage sur l'interface aérienne. Chaque utilisateur négocie individuellement avec les stations de base la clé de communication. Il existe aussi un cryptage de bout en bout qui crypte aussi les données échangées entre la station de base et le poste de commande [15].

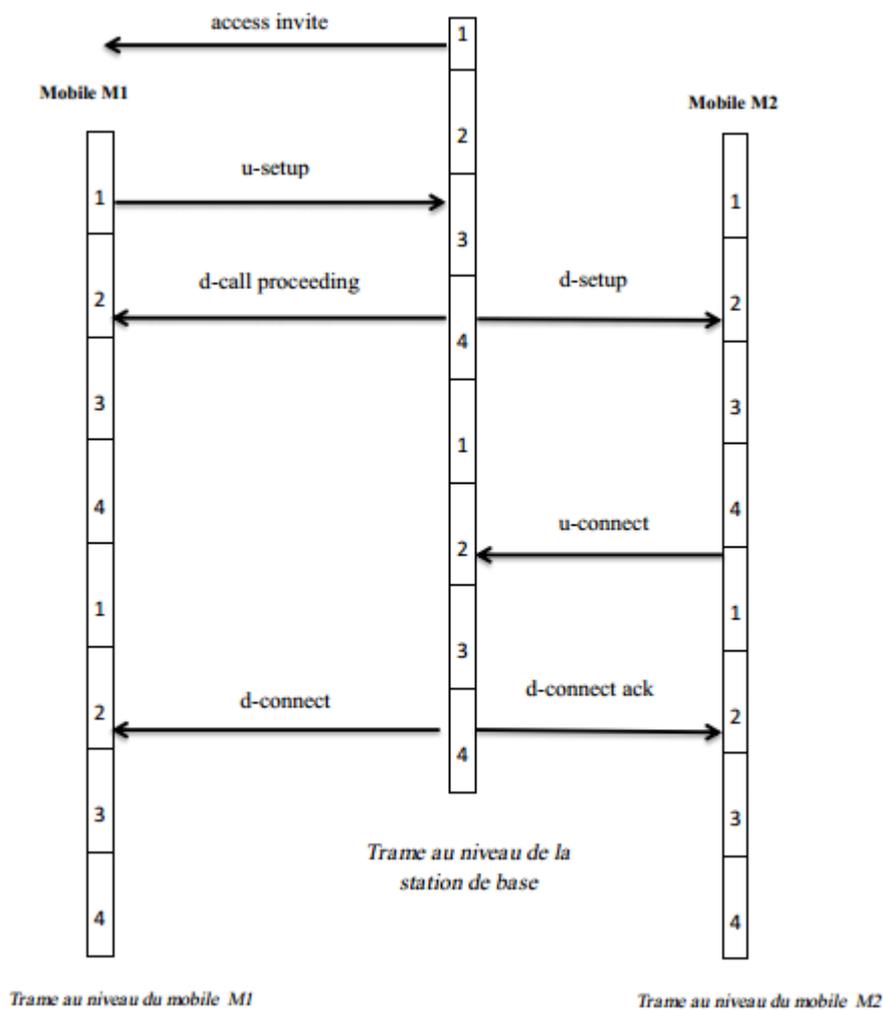


Figure II.14 : Exemple d'établissement d'appel individuel dans TETRA [7].

II.8 Le Handover

La norme TETRA offre les procédures classiques comme tous les autres systèmes : Handover, authentification et chiffrement.

Lorsque le mobile change de cellule en cours de communication individuelle, il effectue un handover, fonction qui lui permet de « récupérer » sa communication sur sa nouvelle cellule de façon totalement transparente à l'utilisateur. Si par contre il change de cellule au cours d'une communication de groupe, il fait une resélection de cellule, opération complexe qui revient à chercher dans les cellules voisines celle qui supportera la même communication de groupe, allant dans les cas extrême au balayage complet du spectre radio alloué au réseau. Contrairement au handover, la resélection de cellule introduit une légère coupure dans la communication [13].

II.9 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 est totalement rétro-compatible.

II.9.1 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.9.2 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 multi-porteuses 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 [9].

II.10 Les avantages et inconvénients de TETRA

II.10.1 Les avantages de TETRA

Les avantages principaux de TETRA par rapport à d'autres technologies (telle que le GSM) sont [9]:

- Une fréquence radio utilisée plus basse, ce qui permet une grande couverture géographique avec un petit nombre d'émetteurs, réduisant ainsi le coût d'infrastructure.
- Un établissement d'appel rapide - un appel de groupe (un vers tous) est généralement émis en 0,5 seconde (typiquement moins de 250 millisecondes pour un appel simple), comparé à plusieurs secondes lors d'un appel sur le réseau GSM.
- Le fait que son infrastructure puisse être séparée de celle du réseau public mobile, et être rendue plus diverse et résiliente par le fait que les stations de base peuvent être à une certaine distance du secteur couvert.
- 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 « le mode direct » où les mobiles peuvent continuer à partager des canaux directement si l'infrastructure du réseau TETRA est hors service ou hors de portée.
- Un mode "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 de 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 relie un abonné à un autre abonné (un à un), TETRA est construit pour supporter les communications un à un, un vers plusieurs et de plusieurs vers 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 chiffrées, aussi bien au niveau de l'émission que de bout à bout.
- Il existe aussi des possibilités d'appel de secours direct en court-circuitant les priorités des autres mobiles pour avoir un acheminement direct. Dans l'industrie, ce système peut aussi être couplé à un système de localisation et d'homme mort (utilisé dans les centrales nucléaires françaises par exemple).
- Au niveau sécurité, il y a la possibilité grâce à l'inscription des mobiles au démarrage de n'autoriser à l'inscription au réseau qu'une liste prédéfinie de mobiles.

II.10.2 Les inconvénients de TETRA

Ses inconvénients principaux sont :

- 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).
- les combinés sont onéreux (environ 750 Euros en 2003, environ 600 Euros en 2006), à cause des économies d'échelle réduites, des modèles différents adaptés à des besoins variés, comparé au marché des téléphones mobiles grand public. La nécessité d'avoir un terminal sûr et robuste fait aussi augmenter son prix.
- 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 25 kHz.
- 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)

II.11 Conclusion

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

Dans ce chapitre, nous avons étudié les caractéristiques de la norme TETRA qui répond à des nouveaux besoins. 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

Le dimensionnement d'un réseau est la première étape du processus global de la planification permettant une première évaluation rapide de la densité et de la configuration des sites requis, de la capacité offerte des éléments du réseau à planifier et de la couverture à estimer conjointement avec la capacité.

Dans ce chapitre, nous allons introduire les concepts de base et les calculs mathématiques nécessaires au dimensionnement sur le plan couverture, ainsi que la présentation de l'outil développé qui sert à faciliter la tâche de dimensionnement.

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. Il représente 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 :

- Le bilan de liaison radio.
- Estimation de la marge de Gain.
- Modèles de propagations.
- Estimation du rayon de cellule et estimation de la couverture.

III.3 Processus de dimensionnement du réseau TETRA

Le dimensionnement des TBS est la partie la plus difficile. On a deux méthodes à suivre, le premier 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 de stations de bases.

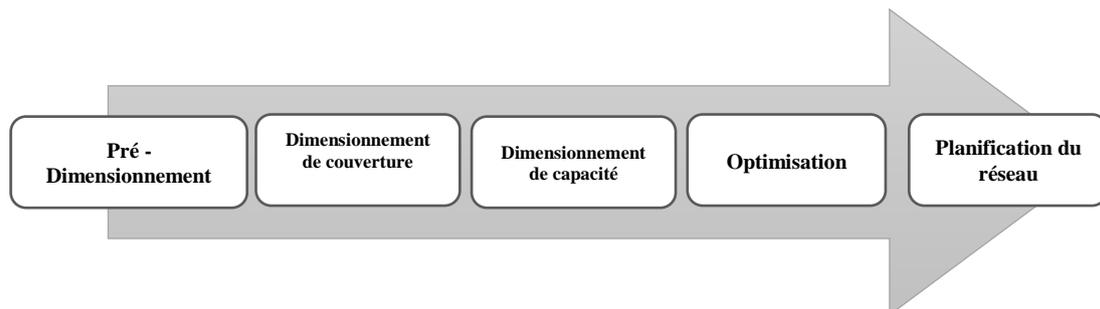


Figure III.1 : *Processus de dimensionnement.*

III.3.1 Pré-dimensionnement

Nécessite la collecte de l'information qui porte sur la zone de déploiement. On cite par exemple :

- L'information détaillée sur les L' TBS et l'TMS.

- L'information sur la zone de déploiement (superficie, information démographique).
- Les donnée géographique : cartographie, population, zone de couverture et taux de pénétration des donnée 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.

III.3.2 Dimensionnement par couverture

Le dimensionnement par la couverture d'un réseau TETRA permet essentiellement de calculer la taille de la cellule. Le rayon de cellule est obtenu suite à la réalisation d'un bilan de liaison qui permet de déterminer l'affaiblissement maximal autorisé MAPL (*Maximum Allowable PathLoss*).

Cette valeur servira pour le modèle de propagation afin de déterminer le rayon de cellule. Sachant la taille de la cellule, on pourra donc déterminer pour la zone à planifier le nombre de stations de base nécessaires [17].

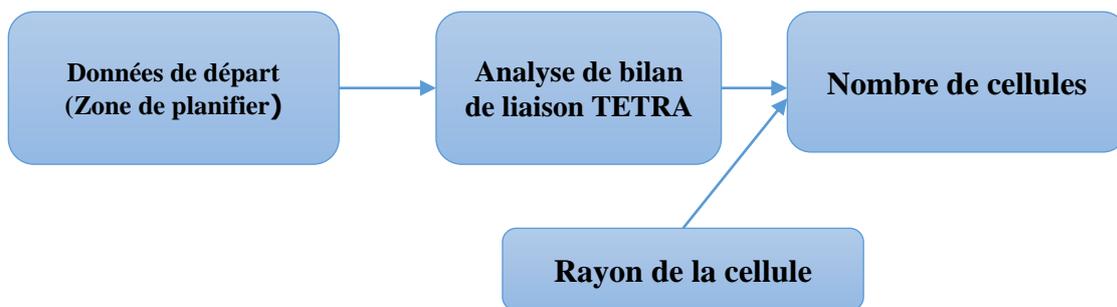


Figure III.2 : Le processus de dimensionnement par couverture.

III.3.3 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 demandé sinon de nouveaux sites doivent être ajoutés.

III.3.4 Optimisation

On compare les résultats obtenus de deux dimensionnement, et on considère le nombre des sites le plus grand. Nous allons débiter notre travail par le dimensionnement de couverture.

III.4 Les étapes de dimensionnement de couverture

Les étapes de dimensionnement de couverture sont :

- ✓ **Exigence de qualité** : L'exigence de qualité de couverture est d'atteindre le débit binaire demandé avec une certaine probabilité par exemple 64 kbps doivent être atteint avec une probabilité de 98%.
- ✓ **Dimensionnement de liaison montante** : Nous cherchons à cette étape le rayon de la cellule à partir du débit binaire à la bordure de la cellule.
- ✓ **Dimensionnement de liaison descendante** : Si les exigences de qualité de liaison descendante sont remplies, on calcule la distance de site à site et on la compare avec le résultat limite de l'Uplink.
- ✓ **Couverture de canaux de contrôle** : La performance du canal de contrôle à la bordure de la cellule doit être vérifiée par rapport à la valeur de la distance intersites calculée.

La figure (III.3) illustre les étapes à suivre :

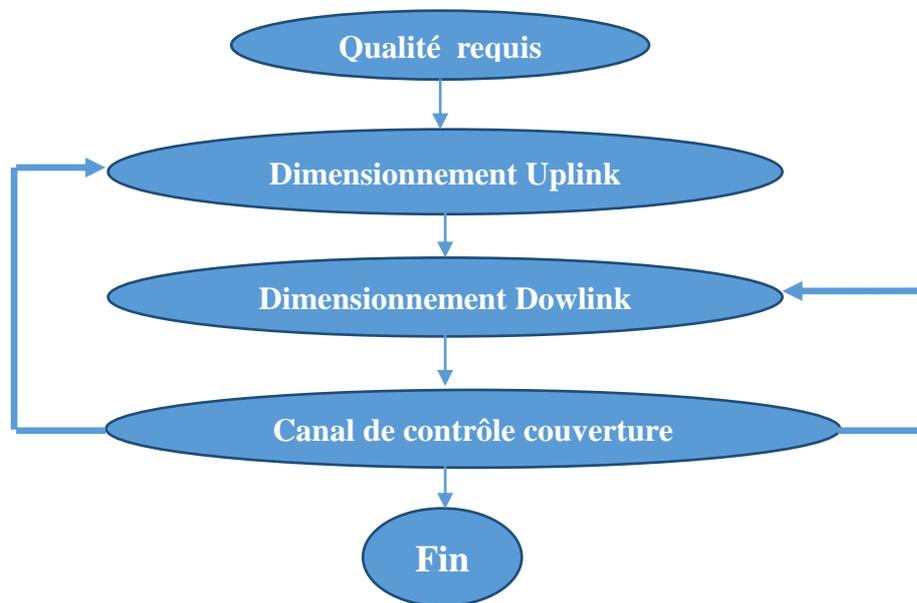


Figure III.3 : Processus de dimensionnement de couverture pour le Downlink et l'Uplink.

III.4.1 Le calcul à faire

Nous devons estimer la distance maximale entre un émetteur et un récepteur tout en répondant aux exigences de performances dans les conditions de propagation. Donc le premier pas à faire est de déterminer l'affaiblissement de parcours maximal (*Maximum Allowable PathLoss MAPL*), en passant par le bilan de liaison radio (RLB).

III.4.1.1 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. Grace 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 [17].

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

$$MAPL = Tx Power + Tx Gain - TxLosses - Se_{TBS} + Rx Gains - RxLosses - Bi UL \quad (III.1)$$

Avec :

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

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

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

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

Se_{TBS} dB : Sensibilité du TBS (dBm)

Rx Gains dB : Gain de l'antenne de réception (dB).

RxLossesdB : Les pertes de réception (dB).

Rx Noise dB : Bruit de réception (dB).

En note quelque paramètre de bilan de liaison :

- **Zone de Fresnel** : La diffraction d'un signal se produit quand l'onde radio rencontre un obstacle.

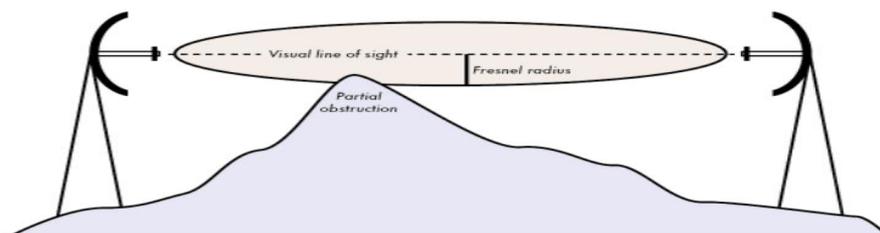


Figure III.4 : Diffraction et zone de Fresnel [7].

L'énergie apparait ainsi dans l'ombre, appelée « zone de Fresnel », qui correspond à une atténuation situé sous le rayon direct.

➤ *Effet des trajets multiples (Fading)*

Comme l'illustre la figure III.5, la transmission entre une antenne-relais et un téléphone mobile s'effectue généralement via plusieurs trajets. Il y a tout d'abord une onde directe parcourant le chemin le plus court, ainsi des ondes réfléchies par des obstacles (sols, bâtiments,...) et des ondes diffractées par des contours d'obstacles.

Ces trajets ayant des longueurs différentes, il en résulte qu'un signal partant de la BTS au temps t_0 parviendra au mobile à l'instant t_1 et sera suivi d'échos plus ou moins décalés dans le temps en fonction de la longueur des différents trajets parcourus. Le phénomène pour la transmission d'une impulsion de très courte durée et dont l'onde directe n'est suivie que d'un seul écho.

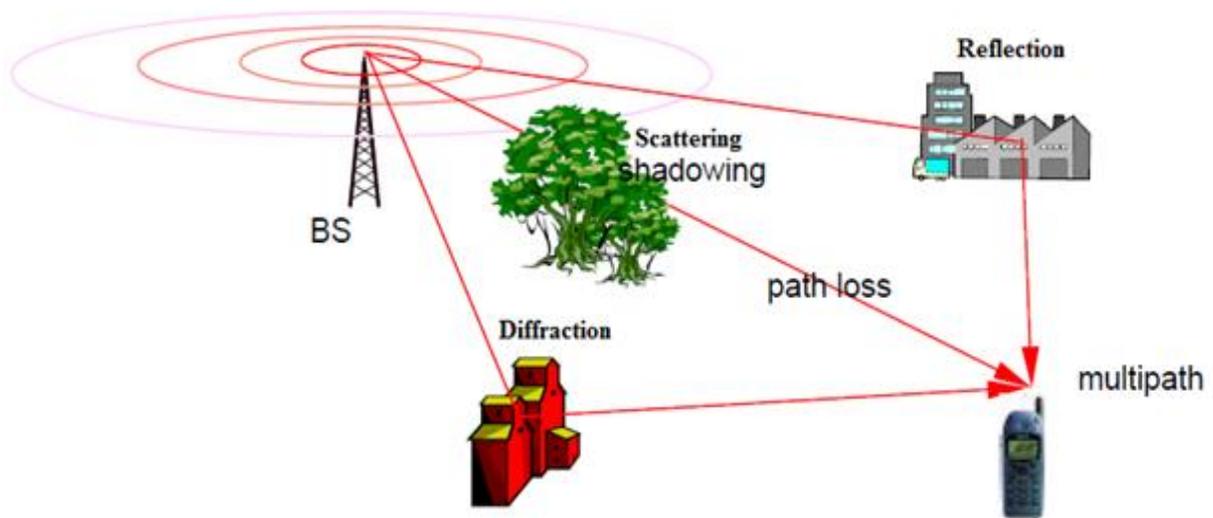


Figure III.5 : *Effet des trajets multiples.*

Notons également que l'onde directe et les différents échos ont, sauf circonstances exceptionnelles, des intensités différentes, puisque les mécanismes, tels que réflexion et diffraction intervenant dans la propagation, affectent l'amplitude du signal

III.4.1.2 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 zones

comme urbaines, suburbaines et rurales. Les modèles de propagation peuvent être classés en deux principales catégories :

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.

a) 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.

III.4.1.3 Types de modèles de propagation utilisés

a) Modèles empiriques

L'élaboration de ces modèles repose sur la collecte de données concernant des mesures et des formule mathématique pour permette prédire l'impact ainsi que la valeur moyenne d'affaiblissement d'un émetteur sur une certaine zone de réception. Les modèles empiriques ont l'avantage d'être simple et de faiblement dépendre des caractéristiques d'un site. C'est pourquoi ils sont couramment employés pour les communications cellulaires pour une première estimation de la perte de propagation. On distingue plusieurs types du modèle empirique [18].

b) Le modèle Okumura-Hata

C'est un modèle qui prend en compte les conditions dans lesquelles s'effectuent les liaisons radioélectriques, les modèles statistiques apportent à la formule d'atténuation en espace libre des facteurs de correction empiriques.

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

- Fréquence (f) : 150 à 1000 MHz.
- Hauteur de la station de base (H_b) : 10 à 200 m (dépend toujours de la zone : clutter).
- Hauteur du terminal mobile (H_m) : 1 à 10 m.

- Distance (d) : 1 à 20 km.

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

➤ **Urbain :**

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

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:

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

➤ **Sous urbain :**

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

$$Lsu = Lu - 2 \left[\log \left(\frac{f}{28} \right) \right]^2 - 5,4 \quad \text{(III-4)}$$

➤ **Rurale :**

En milieu rural, on distingue le cas où l'environnement est totalement dégagé comme dans un désert (affaiblissement Lro) ou bien semi-dégagé comme dans une campagne sympathique affaiblissement ($Lrqo$) :

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

$$Lrqo = Lu - 4,78 * [\log(f)]^2 + 18,33 \log(f) - 35,94 \quad \text{Quasi-Ouverte} \quad \text{(III-6)}$$

c) **Le modèle Standard Propagation Model (SPM)**

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. L'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:

$$P_R = P_{TX} - [K_1 + K_2 \log(d) + K_3 \log(H_{eff}) + K_4 \times \text{Diffraction} + K_5 \log(d) \times \log(H_{eff}) + K_6 (H_{meff}) + K_7 f(\text{clutter}) K_8] \tag{III-7}$$

Ou :

P_R	Puissance reçue par le mobil (dbm)
K_1	Constante de centrage (db)
K_2	Facteur multiplicatif de log(d)
D	Distance entre l'émetteur et le récepteur
H_{eff}	Hauteur effectif de l'antenne émettrice(m)
K_3	Facteur multiplicatif de log (Heff)
K_4	Facteur multiplicatif du coefficient de diffraction
K_5	Facteur multiplicatif de log(d) de log (Heff)
K_6	Facteur multiplicatif de Hmeff
H_{meff}	Hauteur du récepteur mobile
K_7	Facteur multiplicatif de f (clutter)
$F(\text{clutter})$	Poids moyen de la perte du clutter
K_8	Facteur de correction de la région
P_{Tx}	Puissance transmise par l'antenne duBTS (dbm)

Tableau III.1: Paramètres du modèle SPM [7].

III.4.1.4 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.4.1.4.1 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 dernier 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.4.1.4.2 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.

$$S_{e_{NB}} = N_t + N_f + 10\log(W) + \gamma = N_{RU, UL} + \gamma [db] \tag{III-8}$$

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].

W : La bande passante.

γ : Rapport signal sur bruit de l'Uplink

$N_{RU, UL} = N_t + N_f + 10\log(W)$: Bruit thermique pour les Uplink

III.4.1.4.3 Les marges de bruit

On ne peut pas calculer l'affaiblissement de trajet maximum sans calculer les marges de bruit, qui correspondent à l'environnement radio, pour éviter le phénomène « *SwissCheese* » (surface avec trous de couverture).

a- Marge de pénétration : Perte de pénétration est l'atténuation du signal due à la pénétration aux bâtiments. Elle dépend du type de zone, comme indique le tableau (III.2).

Environnement	Pert de pénétration db
Dense urbaine	18-25
Urbaine	15-18
Suburbaine	10-12
Rurale	6-8

Tableau III.2 : Pertes de la pénétration [19].

Cette marge dépend essentiellement de trois facteurs :

- La fréquence du signal : Les pertes varient selon la fréquence du signal.
- Le type des bâtiments : Essentiellement le matériel de construction (brique, bois, pierre, verre, ...).
- La structure des bâtiments : densité et épaisseur des murs, nombre et dimensions des fenêtres.

b- 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 formule de calcul de la perte de la ligne est la suivante :

$$\begin{aligned}
 \text{Length feeder} &= \text{Base station height} + 5\text{m} \\
 \text{Perte Feeder (dB)} &= \text{Feeder loss}/100\text{m} \times \text{Feeder length}/100\text{m} \\
 \text{Perte de Jumper} &= 1/2 \text{ cm feeder} \times \text{nombre de cavaliers (jumpers)} \\
 \text{Perte de connecteurs} &= \text{nombre de connecteurs} \times 2 \times 0.1 \text{ dB}
 \end{aligned}
 \tag{III-9}$$

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

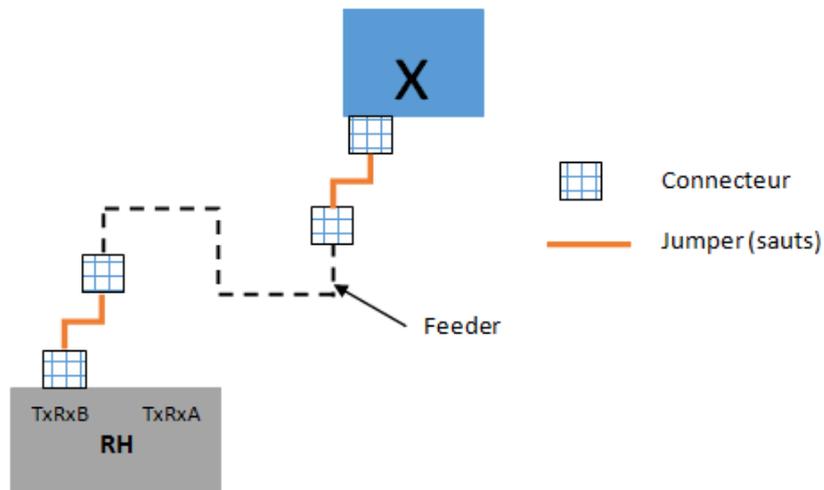


Figure III.6: Connexions du système d'alimentation de l'antenne.

III.4.1.4.4 Bilan de liaison pour le lien montant

La figure ci-dessus illustre le bilan de liaison pour la liaison Uplink. Pour le calcul du bilan de liaison pour le lien montant, il faut tout d'abord déterminer la puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE). Elle correspond à la puissance qu'il faudrait fournir à une antenne isotrope pour obtenir le même champ à la même distance.

Son équation est comme suit :

$$\text{PIRE} = P_{e_{tms}} - S_{tbs} + G_{tms} - \text{Perte} - L_{f_{tms}}
 \tag{III-10}$$

Avec :

S_{tbs} : La sensibilité de l'antenne en (dBm).

$P_{e_{tms}}$: puissance d'émission mobile.

Perte = perte pénétration voiture (L_{CL}) + perte de pénétration du bâtiment (L_{BP}) + perte de corps (L_B).

$L_{f_{tms}}$: les pertes du feeder

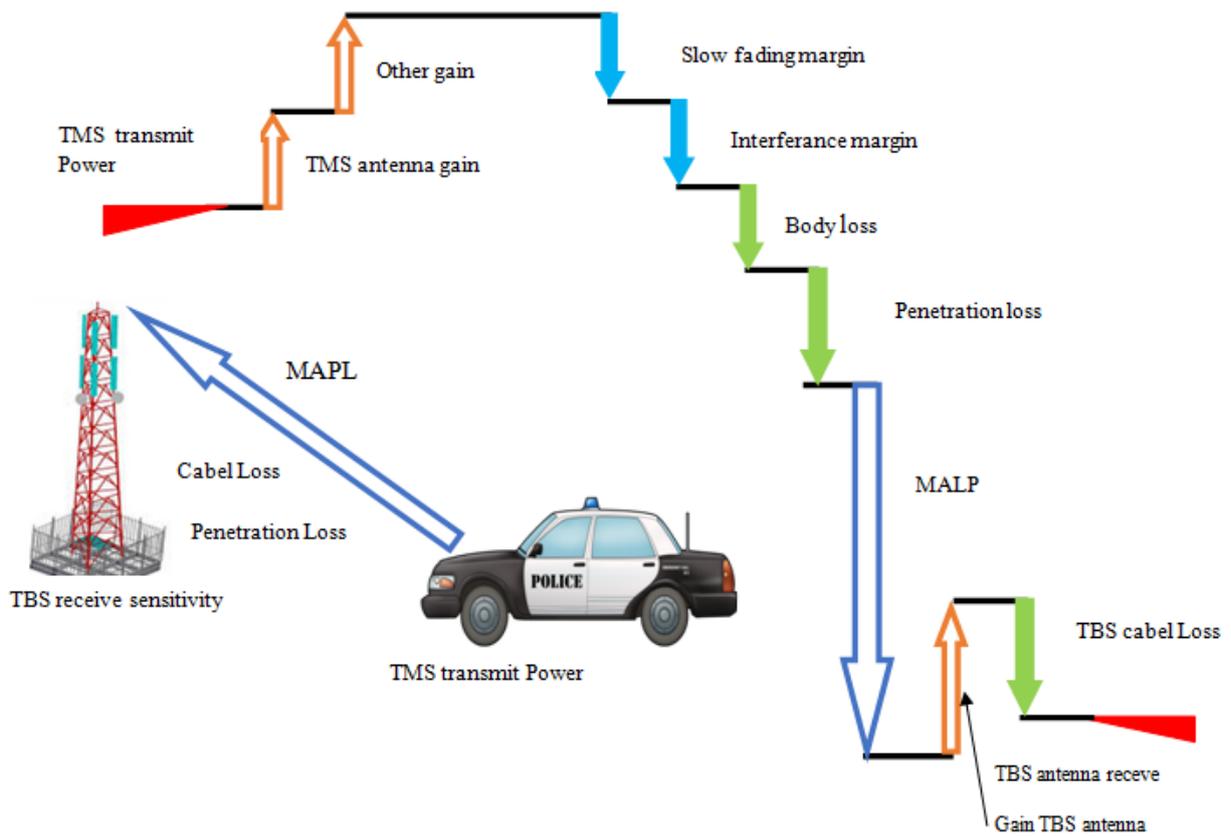


Figure III.7 : Modèle bilan de liaison Uplink.

Pour calculer le **MAPL** il faut calculer le champ équivalent E (dBm) :

$$E = S_{tbs} + (M_f + M_{In}) + (L_{cBTS} + L_{fBTS}) - G_{a_{tbs}} - G_{d_{tbs}} \tag{III-11}$$

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

L_{cBTS} : Perte du combineur de la TBS.

L_{fBTS} : Perte de feeder.

$G_{d_{tbs}}$: Gain de diversité entre les secteurs.

$G_{a_{tbs}}$: le Gain de TBS.

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

$$\text{MAPL} = \text{PIRE} - E \tag{III-12}$$

III.4.1.5 Calcul de la couverture pour le lien descendant

Le bilan de liaison pour les Downlink est calculée pour:

- Pour déterminer les limites du lien.
- Pour déterminer le débit binaire supporté par les liens descendant

III.4.1.5.1 Equation bilan de liaison descendant

La figure ci-dessous illustre l'équation de bilan de liaison pour les liens descendant :

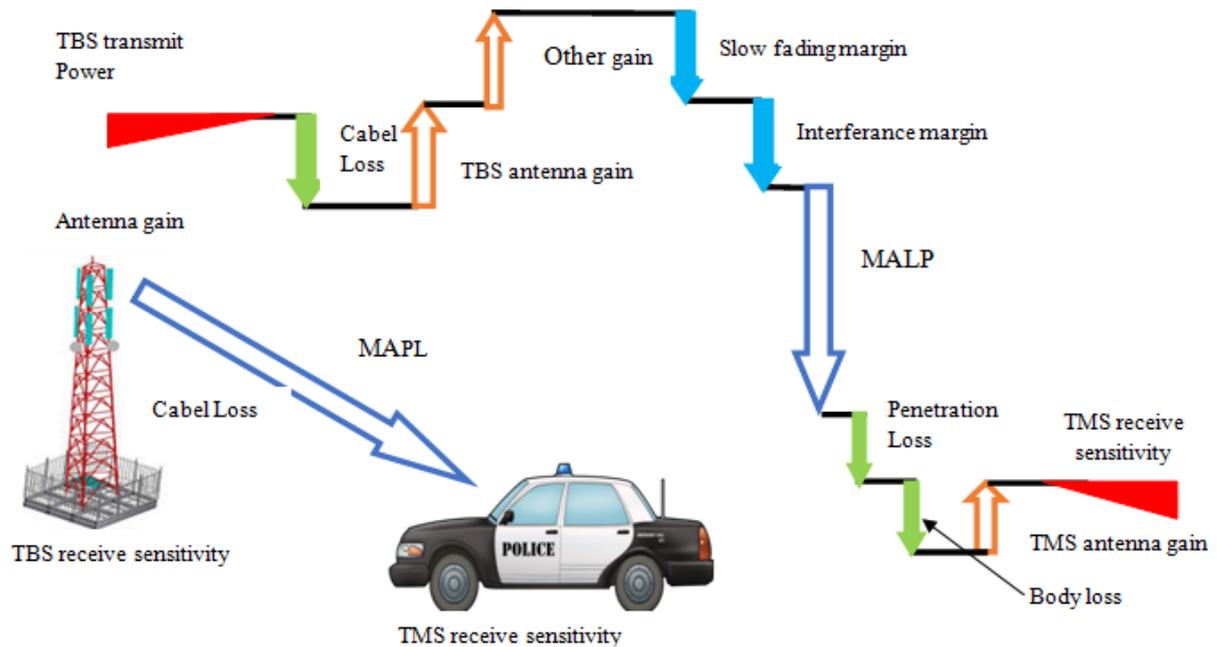


Figure III.8 : Bilan de liaison Downlink.

Le PIRE est décrit par l'équation suivante :

$$PIRE = Pe_{tbs} - (Lc_{tbs} + Lf_{tbs} + L_B) + Ga_{tbs} \tag{III-13}$$

Ou Pe_{tbs} est la puissance d'émission de la TBS (dBm). Le champ équivalent E (dbm) est donné comme suite :

$$E = S_{tms} + (M_f + M_{In}) + (L_{cMS} + L_{fMS} + L_B) - G_{MS} \tag{III-14}$$

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

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

III.4.1.5.2 La sensibilité du l'équipement utilisateur récepteur

L'équation de la sensibilité est comme suite :

$$S_{TMS} = Nt + Nf + 10\log(W) + \gamma = N_{RB, DL} + \gamma [db] \tag{III-16}$$

III.4.1.6 Estimation du rayon de la cellule

Une fois nous avons déterminé le Pathloss maximal dans la cellule, il ne reste plus qu'à appliquer n'importe quel modèle de propagation connu pour estimer le rayon de la cellule. Le modèle de propagation doit être choisi de sorte qu'il soit conforme à la région planifiée. Les critères du choix

du modèle de propagation sont la distance par rapport au BTS, la hauteur de l'antenne du BTS, la hauteur de l'antenne du TMS et sa fréquence.

La perte de trajet maximum autorisé est utilisée pour calculer le rayon de la cellule en utilisant un modèle de propagation. L'équation pour calculer la distance en kilomètres R est la suivante :

$$R=10^\alpha \tag{III-17}$$

Ou

$$\alpha = \frac{L_{pmax}-A+13.8*2Log(hb)+(ah_m)}{44.9-6.55Log(hb)} \tag{III-18}$$

A : Atténuation dépendant de la valeur de la fréquence.

Cette relation est l'inverse de l'équation donné par le modèle de propagation Okumura-Hata :

$$L_{pmax} = A + 13.8 * Log(hb) - a(Hm) + (44.9 - 6.55Log(H_b))Log(R) \tag{III-19}$$

III.4.1.7 Estimation du nombre de sites

Le calcul de rayon permet d'estimer la surface couverte par chaque site la surface présenté comme suit :

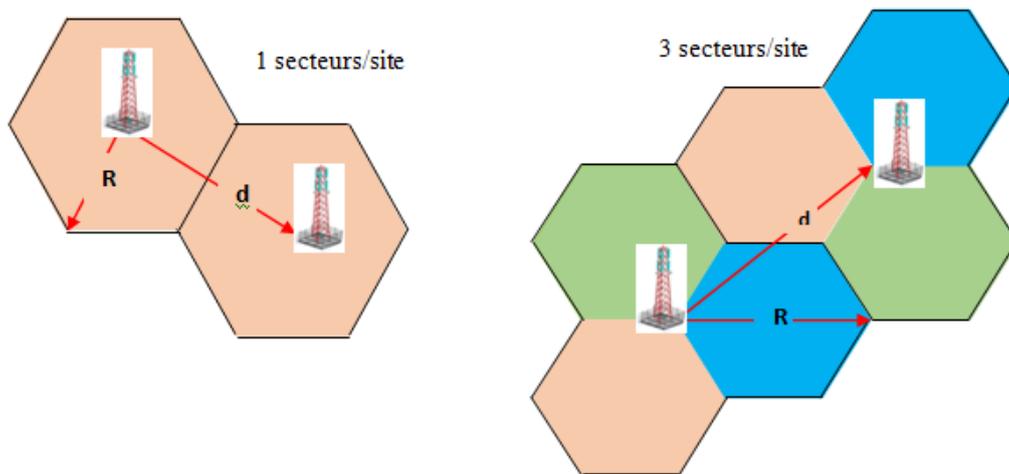


Figure III.9 : Modèle hexagonales de cellule.

R : Le rayon de la cellule.

d : distance intersites

Pour un site omnidirectionnel, le calcul de la distance intersites est comme suit :

$$d = \sqrt{3} R (km) \tag{III-20}$$

$$S_{S1} = \frac{3\sqrt{3}*R^2}{2} = 2.6 * R^2 \tag{III-21}$$

et pour un site a 3 secteurs :

$$d = \frac{3}{2}R \quad (\text{III-22})$$

$$S_{S3} = \frac{9\sqrt{3} * R^2}{8} = 1.95 * 2.6 * R^2 \quad (\text{III-23})$$

Le nombre de site N_S requis pour la couverture est obtenu en divisant la surface totale de la zone à planifier par la surface couverte par un site.

$$N_S = \frac{S_Z}{S_S} \quad (\text{III-24})$$

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 « input » pour garantir un résultat exacte

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.

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.

Pour évaluer les besoins en capacités on doit suivre les tâches suivant :

- Estimer le débit de cellule.
- Analyser les entre de trafic fournies par l'opérateur pour estimer la demande de trafic (nombre d'abonnée, trafic des données, répartition géographique des abonnés dans la zone).

Le principal indicateur de la capacité est la distribution dans la cellule : l'augmentation de nombre d'utilisateurs augmente l'interférence et le bruit et diminue la couverture cellulaire par suit

force le rayon de la cellule à devenir plus petits.

Dans le cas de notre réseau TETRA, qui s'intéresse au Tramway de la ville d'Oran, le dimensionnement par capacité n'est pas pris en considération à cause de la faible capacité de la société à couvrir.

III.5.1 Débit de la cellule

Notre objectif est d'obtenir une estimation du nombre des sites en fonction des besoins en capacité. Et ces dernier sont définis par les opérateurs de réseau en fonction du trafic, on a connue 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 [15].

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 tell qu'il est défini théoriquement par 3 cellules.

III.6 L'outil de dimensionnement du réseau Tetra

Pour répondre à nos besoins on a choisi de travailler avec le langage Matlab qui permet de réaliser des interfaces graphiques qui aide l'opérateur à calculer et vérifier certains paramètres du dimensionnement de réseau pour garantir une meilleure qualité de service aux clients.

III.6.1 Interface d'accueil de notre application

Lorsque l'utilisateur démarre l'application « Dim-Tetra », il se retrouve face à une fenêtre de dimensionnement de réseau TETRA, telle que présente la figure III.10. Cette interface contient :

1. Logo de la faculté de Technologie et l'université de Tlemcen
2. Logo de notre simulateur
3. quelques informations supplémentaires : Les noms des étudiants et l'encadreur, etc.

L'interface contient aussi un bouton nommé «**Start...** » pour le démarrage de notre application proprement dit, tout en appelant une autre interface.

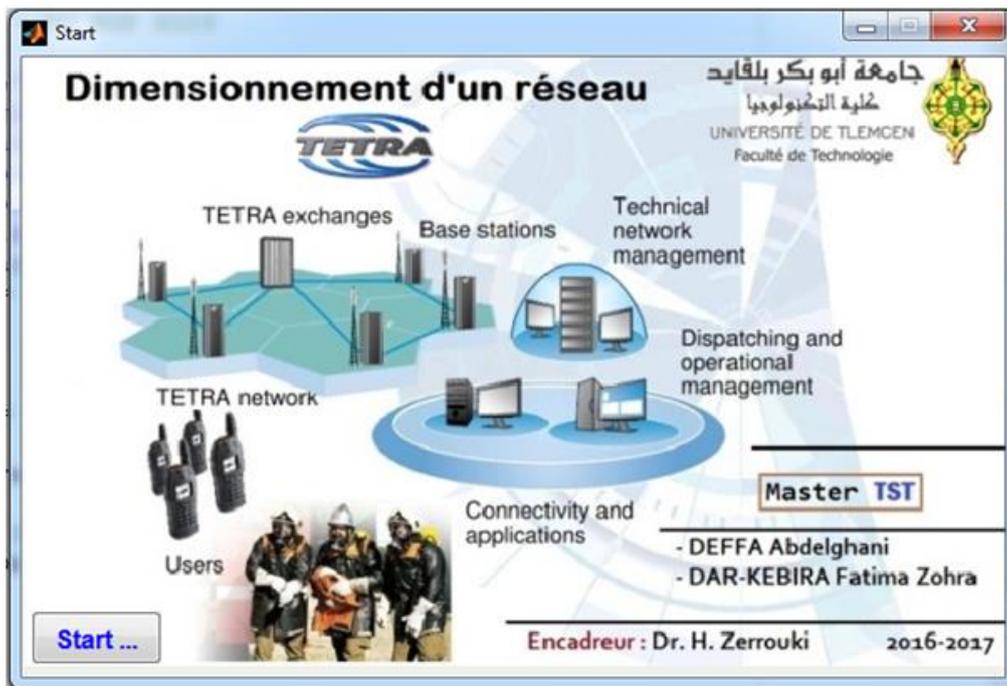


Figure III.10 : Page d'accueil de l'application

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

Dans cette fenêtre on trouve les deux paramètres de modèle de propagation et bilan de liaison en liaison montante « Uplink ».

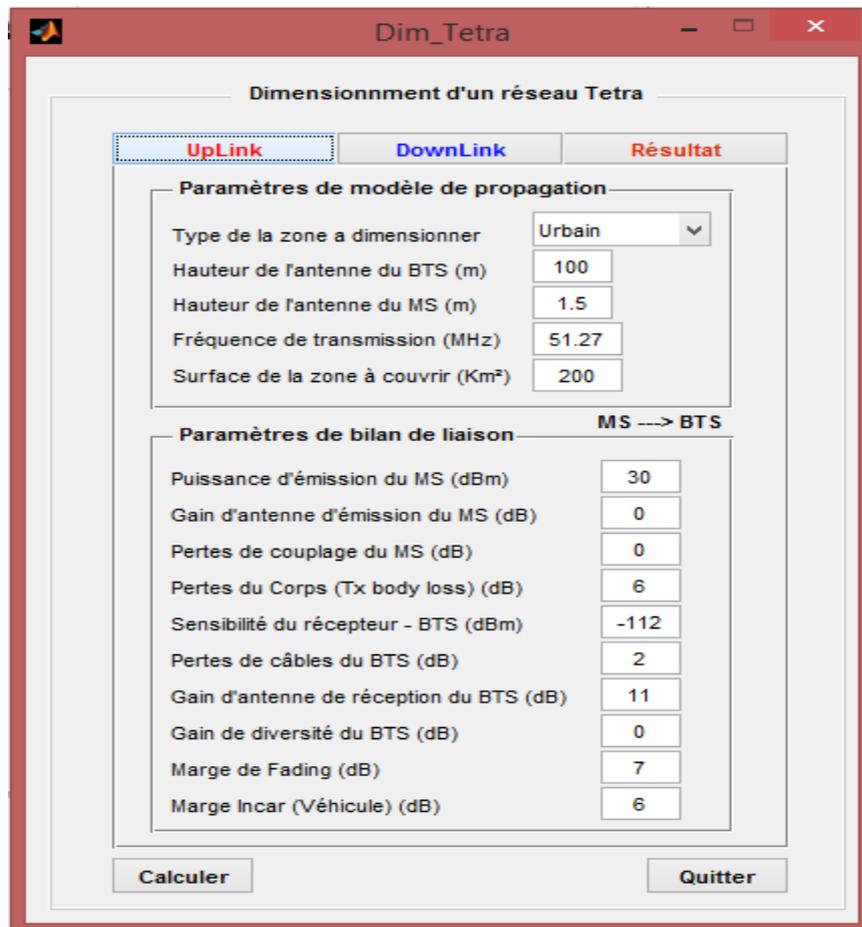


Figure III.11 : Paramètres de modèle de propagation et de bilan de liaison « UpLink ».

Dans les paramètres de modèle de propagation, l'utilisateur doit choisir :

- ✓ Type de la zone à dimensionner (Urbain, Suburbain, Rural-Ouvert, Rural-Quasi-ouvert)
- ✓ Hauteur de l'antenne du BTS (Station de base),
- ✓ Hauteur de l'antenne du MS (Station mobile),
- ✓ Fréquence de transmission,
- ✓ Surface de la zone à couvrir.

Pour les paramètres de bilan de liaison, l'utilisateur doit introduire :

- ✓ 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

III.6.3 Onglet Dimensionnement d'un réseau Tetra « Downlink »

La fenêtre « Downlink » contient les mêmes paramètres précédents mais pour la liaison descendante comme il est illustré par la figure ci-dessous.

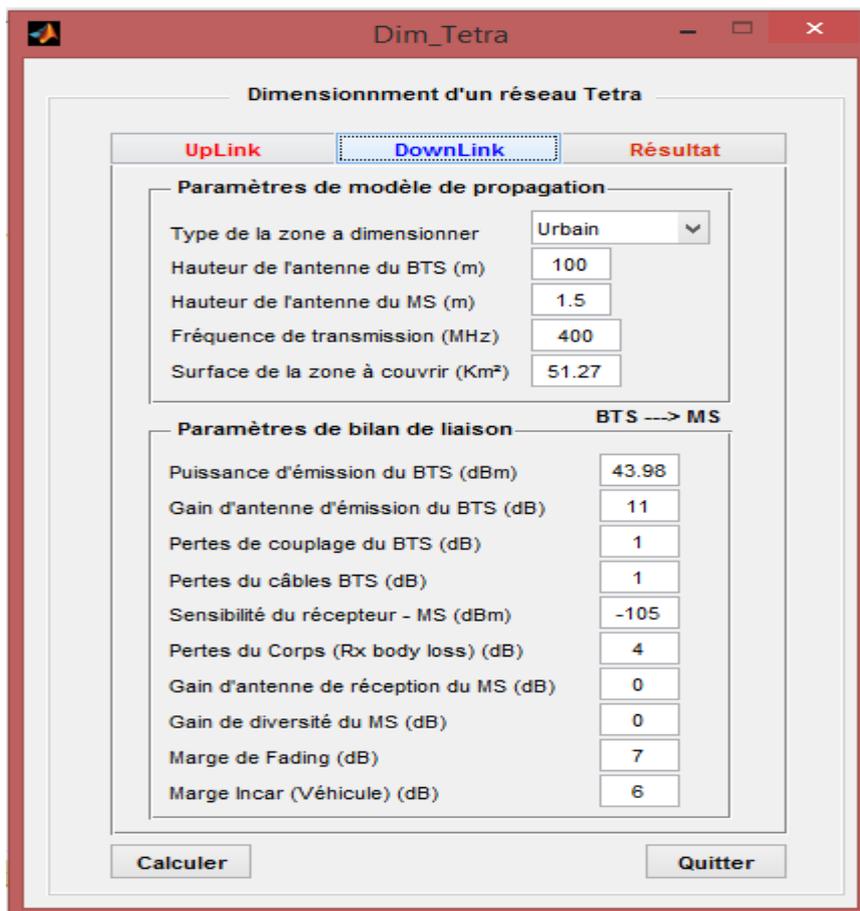


Figure III.12 : Paramètres de modèle de propagation et de bilan de liaison « DownLink ».

III.6.4 Onglet « Résultat » de dimensionnement

Après avoir entré tous les paramètres, il suffit de cliquer sur le bouton calculer pour obtenir le résultat final. Les résultats du dimensionnement de notre réseau TETRA en Uplink et en DownLink sont groupés dans un seul onglet « Résultat » (Figure III.13). Cet onglet est destiné à afficher, pour le sens montant et descendant, les informations suivantes :

- ✓ Puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE)
- ✓ Champs équivalent
- ✓ Affaiblissement de propagation
- ✓ 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

Dimensionnement d'un réseau Tetra		
UpLink	DownLink	Résultat
Résultat de UpLink (UL)		
Puiss. Isotrope Rayon. Equiv. PIRE (dBm)		24
Equivalent champ (dBm)		-108
Affaiblissement de propagation Max (dB)		132
Résultat de DownLink (DL)		
Puiss. Isotrope Rayon. Equiv. PIRE (dBm)		52.98
Equivalent champ (dBm)		-86
Affaiblissement de propagation Max (dB)		138.98
Résultat de dimensionnement		
Affaiblissement le plus contraignant (dB)		132
Rayon maximal des cellules (Km)		9.74
Distance Inter-Sites maximal (Km)		16.87
Surface de couverture du site (Km²)		18.99
Nombre de stations de bases (BTS)		3
Affaiblissement du modèle Hata (dB)		308.29

Figure III.13 : Résultat de dimensionnement en UpLink et en DownLink.

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes attachés à utiliser un modèle empiriques simple qui permette de dimensionné un réseau radio mobile TETRA et fait intervenir les concepts de base et les calculs mathématiques nécessaires au dimensionnement sur le plan Couverture. Nous avons, ainsi, présenté notre application Dim_Tetra, sa structure globale, ses interfaces et ses fonctionnalités. En fait, notre application offre une interface de saisie bien structurée, pour le dimensionnement de couverture en tenant compte des règles de dimensionnement de réseau radio mobile TETRA.

En effet, une bonne connaissance des dimensions du réseau permet aux planificateurs de mieux gérer les ressources, de faciliter l'évolution du réseau en intégrant des technologies plus performantes, qui leur permettent de fournir en même temps des services de bonne qualité. Le chapitre suivant focalise sur une étude pratique de la planification et d'optimisation du réseau TETRA dans la Wilaya d'Oran on se focalise sur le réseau de Tramway.

Chapitre IV

Déploiement d'un réseau TETRA

IV.1 Introduction

Dans ce dernier chapitre, nous vous exposons 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 le Tramway de la ville d'Oran, tout en basant sur les résultats de calcul obtenus par notre outil de dimensionnement développé dans le chapitre précédant.

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 (du design à l'expansion et l'optimisation) pour garantir une meilleure qualité de service aux clients en termes de capacité et de couverture.

IV.2 Présentation des outils

Ce paragraphe décrit d'une façon générale les logiciels indispensables pour réaliser le travail demandé.

IV.2.1 présentation du Atoll

Atoll est un progiciel flexible et évolutif qui permet l'accompagnement du besoin d'un opérateur pendant tout le cycle de vie de l'ingénierie, il incorpore un moteur de propagation haute performance supportant les réseaux hiérarchiques, la modélisation du trafic multiservice ainsi que le plan de fréquence automatique, il permet de gérer la majorité des systèmes cellulaires : GSM/GPRS/EDGE, TDMA, UMTS/HSDPA CDMA/CDMA2000, WIMAX, WiFi et le LTE/LTE-A. Enfin après avoir déployé un réseau, Atoll permet de réaliser de multiples prédictions comme [20] :

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

IV.2.1.1 Les étapes à suivre

Les étapes de configuration d'Atoll sont :

- Création d'un projet GSM.
- Importer la carte de Oran-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.2.1.2 Interface de logiciel

L'interface principale du logiciel Atoll est représentée sur la figure suivante :

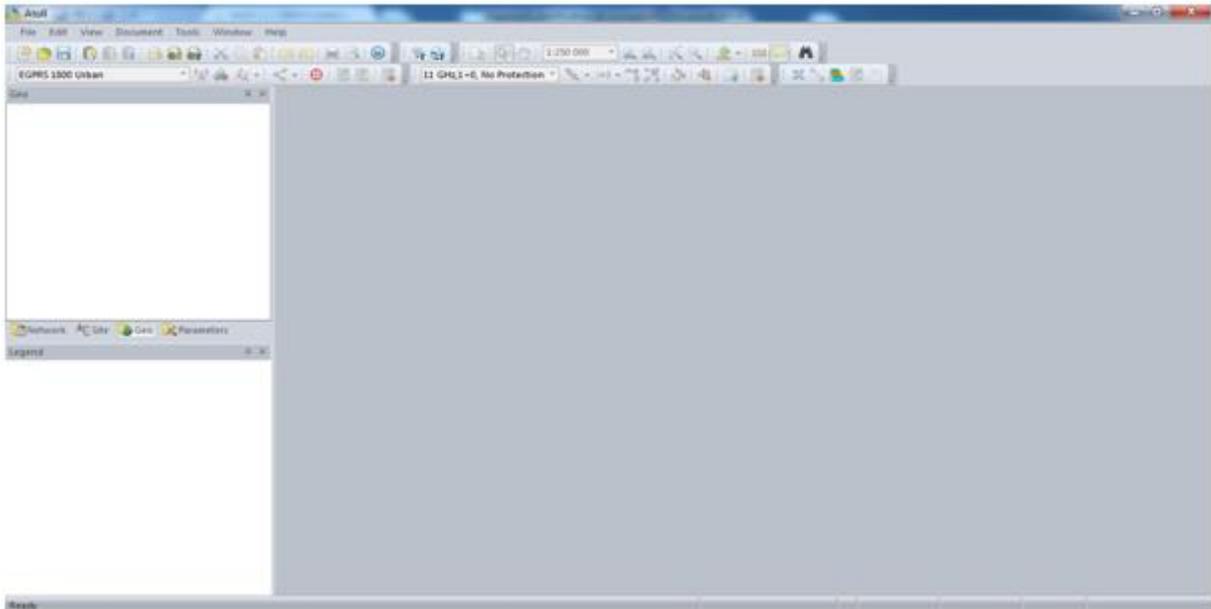


Figure IV.1 : La page principale d'Atoll.

Pour commencer la planification sous l'outil Atoll, il faut tout d'abord créer un nouveau projet. La figure suivante montre comment créer un nouveau projet à partir d'un document Template.

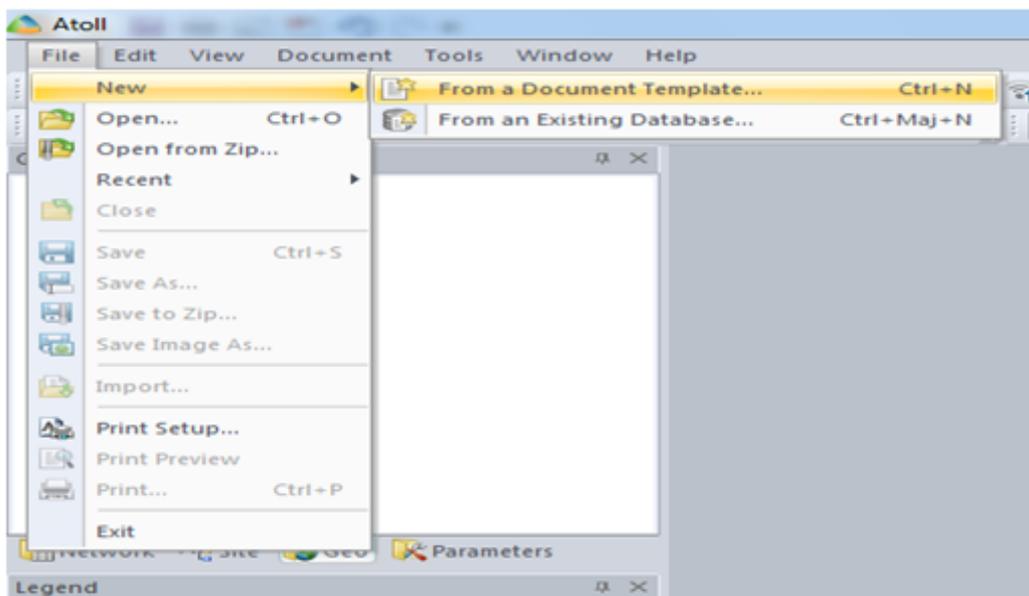


Figure IV.2 : Création d'un nouveau projet.

IV.2.1.3 Système 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.

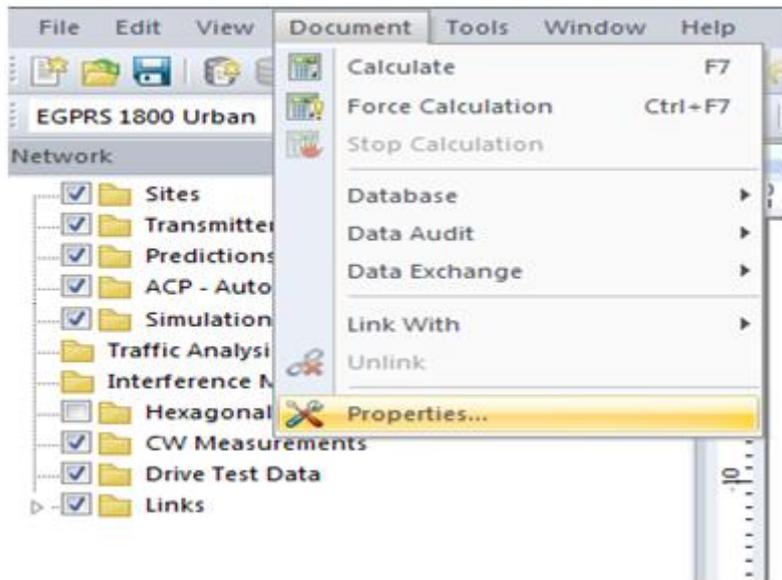


Figure IV.3 : Choix du système de technologie

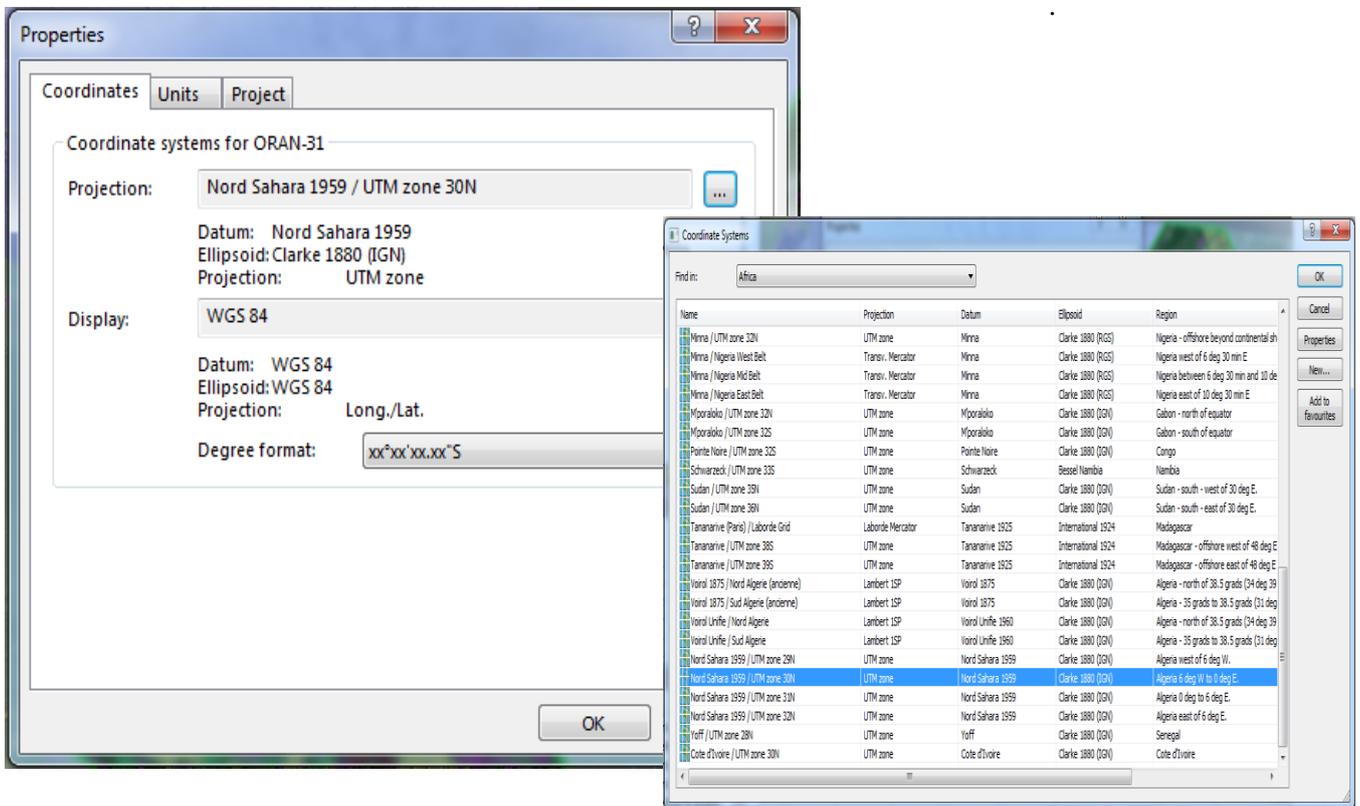


Figure IV.4 : Liste des systèmes de coordonnées

IV.2.1.4 Importer la Map numériques

Le profil de Map du trafic basé sur l'environnement utilisateur ne doit être utilisé 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 Map numérique sur laquelle on va planifier la zone désirée.

Tous d'abords, nous allons importer la carte de ville d'Oran (Carte avec Clutter Classes, Clutter Height, Vector, Ortho) comme montre la figure IV.5.

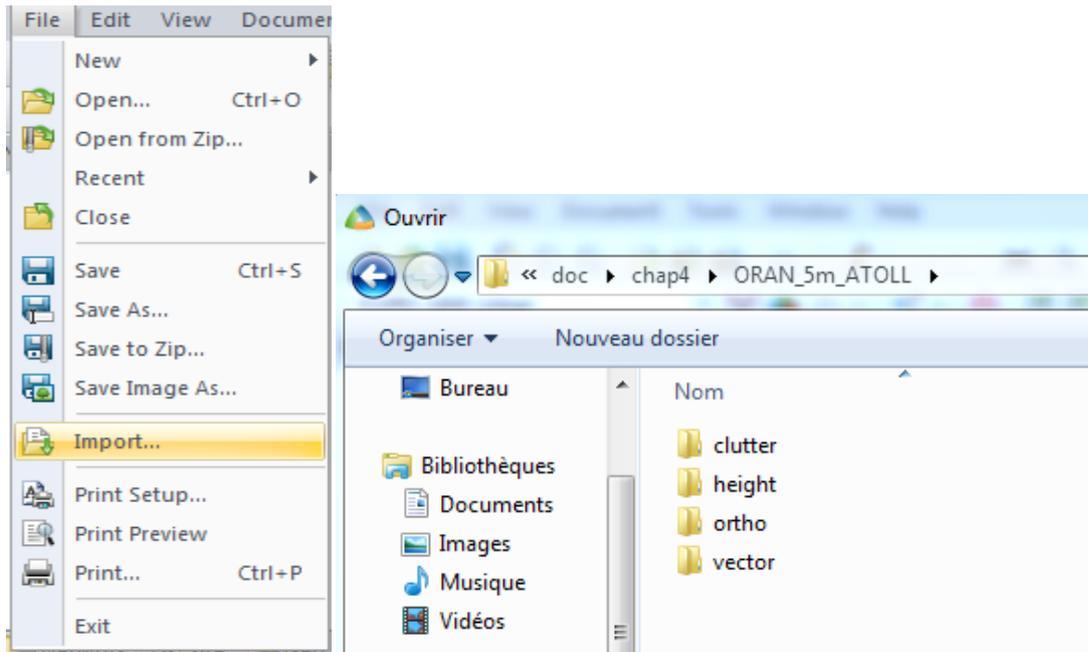


Figure IV.5 : *Importation de la carte numérique.*

IV.2.1.5 Zone géographique à planifier

La zone géographique couvre une partie de la ville d'Oran. La ville se situe à l'Ouest de l'Algérie. Est 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. Pour préciser la zone géographique et l'environnement sur lesquels nous allons travailler (Figure IV.6), 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. (Figure IV.7).

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 tracé les déférant chemin (les route principal et secondaire, les rue, les aéroports, l'autoroute, chemin de fer).

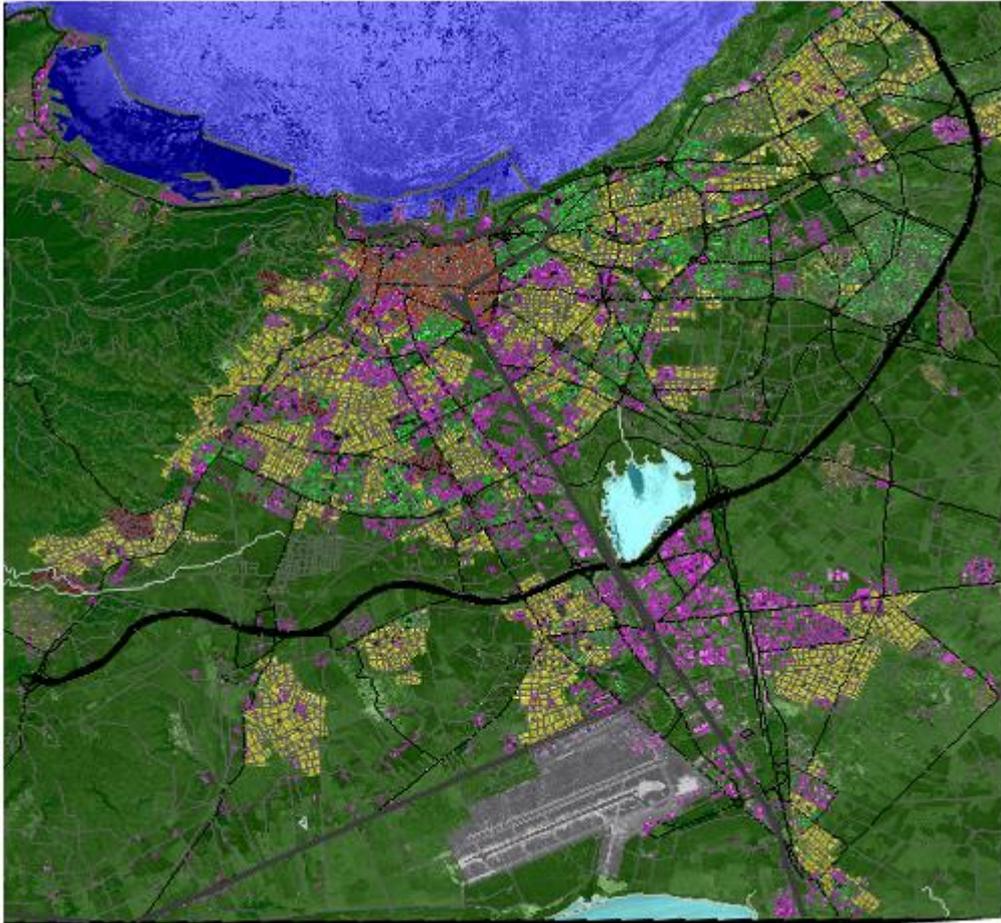


Figure IV.6 : Map finale de la ville d'Oran.

Clutter Classes Properties		
General	Description	Display
Display type:		Field:
Discrete values		Code
1	1 - OPEN	
2	2 - SEA	
3	3 - INLAND WATER	
4	4 - MEAN INDIVIDUAL	
5	5 - MEAN COLLECTIVE	
6	6 - DENSE COLLECTIVE	
7	7 - SKYCRAPERS	
8	8 - VILLAGE	
9	9 - INDUSTRIAL	
10	10 - OPEN IN URBAN	
11	11 - FOREST	
12	12 - PARK	
13	13 - DENSE INDIVIDUAL	
14	14 - GROUP OF SKYCRAPERS	
15	16 - SCATTERED URBAN	
16	20 - AIRPORT	

Figure IV.7 : Légende de la surface selon leurs caractéristiques.

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.

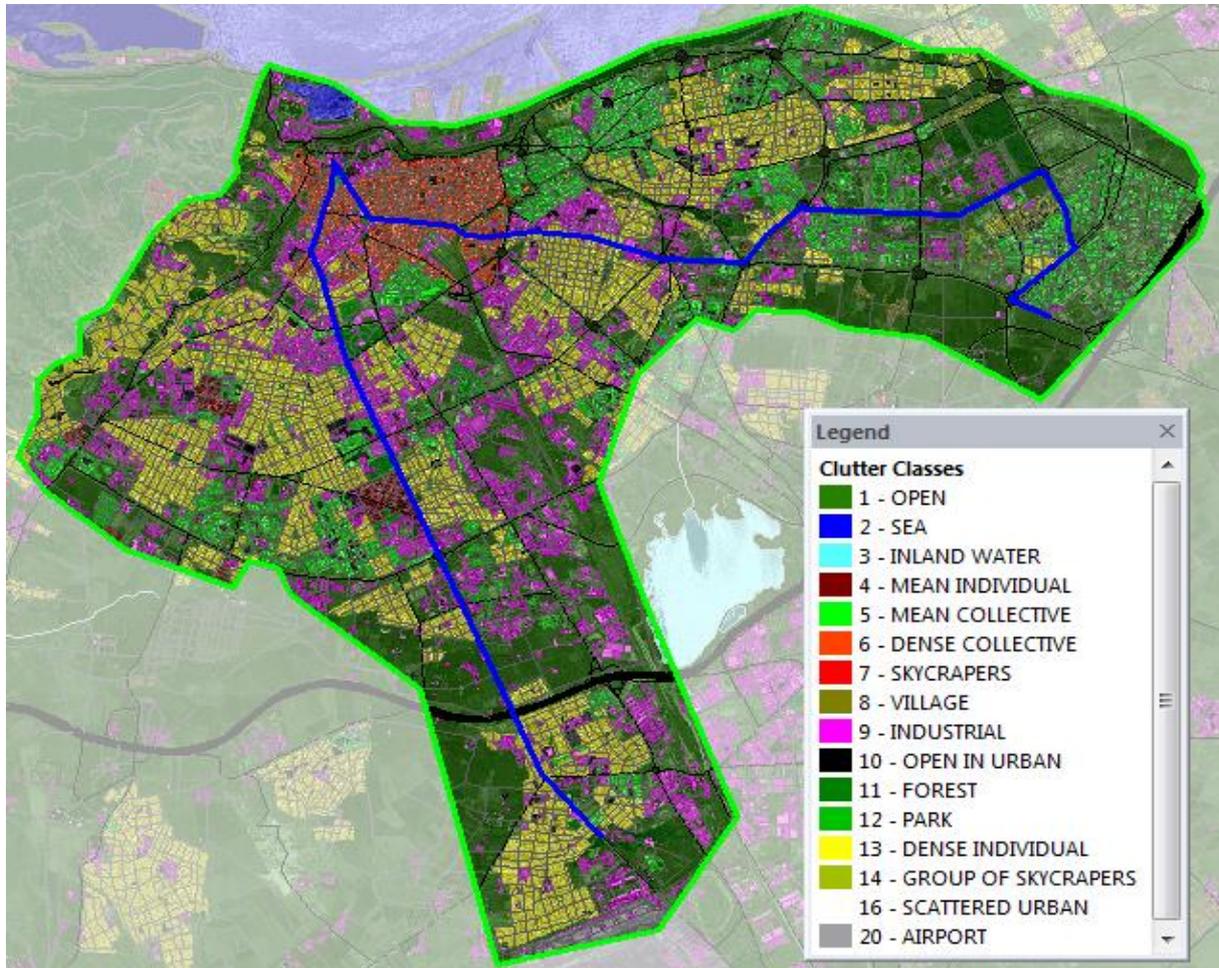


Figure VI.8 : Focus de la zone à planifier.

Focus zone (en vert): c'est la zone exacte à planifier, dans laquelle ATOLL génère ses rapport et statistiques. La figure précédente présente un aperçu de la zone à planifier, qui couvre un peu plus que 51.27 Km². Cette zone se caractérisé par une forte densité de population. Chaque couleur désigne la densité de la zone.

Nous pouvons remarquer sur la figure IV.8, la carte de Tramway d'Oran (ligne bleu en gras). Le Tramway d'Oran est un des systèmes de transport en commun desservant l'agglomération d'Oran, deuxième ville d'Algérie. Un premier tronçon de 18,7 km et 32 stations, reliant Sidi Maârouf à Es-Senia, est en service depuis le 2 mai 2013. Cette ligne dessert notamment : Sidi Maârouf, Haï Sabah, le campus de l'Université des sciences et de la technologie (USTO), le carrefour des 3 Cliniques, le palais de justice, Dar El Beïda, le quartier plateau Saint-Michel, le centre-ville d'Oran (place du 1er novembre), M'dina El Djadida, Boulanger et Es Senia.

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.

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

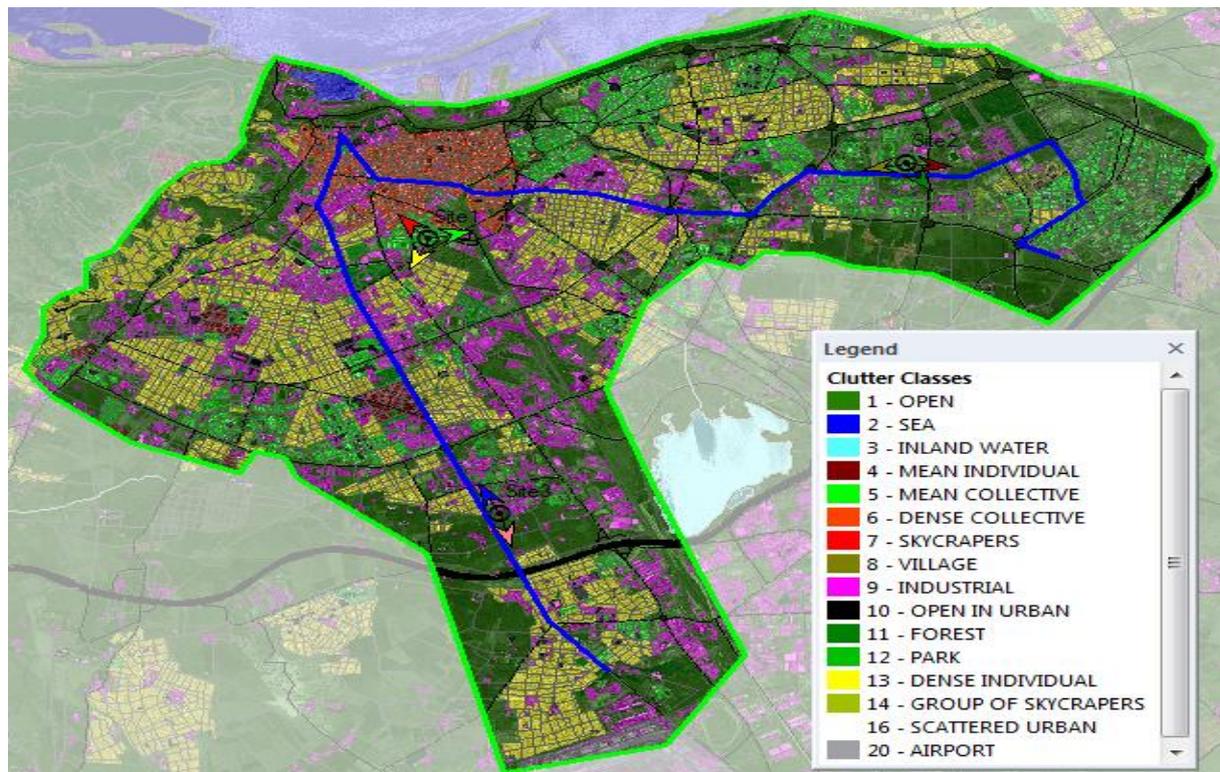


Figure IV.9 : Emplacement des sites TETRA sur la Map.

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.

IV.3.1.1 Tronçon entre Site 1 et Site 2

La distance qui sépare ces deux sites est à peu près égale à 4.82 Km. Le site 2 se trouve à une altitude élevée par rapport le premier site (site 1) est respecté les prédictions du bilan de liaison. Il existe aucun obstacle entre les deux sites (Figure IV.10).

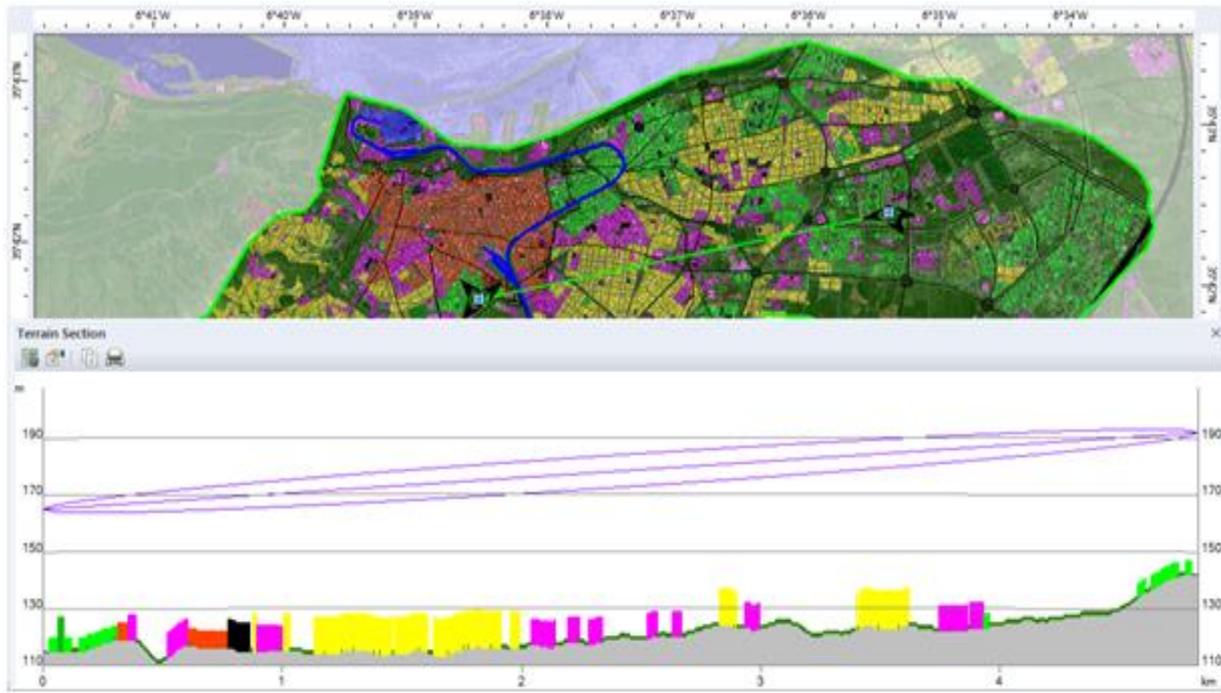


Figure IV.10: Test de la liaison site 1 – site 2.

IV.3.1.2 Tronçon entre Site 2 et Site 3

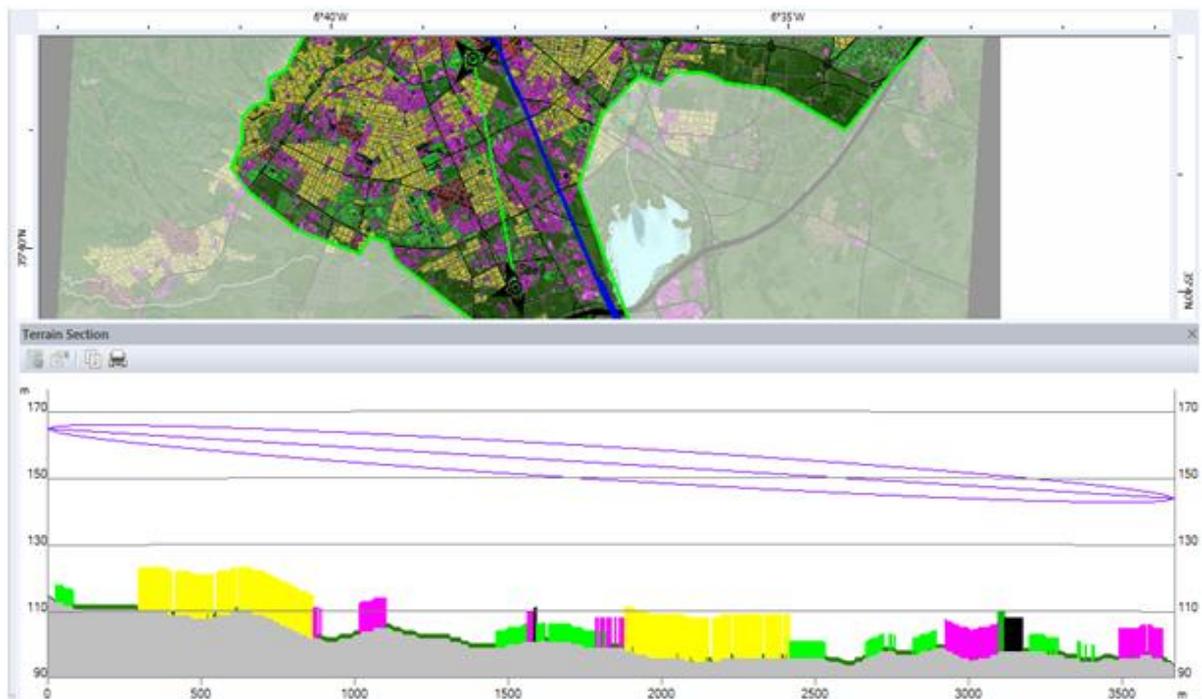


Figure IV.11 : Test de la liaison site 2 – site 3.

La distance qui sépare ces deux sites (site 2 et site 3) est à peu près égale à 3.67 Km qui respecte les prédictions du bilan de liaison.

IV.3.1.3 Tronçon entre Site 1 et Site 3

Comme il montre sur la figure suivant. La distance qui sépare ces deux sites est à peu près égale à 6.10 Km. Le site 2 se trouve une altitude élevée par rapport le troisième site mais il respecte les prédictions du bilan de liaison. Il n'existe aucun obstacle entre les deux sites.

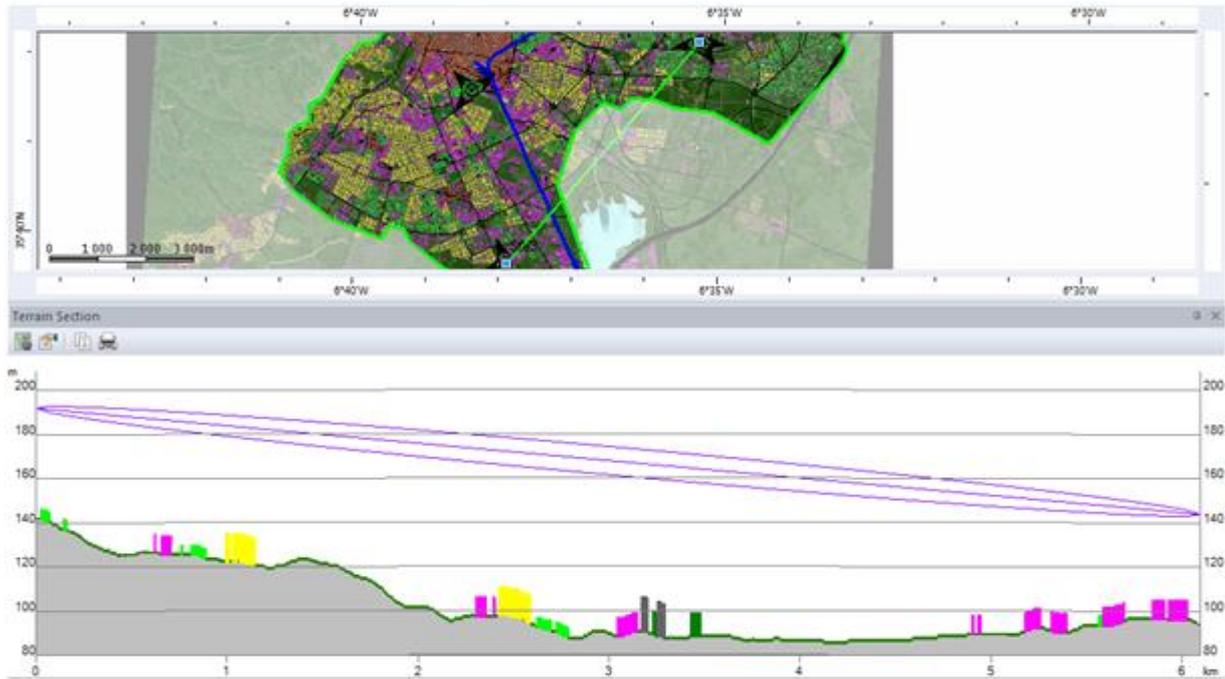


Figure IV.12 : Test de la liaison site 1 – site 3.

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.13 représente le menu de choix de type de prédictions standards existants dans Atoll.

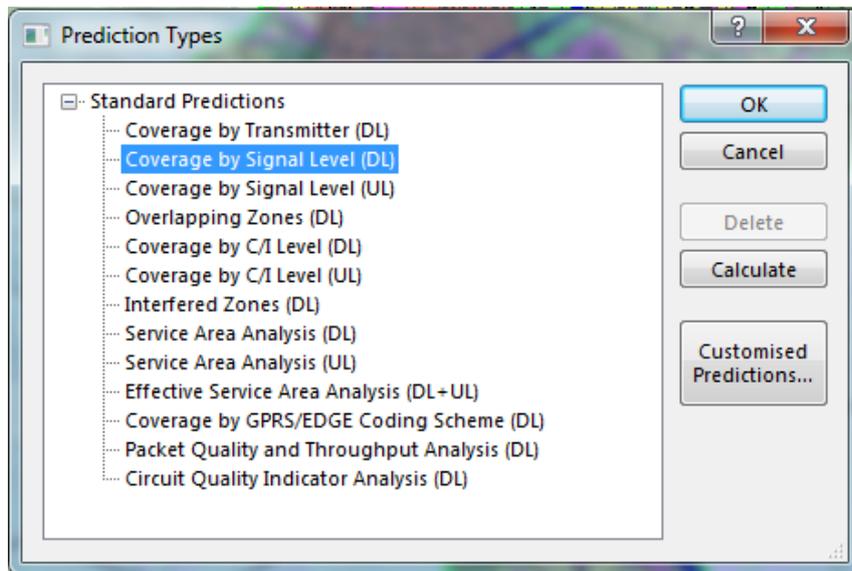


Figure IV.13 : Choix de type de prédiction

IV.4.1 Prédications 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.

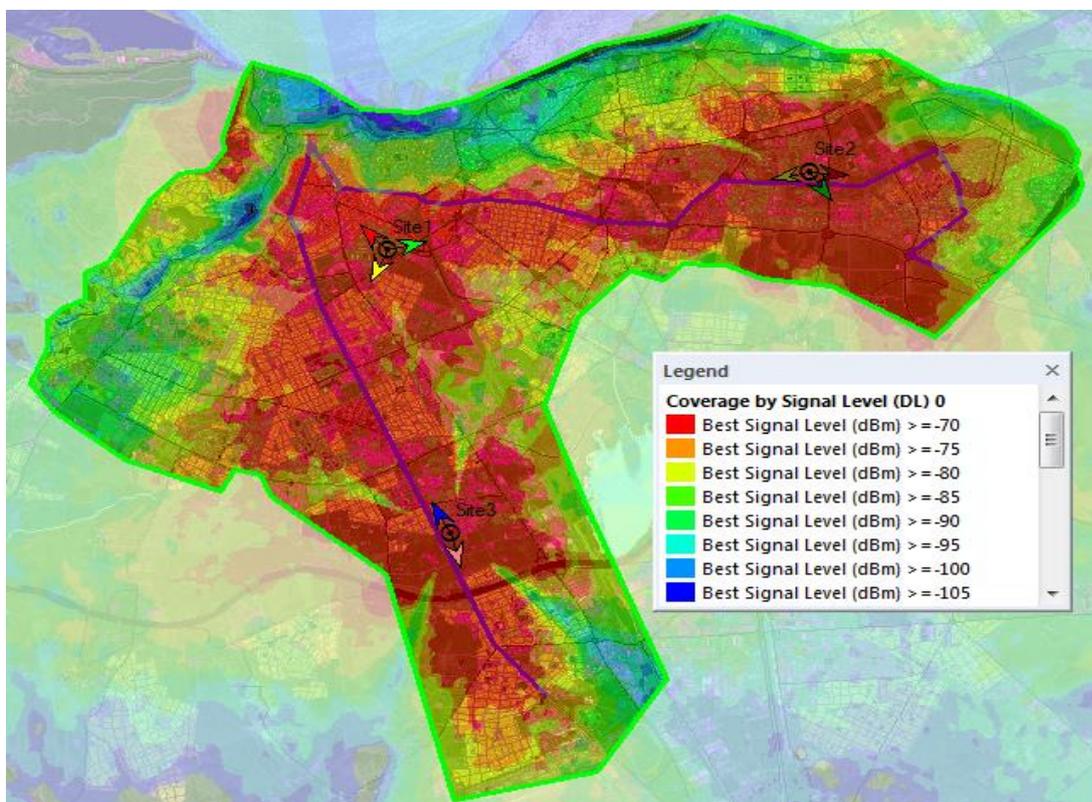


Figure IV.14 : Prédiction de la couverture par niveau du signal en DL.

La figure IV.14 représente le résultat de prédictions de la couverture par niveau de signal pour la liaison descendante (DownLink). D'après cette figure, nous remarquons que la zone est bien couverte mais avec des dégradations de couleur qui représentent différents niveaux de 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 du tramway est bien couverte.

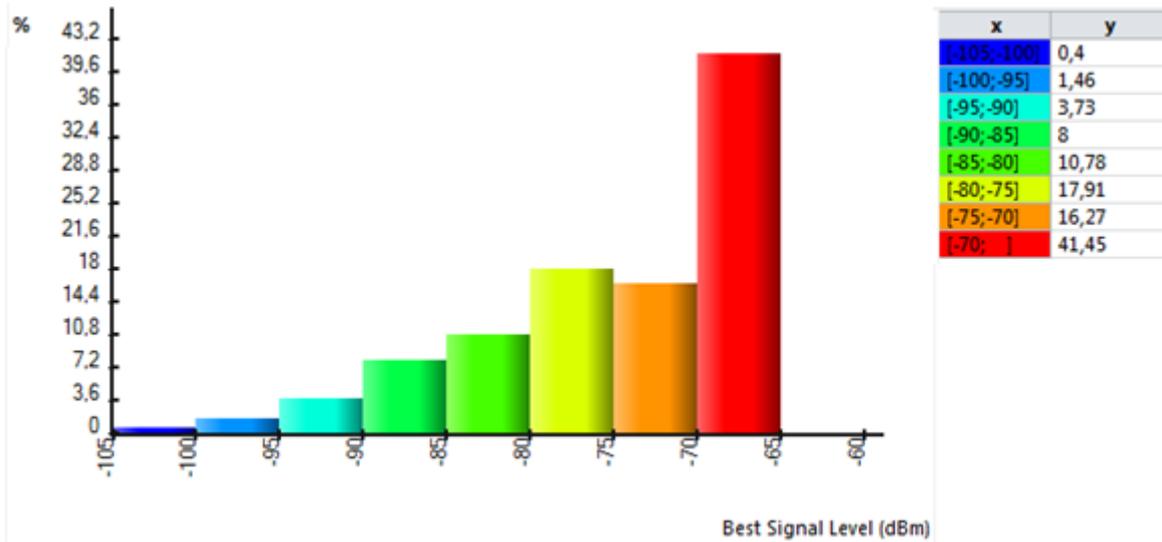


Figure IV.15 : Statistiques des mesures de niveaux du signal DL.

Nous remarquons que notre réseau TETRA offre un pourcentage très important (autour de 41,45 %) représentant les excellents niveaux de champ (supérieur à -70 dBm) et un faible pourcentage (inférieur à 3,73+1,46+0,4=5,59 %) représentant le faible niveau de champ (inférieur à -90 dBm).

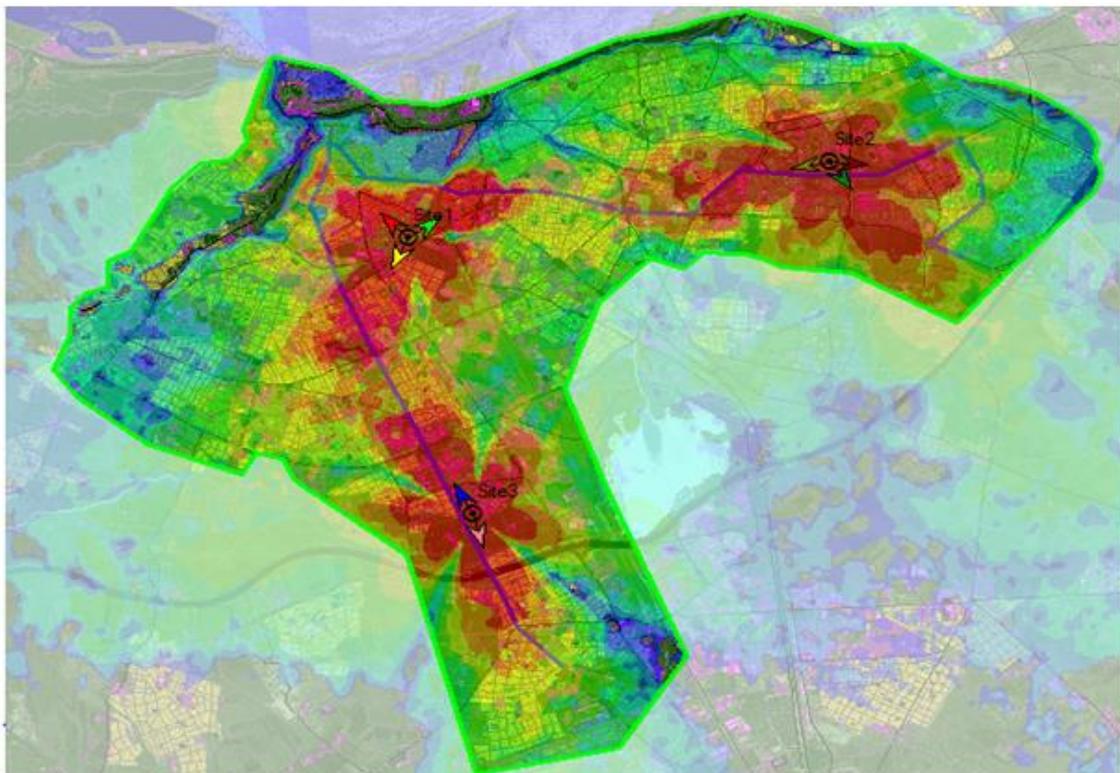


Figure IV.16 : Prédiction de la couverture par niveau du signal UP.

La figure IV.16 représente le résultat de prédictions de la couverture par niveau de signal pour la liaison montante (UpLink). D'après cette figure, nous remarquons que la zone est bien couverte mais avec des dégradations de couleur qui représentent différents niveaux de signal.

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.17).

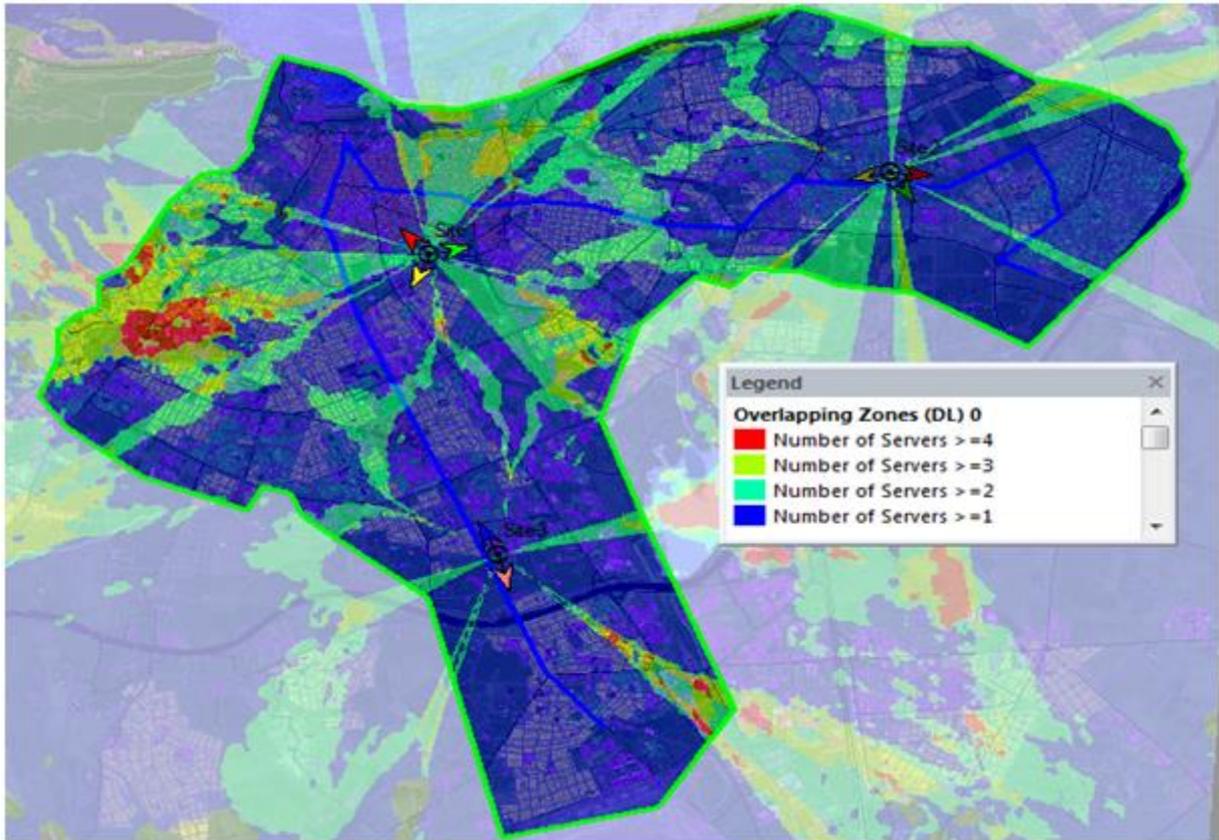


Figure IV.17 : Prédiction par les zones de recouvrement entre les cellules TETRA.

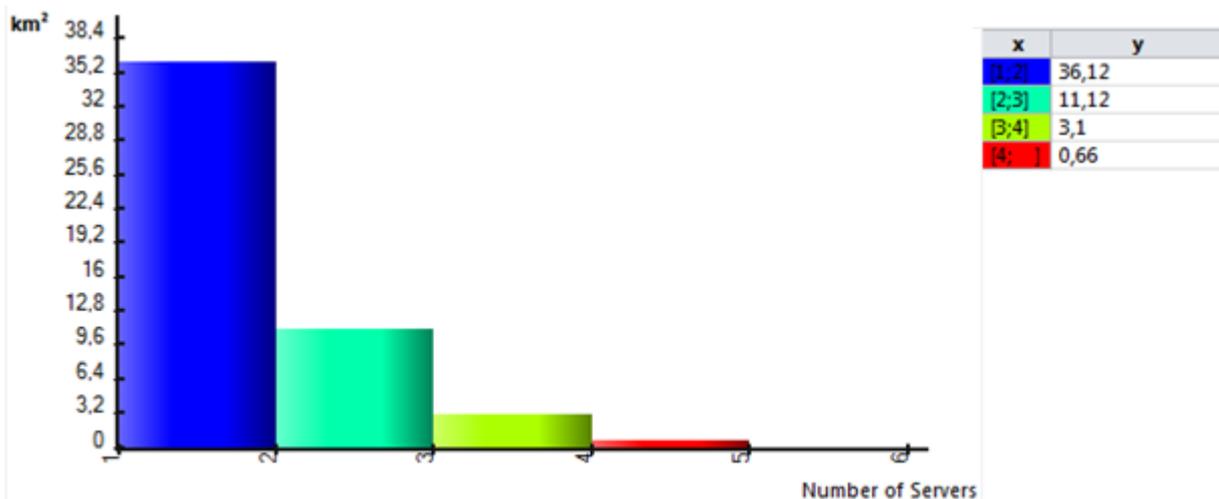


Figure IV.18 : Statistiques des zones de recouvrement entre les cellules TETRA.

Selon les statistiques de la figure IV.18, le résultat obtenu après le calcul qui est fait par ce type de prédiction montre une surface très importante de 36,12 Km² sans aucune interférence entre cellules et des zones de recouvrement entre des secteurs de surface très faible utilisant le même canal TETRA.

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 Tramway de la ville d'Oran.

Cette étude pratique a été réalisée en première étape 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 du notre réseau TETRA.

Le déploiement du réseau TETRA est effectué selon un processus bien précis, 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 terrain.

Conclusion générale

Dès l'approche de la fin de l'année 1995, la norme TETRA a été développée en tant que solution destinée à des applications de caractère vital dans les quelles des communications voix et données clair et fiable sont nécessaires quand il en va de la vie humaine. Il réunit plusieurs concepts et technologies de mise en réseau bien connu à fin de mettre en œuvre une approche révolutionnaire en matière de communication de caractère vital sur la base de la norme TETRA.

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 l'évolution des réseaux radiocommunications et la technologie 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 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, un paragraphe dans cette partie a été réservé pour le principe et les détails du bilan de liaison, 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 basé sur la norme TETRA.

Au niveau du dernier chapitre, nous avons présenté les différentes étapes du processus de la planification et d'optimisation radio du réseau TETRA. Cette partie pratique nous a permis de mettre en évidence les règles d'ingénieries citées au niveau des chapitres précédents.

Ce projet de fin d'étude nous a permis de découvrir un nouvel aspect professionnel, et métrisé des nouvelles outils, celui de dimensionnement, la planification et l'optimisation radio, c'était une expérience très intéressante ou on a acquérir un ensemble de connaissances sur l'architecture implémentée au niveau de Tramway d'Oran.

Bibliographie

- [1]. L.A. Steffeneel, « Les Réseaux GSM et les différents générations », Cours en ligne, Master 2 Professionnel STIC-Informatique, Université de REIMS, <http://cosy.univ-reims.fr/~lsteffeneel/cours/Master2/0708-RMHD/RezoMob-Cours6-Cellulaires-GSM.pdf>.
- [2]. Ajgou. R et Abdesselam. S, « Réseau UMTS », Cours en line, Université Med khider Biskra. elearning.univ-eloued.dz/courses/AJ01/document/Cours/Chap4ReseauUMTS.pdf
- [3]. Tonye. E et Ewoussaoua. L, « Planification et ingénierie des réseaux de Télécoms », Mémoire pro 2 de télécommunication, Université de Yaoundé I, 2011.
- [4]. David Tipper, « UMTS overview », Graduate Telecommunications and Networking Program, University of Pittsburgh, www.pitt.edu/~dtipper/2720/2720_Slides12.pdf.
- [5]. http://www.3gpp.org/tsg_ran/wg1_rll/TSGR1_68/Docs/R1-120403.htm, Date de consultation : Février 2017.
- [6]. Michèle Germain, « Les réseaux PMR », Un livre blanc de Forum ATENA, 2014.
- [7]. M. 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.
- [8]. Rohde & Schwarz, « TETRA – la norme numérique pour les radiocommunications mobiles professionnelles », Magazine entreprises de Hub télécom, No 178 (II), 2003.
- [9]. http://www.etsi.org/deliver/etsi_etr/300_399/30001/01_60/etr_30001e01p/la-norme-tetra.htm, Date de consultation : Février 2017.
- [10]. Jochen H. Schiller, « Mobile Communications Wireless Telecommunication Systems », Cours en ligne, Université libre de Berlin, 2016.
- [11]. Mahinth Christensen, « TETRA mobile communication », Slides of Executive - Marketing at Ripples Learning innovative, Published on Jun 14, 2009
- [12]. Damm TetraFlex Dispatcher : http://www.damm.dk/umb.Rimmer.Proxy.ashx?file=/media/pdf/1958903/product_flyer_tetraflex_dispatcher_2017.04.19_ver.1.5_1.01.pdf.

- [13]. P. Minot, « *TETRA Theoretical training : version 8.0* », Tetraform, ETELM theoretical TETRA training, <https://fr.scribd.com/document/258343389/Tetraform-8-Anglais>
- [14]. John Dunlop, Demessie Girma, James Irvine, « *Digital Mobile Communications and the TETRA System* », Edition Wiley-Blackwell, ISBN-13: 978-0471987925, Août 1999.
- [15]. ETSI TS 100 392-2, « *Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Voice plus Data (V+D)* », Part 2: Air Inter- face (AI). 2013
- [16]. Rap. UIT-R M.2014, « *Systèmes mobiles terrestres numériques à haute efficacité spectrale pour trafic de dispatching* », Rapport UIT-R M.2014. https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2014-1998-PDF-F.pdf, Année 1998.
- [17]. Aoun Anissa, « *Optimisation d'un réseau UMTS* », Mémoire de fin d'études pour l'obtention d'un diplôme de Master en Télécommunications, Université Abou Bakr Belkaid -Tlemcen, Mai 2015.
- [18]. Jammazi Eya, « *Optimisation d'un réseau pilot 4G pour Tunisie Télécom* », Mémoire de fin d'études, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Gabès, Tunisie, 2013.
- [19]. Hamlili Hayem, « *Conception et développement d'un outil d'aide à la planification et dimensionnement de l'E-UTRAN d'un réseau LTE-Advanced* ». Mémoire de fin d'études pour l'obtention d'un diplôme de Master en Télécommunications (RMST), Université Abou Bakr Belkaid -Tlemcen, Mai 2016.
- [20]. Forsk, « *Atoll : Radio Planning and Optimisation Software* », <http://www.forsk.com/>

Résumé :

La norme Radio TETRA (TErrestrial Trunked RADIO), est une norme Européenne de l'ETSI. Les réseaux privés radio TETRA se différencient des systèmes publics de téléphonie mobile, tels que le GSM ou l'UMTS, par la rapidité d'établissement des communications, les appels prioritaires et de groupe. Les entreprises intervenant sur des sites étendus ou mobiles se retrouvent fréquemment confrontés à des problèmes de communications internes. Pour palier à cela, et plutôt que d'utiliser des liaisons GSM coûteuses, on met en place des réseaux radios privés. Les réseaux TETRA se positionnent comme une solution idéale à cette problématique.

Le présent projet de fin d'étude s'inscrit dans le cadre de l'étude, la planification et la conception d'un réseau radiomobile professionnel (PMR) basé sur la technologie TETRA. Le travail consiste à détailler une étude théorique approfondie sur la norme TETRA, l'exploitation de l'outil de simulation et l'optimisation "Atoll" pour mener à bien cette phase qui a consisté à planifier et dimensionner le réseau TETRA en termes du nombre de stations de bases à implémentées, les puissances mises en jeu et les antennes utilisées ... etc.

Mots clés : Norme TETRA, système PMR, Atoll, Calibration, dimensionnement, modèle de propagation, planification, capacité.