



Université de Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd
Faculté de Technologie
Département d'Electronique



Thèse

Préparée au sein du Laboratoire d'Automatique Avancée et d'analyse des systèmes

Présentée pour l'obtention du titre de :
Docteur en Sciences en Electronique
Option : Communication

Sous le Thème :

**Contribution à l'étude des performances des systèmes
radio mobiles**

Présentée par :

SAIDI Riad

Devant le jury composé de :

M. BENYOUCEF Moussa	Prof.	Université de Batna 2	Président
M. SAIDI Lamir	Prof.	Université de Batna 2	Rapporteur
M. ZIAR Toufik	MCA	Université de Tébessa	Examineur
M. BENAKCHA Abdelhamid	Prof.	Université de Biskra	Examineur

Juillet 2018

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicaces

Je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers, mes défunt parents, ma femme, mes enfants, mes frères, mes sœurs, et tous mes amis.

Remerciement

Ce travail a été effectué au sein de laboratoire LAAAS à l'université Mostapha BEN BOULAIID Batna2, sous la direction de Monsieur le Professeur Lamir SAIDI responsable du dit laboratoire.

Je tiens en préambule à remercier mon directeur de thèse Monsieur le Professeur Lamir SAIDI non seulement pour m'avoir soutenu, aidé et dirigé tout au long de ce travail, mais encore pour m'avoir prodigué des conseils avisés et avoir su me guider. Qu'il trouve ici l'expression sincère de ma profonde gratitude.

Je remercie également Monsieur le Professeur BENYOUCEF Moussa pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse.

Je tiens en outre à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur le Professeur BENAKCHA Abdelhamid, Professeur à l'université Mohamed KHIDER de Biskra et Monsieur ZIAR Toufik, Maître de Conférences à l'université Larbi Tébessi de Tébessa d'avoir accepté d'expertiser mon travail.

J'adresse un grand merci amical à tous mes collègues et particulièrement à l'équipe du laboratoire LAAAS Batna2 et du laboratoire LABGET Tébessa pour m'avoir encouragé.

Je remercie également tous les enseignants de l'université de Batna2 et ceux de l'université de Biskra qui ont activement contribué le long de ma formation.

Sans oublier les membres du département de génie électrique de l'université Larbi Tébessi-Tébessa en particulier le chef du département et son adjoint, pour leur soutien.

Abstract

Propagation models are essential tools for the study of propagation characteristics such as the estimation of the power of the signal received by a mobile terminal and the evaluation of the rays of covers. These parameters make it possible to deduce the number of cells needed to cover a given area. This procedure is a major step in mobile radio engineering, including radio planning, which in turn is the step towards estimating the necessary equipment and configurations of the radio interface. This dimensioning makes it possible to reach the performances expected by a mobile radio system.

In this thesis, we have taken into account the standard K factor model and the Okumura-Hata model to bring out a propagation model adapted to the physical environment of the city of Annaba in Algeria. The model developed uses a linear regression algorithm based on the ordinary least squares method. The radio measurements were made on the GSM network with TDMA access mode by the Mobilis operator. The calculation of the square root of the mean squared error between the real data resulting from the radio measurements and the prediction data resulting from the model put in place allow the validation of the results obtained. A comparative study made between the value of the RMSE obtained by the new model and those obtained by Okumura-Hata and K factor standard models allows us to conclude that the model developed is better adapted to the local environment of the city. Annaba than that of Okumura-Hata. The new model obtained can help increase the performance of the mobile radio system deployed in this city.

Keywords: K model factor, Okumura-Hata model, propagation model, radio measurements, linear regression, square root of the mean squared error.

Résumé

Les modèles de propagation sont des outils essentiels pour l'étude des caractéristiques de propagation telles que l'estimation de la puissance du signal reçu par un terminal mobile et l'évaluation des rayons de couvertures. Ces paramètres permettent d'en déduire le nombre de cellules nécessaires pour couvrir une zone donnée. Cette procédure est une étape principale en ingénierie radio mobile notamment la planification radio qui constitue à son tour l'étape qui vise à estimer les équipements et les configurations nécessaires de l'interface radio. Ce dimensionnement permet d'atteindre les performances attendues par un système radio mobile.

Dans cette thèse nous avons pris en compte le modèle standard K facteur et le modèle Okumura-Hata pour faire ressortir un modèle de propagation adapté au milieu physique de la ville d'Annaba. Le modèle développé utilise un algorithme de régression linéaire s'appuyant sur la méthode des moindres carrés ordinaires. Les mesures radio ont été faites sur le réseau GSM avec mode accès TDMA de l'opérateur Mobilis. Le calcul de la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne entre les données réelles issues des mesures radio et les données de prédiction issues du modèle mis en place permettent la validation des résultats obtenus. Une étude comparative faite entre la valeur du RMSE obtenue par le nouveau modèle et celles obtenues par les modèles standards d'Okumura-Hata et K facteur nous permet de conclure que le modèle élaboré est mieux adapté à l'environnement local de la ville d'Annaba que celui d'Okumura-Hata. Le nouveau modèle obtenu peut contribuer à augmenter les performances du système radio mobile déployé dans cette ville.

Mots clés: Modèle K facteur, Modèle Okumura-Hata, modèle de propagation, mesures radio, régression linéaire, racine carrée de l'erreur quadratique moyenne.

ملخص

وتعتبر نماذج الانتشار أدوات أساسية لدراسة خصائص الانتشار مثل تقييم قدرة الإشارة التي تستقبلها محطة متنقلة, وتقييم أشعة الأغوية واستنتاج عدد الخلايا اللازمة لتغطية منطقة معينة, وهو خطوة رئيسية في الهندسة الراديوية المتنقلة مثل التخطيط الراديو الذي هو بدوره خطوة لتقدير المعدات اللازمة وتكوينات السطح البيني الراديو التي تهدف إلى تحقيق الأداء المتوقع من قبل نظام الراديو المحمول.

في هذه الأطروحة، أخذنا في الاعتبار نموذج K عامل النموذجي ونموذج Okumura-Hata لإبراز نموذج انتشار يتلاءم مع البيئة المادية لمدينة عنابة في الجزائر. استخدام خوارزمية الانحدار الخطي استنادا إلى طريقة المربعات الصغرى العادية.

وأجريت قياسات الراديو على شبكة GSM مع أسلوب النفاذ TDMA من قبل ألتعامل للهاتف النقال موبيليس. ويسمح حساب الجذر التربيعي لخطأ متوسط التربيع بين البيانات الحقيقية الناتجة عن القياسات الراديوية وبيانات التنبؤ الناتجة عن النموذج الذي تم وضعه بالتحقق من صحة النتائج التي تم الحصول عليها. دراسة مقارنة بين قيمة رمز الذي تم الحصول عليها من قبل النموذج الجديد وتلك التي تم الحصول عليها من قبل النماذج القياسية من النموذج Okumura-Hata و النموذج لK عامل، نستنتج أن النموذج الجديد هو أكثر ملائمة للبيئة المحلية من عنابة من النموذج Okumura-Hata. ويمكن للنموذج الجديد الذي تم الحصول عليه أن يساعد على زيادة أداء الأنظمة الراديوية المتنقلة المنتشرة في هذه المدينة.

الكلمات الدالة: نموذج K عامل, نموذج Okumura-Hata, نموذج الانتشار, قياسات الراديو, الانحدار الخطي, الجذر التربيعي لمتوسط الخطأ التربيعي.

Table des matières

Liste des acronymes	a
Liste des figures	A
Liste des tableaux	i
Introduction générale	1

Chapitre I : Généralités sur les systèmes radio mobiles

I-1- Introduction.....	4
I-2- Systèmes de communication radio mobile.....	4
I-3- 1 ^{ère} génération des systèmes de communication radio mobile	5
I-4- 2 ^{ème} génération des systèmes de communication radio mobile.....	6
I-4-1- Réseau GSM	7
a) Station mobile (MS).....	7
b) Sous-système radio (BSS)	9
c) Sous-système réseau (NSS).....	10
d) Sous système d'exploitation et de maintenance OSS.....	12
e) Interface radio	13
I-4-2- GPRS	14
I-4-3- EDGE.....	14
I-5- 3 ^{ème} génération des systèmes de communication radio mobile.....	14
I-5-1- UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)	15
I-5-2- Dispositions de l'UMTS	16
I-5-3- Principes du W-CDMA	19
I-5-4- Technologie HSDPA (3.5G).....	22
I-5-5- Technologie HSUPA+ (3.75G)	22
I-6- 4 ^{ème} génération des systèmes de communication radio mobile.....	23
I-6-1- Présentation du 3GPP	23
I-6-2- Système LTE	24
I-6-3- Architecture de LTE/EPC.....	24
I-7- 5 ^{ème} génération des systèmes de communication radio mobile.....	25
I-8- Concept cellulaire	26
I-8-1- Caractéristiques d'une cellule.....	27
I-8-2- Objectifs du concept cellulaire	28
I-8-3- Types de cellules.....	28
I-8-4- Handover et macro diversité.....	30
a) Nécessité d'un handover.....	31
b) Types d'handover.....	31
c) Roaming.....	32
I-9- Planification du réseau cellulaire	32
I-10- Conclusion	33

Chapitre II : Développement de modèles de propagation

II-1- Introduction.....	34
II-2- Services radioélectriques importants	34
II-3- Exigences des opérateurs des systèmes de radio mobile	35
II-4 - Développement des modèles de propagation	36
II-4-1 Objectif de la modélisation de la propagation des ondes radioélectriques	36
II-4-2 Canal de propagation	37
II-4-3 Nature des zones concernées	37
II-4-4 Développement de modèle	38
a) Eléments que comporte un modèle	38
b) Type de modélisation en téléphonie radio mobile	40
II-5- Conception d'un modèle de propagation pour les systèmes radio mobiles	40
II-5-1- Aspect général	40
II-5-2- Définition d'un modèle de propagation.....	42
II-5-3- Domaine d'application d'un modèle	43
II-5-4- Différents types de modèles	44
II-5-5- Édification d'un modèle	47
a) Préciser le problème à résoudre	47
b) Recherche des variables d'entrée.....	47
c) Recherche des relations.....	47
II-6- Obtention de données radioélectriques expérimentales	48
II-6-1- Mesures de champ en extérieur	48
II-6-2- Mesures de réponses impulsionnelles.....	51
II-7- Critères d'évaluation d'un modèle	52
II-8- Différents usages des modèles	53
II-8-1- Modèles macro cellulaires	53
a) Modèles ruraux	54
b) Modèle montagneux.....	54
II-8-2- Modèle pour les petites cellules.....	56
a) Modèle COST-NET	56
II-8-3- Modèles micro cellulaires.....	57
II-8-4- Modèle pico cellule.....	59
a) Modèle de pénétration	59
II-9- Conclusion	60

Chapitre III : Mécanismes de propagation et modèles de prédiction pour déploiement des réseaux cellulaires

III-1-Introduction	61
III-2-Objectifs des modèles de prédiction de la propagation	61
III-3-Mécanismes de propagation	62
III-3-1-Aspects physiques de la propagation	62
a) L'évanouissement à grande échelle	62
b) L'évanouissement à petite échelle	63
III-3-2-Différents mécanismes de propagation	64
a) Réflexion.....	64
b) Transmission	68
c) Diffraction.....	69
d) Diffusion	72
e) Guidage	72
III-4- Principaux phénomènes physiques et dépendance en fréquence.....	73
III-4-1-Différents trajets de propagation	73
III-4-2-Propriétés du canal	73
III-5-Modèles de propagation.....	74
III-5-1-Affaiblissement de propagation en espace libre.....	74
III-5-2-Modèle log-distance	76
III-5-3-Modèle Log normal shadowing	77
III-6-Modèles de prédiction empirique	78
III-6-1-Modèles Outdoor.....	78
a) Modèle Okumura	78
b) Modèle d'Okumura-Hata	80
c) Modèle de Walfisch-Bertoni	81
III-7- Conclusion.....	85

Chapitre IV : Optimisation du modèle Okumura Hata par la régression linéaire

IV-1- Introduction.....	86
IV-2- Problématique et état de l'art	86
IV-3- Qualité de Service : principe et caractéristiques	89
IV-3-1- Principes de la QoS dans les réseaux mobiles	89
IV-3-2- Critères d'évaluation de la qualité de service	90
a). Critères de performance chez l'opérateur	90
b). Critères de performance chez l'utilisateur	90
IV-3-3- Qualité de service dans le réseau cellulaire	91
IV-3-4- Paramètres de performance	91

a). Indicateurs de qualité de service	91
b). Indicateurs clés de performance.....	92
IV-3-5- Mesures de performance	93
IV-3-6- Présentation de quelques outils de mesures.....	94
a). RNO d'Alcatel.....	94
b). SPOTS de SIEMENS.....	95
c). Mesures Drive-Test.....	95
IV-4- Paramètres de mesure	96
IV-4-1- Mesures pour accéder au réseau	96
IV-4-2- Mesures de niveau de champ (RxLev)	97
IV-4-3- Mesure de qualité de communication (RxQual).....	98
IV-4-4- Outil TEMS Investigation.....	99
IV-5- Détails expérimentaux	99
IV-5-1- Environnement de propagation.....	99
IV-5-2- Descriptions des autres équipements.....	100
IV-5-3- Description simplifié des BTS utilisées.....	103
IV-5-4- Méthodologie.....	103
IV-5-5- Organigramme de détermination des nouveaux facteurs K.....	106
IV-6-Méthode de l'optimisation par la régression linéaire	107
IV-7- Résultats et discussions.....	109
IV-7-1- Carré de l'erreur quadratique moyenne RMSE	109
IV-7-2-Résultats par zone	110
a). Environnement Urbain.....	110
b). Environnement Suburbain.....	115
c). Environnement Rural	120
IV-8- Récapitulatifs des résultats.....	123
IV-9- Conclusion	124
Conclusion générale	125
Bibliographie	127
Annexe1	133
Annexe2	138
Annexe3	142
Annexe4	145

Liste des acronymes

A

AuC	A uthentication C enter
AGCH	A ccess G rant C Hannel
API	A pplication P rogramming I nterface

B

BTS	B ase T ransceiver S tation
BSIC	B ase S tation I dentify C ode
BSS	B ase S tation S ubsystem
BCCH	B roadcast C ontrol C Hannel
BER	B it E rror R ate
BCC	B ase C olour C ode (pour distinguer les cellules de même opérateur utilisant le même canal, codé sur 3 bits)

C

CBCH	C ell B roadcast C Hannel
CI	C ell I dentify
CDMA	C ode D ivision M ultiple A ccess

D

DTX	D iscontinuous T ransmission
------------	--

E

ETSI	E uropean T elecommunication S tandards I nstitute
EIR	E quipement I dentify R egister
EDGE	E nhanced D ata rates for G SM E volution
EPC	E volution P acket C ore

F

FDMA	F requency D ivision M ultiple A ccess
FACCH	F ast A ssociated C ontrol C Hannel
FCCH	F requency C orrection C Hannel
FN	F rame N umber
FH	F requency H opping

G

GSM	G lobal S ystem for M obile C ommunications
GMSC	G ateway M SC
GPS	G eographic P ositioning S ystem
GPGGA	G lobal P ositioning S ystem F ix D ata
GPRMC	G lobal P ositioning R ecommended M inimum specific L oran- C data
GPGSA	G lobal P ositioning G eographic S atellite A ctivity
GGSN	G ateway G PRS S upport N ode

3GPP Third Generation Partnership project
GPRS General Packet Radio Service

H

HLR Home Location Register
HSDPA High Speed Downlink Packet Access
HSUPA High Speed Uplink Packet Access

I

IMSI International Mobile Subscriber Identity
IMEI International Mobile Equipment Identity
IMT2000 International Mobile Telecommunications

K

KPI Key Performance Indicator

L

LAC Location Area Code
LAPD Link Access Protocol on the D
LAPDm Link Access Protocol on the D mobile channel
LTE Long Term Evolution
LAS-CDMA Long Access Stratum
LOS Line Of Sight

M

MS Mobile Station
MSC Mobile Switching Center
Multitrane suite de 26 ou 51 slots occupant la même position dans les trames TDMA successives sur lesquels sont définis les différents canaux logiques
MSPwr Mobile Station Power
MC-CDMA Modulation and Coding

N

NSS Network SubSystem
NP Network Performance
NMEA0183 National Marine Electronics Association 0183
NCC Network ColourCode (pour distinguer les cellules des opérateurs de pays différents utilisant le même canal, codé sur 3 bits)

O

OSS Operating Support System
OMC Operation and Maintenance Center
OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing

P

PCH	P aging C hannel
PLMN	P ublic L and M obile N etwork
PSTN	P ublic S witched T elephone N etwork
PDN	P acket D ata N etwork

Q

QoS	Q uality of S ervice
------------	------------------------------------

R

RACH	R andom A ccess C hannel
RxLev	mesure RSSI du champ reçu, effectué par le mobile et code sur 6 bits par pas de 1 dB (0=-110 dBm)
RxQual	mesure code sur 3 bits de qualité du signal<reçu par estimation du taux d'erreur bit BER permettant d'apprécier le C/I (0 pour BER < 0.2%, 1 pour 0.2%<BER<0.4%... 7 pour BER> 12.8%)
RLT	R adio L ink T imeout
RNC	R adio N etwork C ontroller

S

SIM	S ubscriber I ndentity M odule
SDCCH	S tand-alone D edicated C hannel
SACCH	S low A ssociated C ontrol C hannel
SCH	S ynchronization C hannel
SGSN	S erving G PRS S upport N ode
SS7	S ignal S emaphore 7

T

TDMA	T ime D ivision M ultiple A ccess
TN	T ime slot N umber
TCH	T raffic C hannel
TA	T iming A dvance
TS	T ime S lot

U

UIT	U nion I nternationale des T élécommunications
UE	U ser E quipment
UWB	U ltra W ide B and

V

VLR	V isitor L ocation R egister
------------	---

W

W-CDMA	Wideband Code Division Multiple Access
Wi-MAX	WorldWide Interoperability for Microwave Access
Wi-Fi	Wireless Fidelity

Listes des figures

Figure I.1	Evolution des systèmes de télécommunication mobiles	5
Figure I.2	(a) Architecture Avancé des services de téléphonie mobile (AMPS), (b) Téléphone mobile 1G	5
Figure I.3	Evolution du système GSM.....	6
Figure I.4	Architecture de réseau GSM	7
Figure I.5	Plug-in SIM et ID-1 SIM	8
Figure I.6	Exemple de BTS.....	9
Figure I.7	Exemple de Contrôleur de station de base	10
Figure I.8	Seule la carte SIM et le HLR connaissent la valeur de Ki	11
Figure I.9	Contenu de l'EIR	12
Figure I.10	Liaison montante et liaison descendante	13
Figure I.11	Architecture du GPRS	14
Figure I.12	Hiérarchie des cellules de l'UMTS	15
Figure I.13	Architecture de l'UMTS.....	16
Figure I.14	Utilisation de la bande de fréquence pour l'UMTS	17
Figure I.15	Architecture du réseau d'accès UTRAN	17
Figure I.16	NodeB avec antennes sectorielles	17
Figure I.17	NodeB avec antenne omnidirectionnelle.....	17
Figure I.18	Accès multiple à répartition en fréquence (FDMA).....	20
Figure I.19	Structure de trame de l'UMTS	20
Figure I.20	Accès multiple à répartition dans le temps TDMA	20
Figure I.21	Combinaison des deux techniques TDMA et FDMA	21
Figure I.22	Accès Multiple à répartition de code CDMA.....	22
Figure I.23	Téléphone portable 4G.....	24
Figure I.24	Architecture générale de LTE/EPC.....	25
Figure I.25	Architecture du réseau cœur LTE	25
Figure I.26	Téléphone portable 5G.....	26
Figure I.27	Motif élémentaire (à gauche) et un ensemble de motifs dans un réseau (à droite).....	27

Figure I.28	(a) Les différents types de cellules du réseau en nid d'abeille (b) Les différentes échelles du réseau radio mobile	30
Figure I.29	Topologie d'un réseau cellulaire trisectorisé à structure hexagonale	30
Figure I.30	Zone de handover entre deux cellules	31
Figure II.1	Représentation d'une onde électromagnétique.....	36
Figure II.2	Représentation d'une liaison radio électrique	37
Figure II.3	Les différentes étapes de résolution d'un problème par le développement d'un modèle	39
Figure II.4	Interface du logiciel Atoll (a) une zone géographique de la wilaya de Biskra (b) Les différents modèles de prédiction utilisés	41
Figure II.5	Visualisation en 3D des ondes radioélectriques se propagent dans une zone urbaine dense	41
Figure II.6	Utilisation d'un mobile dans différents types d'environnement géographique	44
Figure II.7	Principe de la mesure du champ radioélectrique en radio mobile.....	49
Figure II.8	Principe de la mesure du champ radioélectrique en radio mobile.....	50
Figure II.9	Exemple de chemin de mesure à Annaba.....	50
Figure II.10	Le champ radio prédit par un modèle macro cellulaire rural	54
Figure II.11	Représentation d'une configuration montagneuse	55
Figure II.12	Représentation schématique d'une configuration montagneuse.....	55
Figure II.13	Profil synthétique du modèle COST 231.....	56
Figure II.14	Propagation dans une zone macrocellulaire	58
Figure III.1	Classification des évanouissements du canal	63
Figure III.2	Les différents mécanismes de propagation	64
Figure III.3	(1) La Réflexion des ondes, (2) la réflexion spéculaire à la réflexion diffuse.....	65
Figure III.4	Déphasages créés par une irrégularité de surface de hauteur H	65
Figure III.5	Géométrie d'une réflexion sur une façade	66
Figure III.6	Hauteur de rugosité au-delà de laquelle la réflexion est considérée comme diffusé suivant le critère de Rayleigh	67
Figure III.7	Profondeur de pénétration en fonction de la fréquence.....	69
Figure III.8	Onde diffractée.....	70
Figure III.9	Géométrie des obstacles pour affaiblissement par diffraction	70
Figure III.10	La Diffusion des ondes.....	72
Figure III.11	Le guidage des ondes	72

Figure III.12	Modèle d'affaiblissement en espace libre	75
Figure III.13	Modèle d'affaiblissement log-distance	77
Figure III.14	Modèle d'affaiblissement log-normal à effet de masque	78
Figure III.15	Les courbes d'Okumura	80
Figure III.16	Affaiblissement de parcours pour le modèle Okumura- Hata	81
Figure III.17	Affaiblissement de parcours pour le modèle Walfisch- Bertoni	82
Figure III.18	Dépendance en fréquence de l'affaiblissement de parcours pour le modèle Walfisch-Bertoni	83
Figure III.19	Dépendance de l'affaiblissement de parcours à la hauteur du transmetteur pour le modèle Walfisch-Bertoni	83
Figure III.20	Dépendance de l'affaiblissement de parcours à la distance séparant les bâtiments pour le modèle Walfisch-Bertoni.....	84
Figure III.21	Dépendance de l'affaiblissement de parcours à la hauteur des bâtiments pour le modèle Walfisch-Bertoni.....	84
Figure IV.1	Le processus général pour la planification cellulaire	88
Figure IV.2	Classe des KPI.....	93
Figure IV.3	Chaine de mesure Drive Test	96
Figure IV.4	Carte de la région d'Annaba par satellite avec les zones étudiées	100
Figure IV.5	Kit des équipements utilisés pour les mesures	101
Figure IV.6	Centre-ville Annaba (image de gauche) et mesures radio TEMS Investigation 11.0.4 (image de droite).....	101
Figure IV.7	La poste Avant-Port (image de gauche) et mesures radio TEMS Investigation 11.0.4 (image de droite).....	102
Figure IV.8	Sidi Ammar Université (image de gauche) et mesures radio TEMS Investigation 11.0.4 (image de droite).....	102
Figure IV.9	Sidi Ammar centre (image de gauche) et mesures radio TEMS Investigation 11.0.4 (image de droite).	102
Figure IV.10	Aéroport Rabeh BETATE Annaba (image de gauche) et mesures radio TEMS Investigation 11.0.4 (image de droite).....	103
Figure IV.11	Organigramme de l'algorithme d'optimisation	106
Figure IV.12	Affaiblissement des trois modèles pour la zone Z1 au centre-ville Annaba	111
Figure IV.13	Erreur de prédiction pour la zone Z1 du centre-ville d'Annaba.....	112
Figure IV.14	L'évolution du RMSE des trois modèles pour la zone Z1 du centre ville d'Annaba	112
Figure IV.15	Affaiblissement des trois modèles pour la zone Z1 la poste avant-port.....	113
Figure IV.16	Erreur de prédiction des trois modèles pour la zone Z1 la poste avant-port	114

Figure IV.17	L'évolution du RMSE des trois modèles pour la zone Z1 La poste Avant-Port	115
Figure IV.18	Affaiblissement des trois modèles pour la zone Z2 Université Sidi Amar	116
Figure IV.19	Erreur de prédiction des trois modèles pour la zone Z2 Université Sidi Amar.....	117
Figure IV.20	L'évolution du RMSE des trois modèles pour la zone Z2 Sidi Ammar Université.....	118
Figure IV.21	Affaiblissement des trois modèles pour la zone Z2centre-ville Sidi Ammar	118
Figure IV.22	Erreurs de prédiction des trois modèles pour la zone Z2 Centre-ville Sidi Amar	119
Figure IV.23	L'évolution du RMSE des trois modèles pour la zoneZ2 centre-ville de Sidi Ammar	120
Figure IV.24	Affaiblissement des trois modèles pour la zone Z3de l'aéroport Rabeh BETATE Annaba	121
Figure IV.25	Erreurs de prédiction des trois modèles pour la zone Z3Aéroport Rabeh BETATE Annaba	122
Figure IV.26	L'évolution du RMSE des trois modèles pour la zone Z3 Aéroport Rabeh BETATE Annaba.....	122
Figure IV.27	Récapitulative de l'évolution du RMSE des trois modèle	123

Liste des tableaux

Tableau I.1	Données stockées sur une carte SIM.....	8
Tableau II.1	Les principaux types de services radioélectriques	35
Tableau III.1	Evaluation de l'affaiblissement par diffraction	71
Tableau III.2	Exposant de l'affaiblissement de parcours	76
Tableau IV.1	Principaux indicateurs de qualité de service	91
Tableau IV.2	Les différentes valeurs de RxLev pour une couverture réseau.....	97
Tableau IV.3	Relation entre la qualité de communication et le BER	98
Tableau IV.4	Type de zone	100
Tableau IV.5	Caractéristiques des BTS utilisées	103
Tableau IV.6	Paramètres radio des BTS utilisées de l'opérateur Mobilis.....	104
Tableau IV.7	Valeurs des paramètres K du modèle K facteur	105
Tableau IV.8	Critères de filtrage	107
Tableau IV.9	Valeurs des coefficients K et RMSE obtenus dans le centre-ville d'Annaba.....	111
Tableau IV.10	Valeurs des coefficients K et RMSE obtenus dans zone de la poste avant-port.....	113
Tableau IV.11	Valeurs des coefficients K et RMSE obtenus dans la zone Z1 de Sidi Ammar université	116
Tableau IV.12	Valeurs des coefficients K et RMSE obtenus dans zone Z2 centre-ville Sidi.....	119
Tableau IV.13	Valeurs des coefficients K et RMSE obtenus dans zone de l'aéroport Rabeh BETATE Annaba.....	121
Tableau IV.14	Évaluation du RMSE pour les différentes zones	123
Tableau IV.15	Évaluation du modèle résultant de la régression.....	123

Introduction générale

Au début du XX^e siècle furent établies les premières liaisons radioélectriques et la télégraphie sans fil. Elles sont réalisées par Marconi qui s'appuya sur les travaux théoriques de Maxwell et les expériences de Hertz. Des scientifiques célèbres, mathématiciens, physiciens et expérimentateurs tels que Poincaré, Blondel et le Général Ferrie joueront un rôle capital dans le progrès des radiocommunications et plus particulièrement par la connaissance théorique et expérimentale des milieux de propagation. Des chercheurs et des ingénieurs apporteront des contributions déterminantes pour la connaissance de la propagation des ondes radio et plus particulièrement appliquées aux télécommunications.

Par conséquent, la propagation fait toujours le sujet d'une activité continue et plusieurs résultats sont adaptés aux radiocommunications mais également à d'autres domaines tels que la télédétection. Sachant que les équations de Maxwell n'ont pas changé, mais les exigences croissantes des télécommunications demandent d'avoir une modélisation poussée de la propagation dans des conditions toujours plus différentes dues aux environnements différents, aux gammes de fréquence et des bandes passantes.

La notion de mobilité est l'un des éléments qui a conduit à la hausse de l'activité en propagation radio. Pour cela, les services de télécommunications doivent pouvoir être offerts dans les environnements les plus variés possibles, à la maison, sur son lieu de travail mais de plus en plus au cours de nos déplacements. Le réseau fixe filaire permet d'offrir dans une certaine mesure cette mobilité par des possibilités de routage, mais la radio possède, à cet égard, un avantage immense. Toutefois, cette mobilité pose de nombreux problèmes en termes de propagation car la non-visibilité devient souvent la règle. Les caractéristiques physiques de l'atmosphère jouent toujours leur rôle mais deviennent secondaires par rapport à l'influence de la configuration du sursol artificiel bâti par l'homme.

Outre l'introduction et la conclusion générales, cette thèse s'articule sur quatre chapitres. Dans le premier chapitre, nous allons donner un aperçu sur les différentes générations que les systèmes radio mobiles ont connues ainsi que leurs évolutions. Ces innovations technologiques rapides ont été possibles grâce à la demande croissante des systèmes radio mobiles par les usagers qui évoluent d'une année à une autre, ainsi que les limitations présentes d'une génération à une autre en termes de débits, de grande demande de transfert de flux de données ... etc.

Le deuxième chapitre est consacré au développement de modèles puisque les études scientifiques s'appuient sur une certaine modélisation de la réalité. Dans cette partie de notre travail, il nous a donc paru indispensable d'analyser les différentes manières de modéliser les phénomènes de propagation d'ondes radio afin de bien mesurer ce qu'on peut attendre de tel ou de tel type de modèle. Dans ce sens, quelques modèles de propagation qui sont utilisés en ingénierie des systèmes radio mobiles ont été clairement explicités. Ceux-ci se distinguent essentiellement par leur environnement d'application et nous les avons classés suivant ce critère en partant des modèles macro cellulaires pour une zone rurale pour aller jusqu'aux modèles pico cellulaires pour l'intérieur des bâtiments en passant par les modèles micro cellulaires pour les milieux urbanisés.

Le troisième chapitre est consacré aux différents mécanismes de la propagation puisque le développement des services de télécommunication doit passer par la bonne connaissance de la propagation des ondes assurant la transmission de l'information. Ces ondes se propagent dans l'espace selon différents mécanismes. En espace libre où l'onde se propage sans rencontrer d'obstacle, l'affaiblissement est dû à la dispersion de l'énergie au fur et à mesure que l'onde s'éloigne de l'émetteur. Ainsi, l'onde va subir plusieurs phénomènes tels que la réflexion qui est un phénomène qui se produit lorsque l'onde rencontre une surface dont les dimensions sont grandes par rapport à la longueur d'onde, la transmission qui est un phénomène qui permet aux vibrations ou aux ondes de traverser un milieu (vide, air, obstacle, ... etc.) sans changement de fréquence en suivant la loi de Descartes, la diffraction qui est un phénomène qui se produit lorsque des ondes rencontrent des obstacles ou des ouvertures dont les dimensions sont grandes par rapport à la longueur d'onde, la diffusion qui est un phénomène de répartition dans de nombreuses directions d'un milieu de propagation de l'énergie d'une onde électromagnétique après sa rencontre avec une surface rugueuse ou des hétérogénéités petites par rapport à la longueur d'onde, le guidage qui permet de canaliser l'énergie rayonnée dans une direction donnée. Certains environnements (rues encaissées, corridors, tunnels, ...etc.) se comportent comme de véritables guides d'ondes vis-à-vis de la propagation des ondes radioélectriques. Aussi, quelques modèles empiriques utilisés pour la prédiction de propagation en milieu Outdoor ont été détaillés.

Pour le dernier chapitre, sa première partie a fait l'objet de la problématique et d'un état de l'art sur plusieurs types de logiciels de planification incluant la calibration de modèles qui existent sur le marché à savoir : ASSET de l'entreprise AIRCOM en Angleterre, PLANET de l'entreprise MARCONI, ATTOL de l'entreprise française FORK utilisé par Algérie Télécom pour Mobilis. Nous avons explicité les différents travaux de recherche qui ont été menés dans

ce contexte par plusieurs auteurs et qui se sont intéressés à la calibration des modèles de propagation. Quant à la deuxième partie, elle consiste à proposer un modèle de prédiction issu d'une optimisation par régression linéaire des modèle K facteur et Okumura-Hata sur la base de mesures effectuées avec Drive-Test et analysées selon le logiciel TEMS Investigation au niveau de la ville d'Annaba dans différentes zones. Le modèle obtenu est très proche de la réalité.

Afin de donner un caractère d'extension à ce modeste travail, cette thèse a été clôturée par des perspectives générales.

Chapitre I

Généralités sur les systèmes radio mobiles

I-1-Introduction

Les systèmes radio mobiles connaissent des évolutions technologiques rapides et voient le nombre des utilisateurs augmenter chaque jour. Cependant, des limites se font sentir notamment en termes de nécessité de transfert à haut débit. Cet état de fait requiert le passage d'une génération à une autre ; ce qui va permettre de surmonter les limitations de la génération qui la précède.

Dans ce chapitre, nous allons établir une synthèse sur les aspects généraux des systèmes radio mobiles, leurs différentes générations et architectures, ainsi que les défis à relever.

I-2-Systèmes de communication radio mobile

À ce jour, il y a eu cinq différentes générations de communications radio mobiles. La première génération (1G) de technologie de la téléphonie sans fil est la norme analogique de la téléphonie cellulaire qui a été introduite dans les années 80 et qui a continué à exister jusqu'à son remplacement par la deuxième génération à la fin des années 1990. Cette première génération a utilisé des normes telles que NMT (Nordic Mobile Telephone) utilisée dans les pays nordiques, NTT au Japon, et AMPS (Advanced Mobile Phone System) exploité aux États-Unis.

Le réseau mobile de deuxième génération (2G) vient surmonter les limites de la 1G en se concentrant principalement sur la transmission de la voix et des données avec des signaux numériques [1]. Là encore, la 2G a utilisé des normes spécifiques telles que GSM (Global System for Mobile Communications), PDC (Personal Digital Cellular) et CDMA (code division multiple access).

La troisième génération (3G) a débuté en octobre 2001 avec le lancement du réseau WCDMA au Japon [2]. Elle est arrivée pour faire face à la faible vitesse de transfert des données et les technologies incompatibles utilisées sur les générations précédentes. Les principales caractéristiques de la 3G sont des taux de transmission de données plus élevés et une capacité accrue pour les applications telles que Global Roaming, Internet, vidéo conférences, appels vidéo et jeux 3D.

La quatrième génération (4G) est connue comme le système successeur de la 3G. La 4G a été surnommée "génération magique" parce que les utilisateurs peuvent utiliser le mobile multimédia avec un service personnalisé sur des débits de données plus élevés que les générations précédentes.

La cinquième génération (5G), quant à elle, est un système de communication mobile sans fil qui couvre des zones étendues avec un haut débit. Par conséquent, elle est appelée comme monde réel sans fil ou sans fil World Wide Web (WWW) [3].

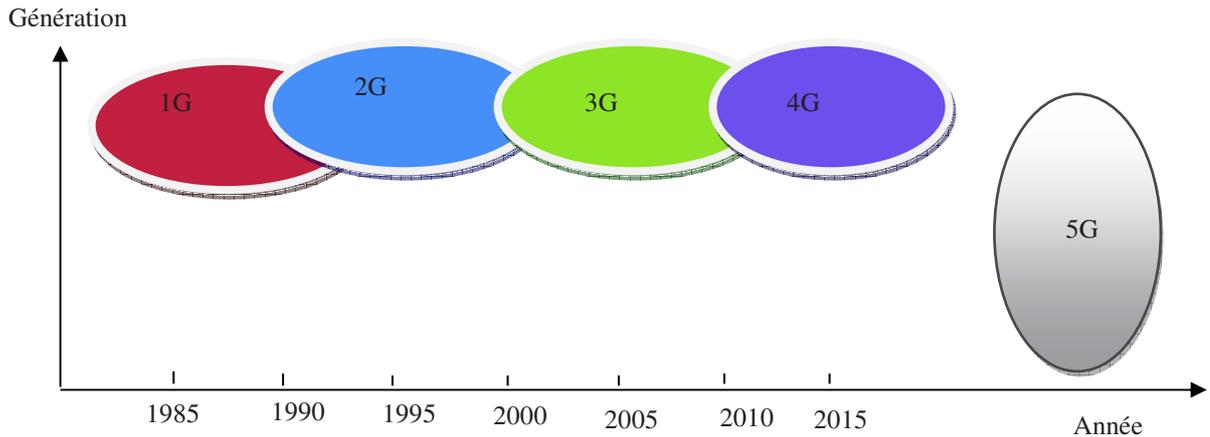


Figure I.1 : Evolution des systèmes de télécommunication mobiles

I-3- 1^{ère} génération des systèmes de communication radio mobile

La première génération a été créée au début des années 1980 où presque tout était basé sur des systèmes analogiques utilisant la technique de modulation de fréquence pour la transmission radio et utilisant l'accès multiple par répartition en fréquence (FDMA). Basée sur une technologie connue sous le nom d'Advanced Mobile Phone Service (AMPS) [4], elle permettait une capacité de canal de 30 KHz et la bande de fréquence était 824-894 MHz [4]. La figure I.2 (a) illustre un tel système et le téléphone mobile utilisé est représenté sur la figure 1.2 (b); La vitesse pouvait aller jusqu'à 2,4 Kbps [1, 5].

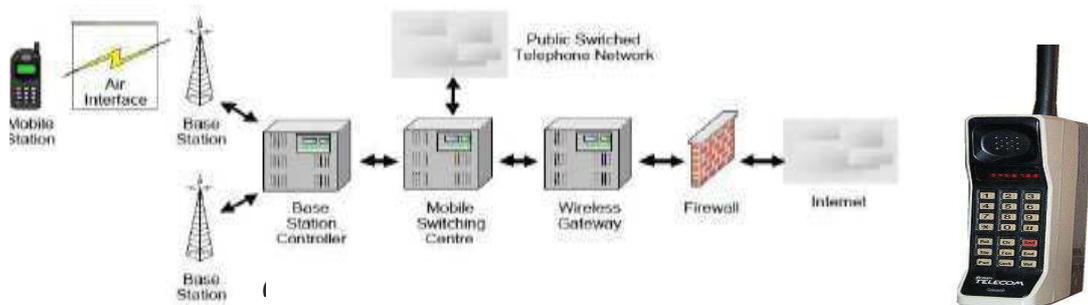


Figure I.2 : (a) Architecture Avancé des services de téléphonie mobile (AMPS), (b) Téléphone mobile 1G

Cependant, la 1G a souffert de certaines limitations. Tout d'abord, il n'y a pas eu de service pour convertir la voix en signaux numériques. Deuxièmement, le service d'itinérance mondial n'a pas été possible à cause de la faible capacité, du transfert peu fiable, de la pauvre qualité de la voix. Troisièmement, les données pouvaient être acheminées par un seul canal, de la source (un appelant) à la destination (un autre). Cela signifie que les deux appelants ne sont pas en mesure de s'entendre en même temps puisque le nombre d'appels était limité.

I-4- 2^{ème} génération des systèmes de communication mobile

La deuxième génération est apparue à la fin des années 1990. Le système de communication radio mobile 2G est un système numérique; ce système est encore utilisé dans différentes parties du monde. Cette génération, principalement utilisée pour la transmission de la voix avec des signaux numériques, offre une vitesse allant jusqu'à 64 Kbps et a également permis des services supplémentaires tels que les services de messages courts (SMS), services de la messagerie d'image et multimédia (MMS). Dans cette génération, deux types d'accès sont utilisés; le premier est l'accès multiple par répartition dans le temps (TDMA) et le second est l'accès multiple par répartition en code (CDMA). La bande de fréquence s'étale de 850 à 1900 MHz. Dans la 2G, la technologie GSM utilise huit canaux par opérateur avec un débit brut de 22,8 Kbps (un taux net de 13 Kbps) dans le canal à débit complet et une trame de durée de 4,6 millisecondes (ms). L'évolution de cette norme GSM est représentée sur la figure I.3 qui comprend la 2G, 2.5G, 2.75G et 3G [1, 4].

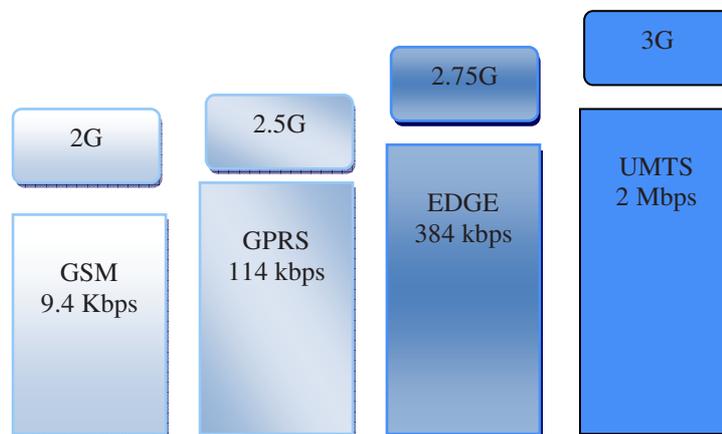


Figure I.3 : Evolution du système GSM.

Comme la 1G, la 2G présente des limitations. Les signaux numériques seraient de mauvaise qualité s'il n'y a pas une bonne couverture de réseau dans la région spécifique. De plus, il est difficile de gérer des données complexes telles que la vidéo. Le GSM utilise des techniques à commutation de circuits pour prendre en charge les appels vocaux.

I-4-1-Réseau GSM

Un système de radiocommunication mobile est par définition composé d'une infrastructure desservant les utilisateurs en ce déplaçant. La communication entre les utilisateurs et l'infrastructure est faite sur un support sans fil connu comme un canal radio. Les systèmes de télécommunication sont constitués de plusieurs composants tels que: terminal/équipement utilisateur, transmission et commutation, équipement de routage, ... etc.

La norme GSM a servi de base pour la conception de toutes les autres générations futures de réseaux mobiles. Elle comprend plusieurs équipements radios où chacun est contrôlé par une station émettrice-réceptrice appelée station de base (BTS) comme l'illustre la figure I.4.

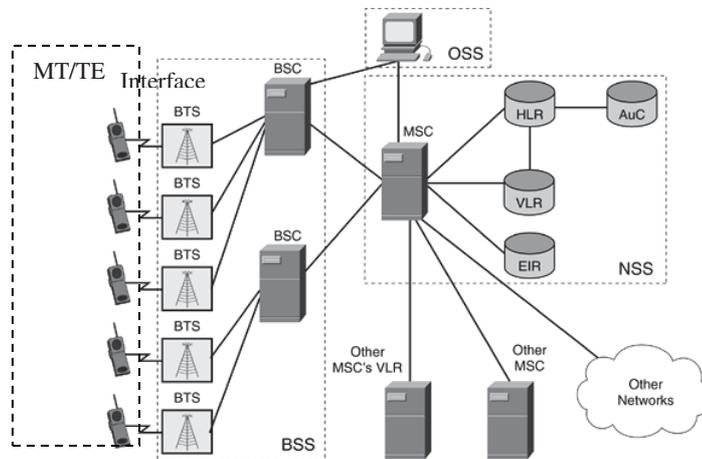


Figure I.4 : Architecture de réseau GSM.

- MT:** Terminal mobile
- TE:** Équipement terminal
- BTS:** Station émettrice-réceptrice de base
- BSC:** Contrôleur de station de base
- MSC:** Centre de commutation mobile
- VLR:** Registre des visiteurs
- HLR:** Registre du lieu de résidence
- AUC:** Centre d'authentification
- PSTN:** Réseau Téléphonique Commuté

a) Station mobile (MS)

Cette partie de l'architecture du réseau GSM comprend les terminaux mobiles qui sont le téléphone et la carte SIM (Subscriber Identity Module). Ces derniers sont les seuls éléments auxquels un utilisateur a directement accès et qui suffisent à réaliser l'ensemble des fonctionnalités nécessaires à la transmission et à la gestion des déplacements.

La carte SIM (*Module d'identité d'abonné*) est une micro puce qui est plantée sur une carte de contrôle (ID-1 SIM) ou une pièce en plastique d'environ 1 cm carré (carte SIM insérable). La figure I.5 montre différentes variantes de SIM.

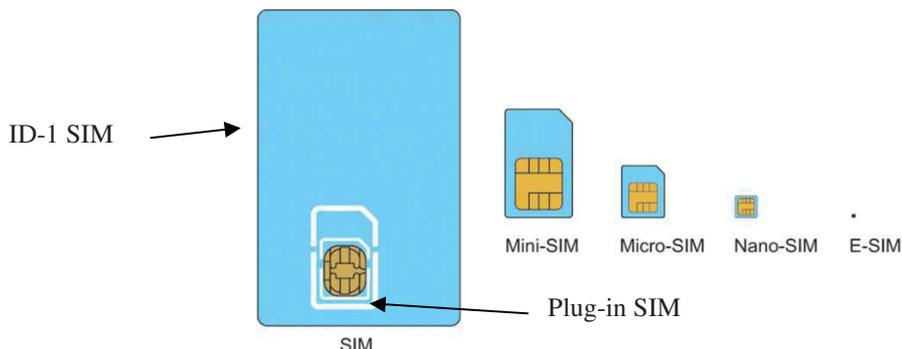


Figure I.5 : Plug-in SIM et ID-1 SIM.

Un téléphone portable GSM ne peut pas être utilisé sans SIM. La terminologie GSM distingue entre une station mobile et équipement mobile. L'équipement mobile devient une station mobile lorsque la carte SIM est insérée. Il n'y a pas de différence de fonctionnalité entre la carte SIM ID-1 et la carte SIM plug-in, sauf la taille; ce qui constitue un avantage pour le plug-in SIM lorsqu'elle est utilisée dans un petit téléphone portable. De nombreux opérateurs de réseaux offrent (à un coût supplémentaire) des paires identiques de cartes SIM / plug-in ID-1 SIM.

Tableau I.1 : Données stockées sur une carte SIM

Paramètre	Observation
Données administratives	
PIN / PIN2	Numéro d'identification personnel; demandé à chaque mise sous tension (code PIN ou code PIN2)
PUK / PUK2	Clé de déblocage de code PIN nécessaire pour déverrouiller une carte SIM
Table de service SIM	Liste des fonctionnalités optionnelles de la carte SIM
Dernier numéro composé)	Rappel
Compteur de charge	Les charges et les incréments de temps peuvent être réglés
Langue	Détermine la langue pour les invites de la station mobile
Données d'abonné	
IMSI	Identité internationale d'abonné mobile
MSISDN	Abonné mobile RNIS; numéro de répertoire d'un abonné
Access control class	Pour le contrôle de l'accès au réseau
Données vacancières	
TMSI	Identité d'abonné mobile temporaire
Value of T3212	Pour la mise à jour
Location updating status	Une mise à jour de l'emplacement est-elle requise?
LAI	Informations sur la zone de localisation
Network color codes (NCCs) of restricted PLMNs	Un maximum de 4 PLMN peut être entré sur une carte SIM après un emplacement infructueux mettre à jour; cause "PLMN non autorisé." Plus ancienne entrée supprimé lorsque plus que 4 PLMN restreints sont trouvés.
NCCs of preferred PLMNs	Le PLMN que le MS devrait sélectionner, s'il y en a plus d'un à choisir et le PLMN n'est pas disponible?

La tâche principale d'une carte SIM est de stocker des données. Les paramètres les plus importants d'une carte SIM sont présentés dans le tableau I.1. Il convient de noter que la liste n'est pas complète et que la carte SIM peut également être utilisée pour stocker, par exemple, les numéros de téléphone [6].

b) Sous-système radio (BSS)

Il s'occupe de la transmission radio. Il comprend les parties suivantes :

❖ *BTS (Base Transceiver Station)*

Un BTS est un pilon composé de plusieurs antennes émetteurs/récepteurs. Sa capacité maximale est de 8 porteuses lui permettant de gérer une cinquantaine de communications en parallèle. Elle est chargée des formes physiques de la transmission : la modulation et la démodulation des signaux, le codage correcteur d'erreurs, le chiffrement, le multiplexage TDMA. Elle effectue aussi un ensemble de mesures radio permettant le contrôle de la qualité d'une communication en cours. Ces informations sont directement envoyées au BSC [8]. La figure I.6 illustre un exemple de BTS.



Figure I.6 : Exemple de BTS.

On distingue deux types de BTS :

- ❖ Les BTS normales : utilisées dans les systèmes cellulaires avec des équipements complémentaires installés dans des locaux techniques et des antennes sur les toits.
- ❖ Les micro-BTS sont utilisés pour couvrir les zones urbaines denses avec des micro-cellules. Il s'agit d'équipements de faible taille et de faible coût qui permettent de mieux couvrir un réseau dense comme le quartier d'une ville à forte affluence [9-10].

❖ *BSC (Base Station Controller)*

La BTS fournit la connexion physique d'un MS au réseau sous forme d'interface air. De l'autre côté, vers le NSS, la BTS est connectée au BSC via l'interface A-bis. Les fabricants d'équipements BTS ont été en mesure de réduire sa taille substantiellement (figure I.7). La taille typique en 1991 était celle d'une armoire; aujourd'hui la taille est comparable à celle d'une boîte aux lettres.



Figure I.7 : Exemple de Contrôleur de station de base.

c) *Sous-système réseau (NSS)*

Il tient en charge les tâches d'établissement des communications et de gestion de la mobilité (localisation). Dans les réseaux GSM et UMTS, le sous système NSS contient un centre de commutation MSC (Mobile-services Switching Center) ainsi que des bases de données : VLR, EIR, AuC, HLR et OMC que nous détaillerons dans la suite. Le sous-système réseau NSS joue le rôle central dans chaque réseau mobile.

- *Fonctions du centre de commutation des services mobiles MSC*

Il effectue toutes les fonctions nécessaires à la gestion des appels en provenance ou à destination des abonnés localisés dans sa zone. Il gère aussi les informations liées à la mobilité des clients, utilisant pour cela les enregistreurs de données VLR et HLR. Le MSC n'est qu'un simple service intégré. Il assure également la commutation entre le réseau mobile et le réseau classique du téléphone fixe. Les deux tâches principales du MSC sont :

- *Fonctions du Registre HLR*

Le HLR peut être considéré comme une grande base de données avec des temps d'accès qui doivent être aussi courts que possible. Plus la réponse de la base de données est rapide, plus l'appel peut être rapidement connecté. Une telle base de données est capable de gérer des données pour littéralement des centaines de milliers d'abonnés.

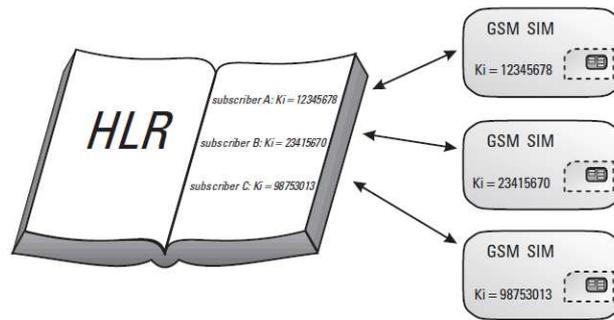


Figure I.8 : Seule la carte SIM et le HLR connaissent la valeur de Ki [6].

Dans le HLR, des paramètres spécifiques à l'abonné sont maintenus tels que le paramètre *Ki* qui fait partie de la gestion de la sécurité. Il n'est jamais transmis sur toute interface et est connu uniquement pour le HLR et le SIM (figure I.8). Chaque abonné est affecté à un registre HLR spécifique qui agit comme point de référence et où les informations sur l'emplacement actuel de l'utilisateur sont stockées. Pour réduire la charge sur le HLR, le VLR a été introduit pour soutenir le HLR en gérant un grand nombre de requêtes liées à l'abonné (par exemple, localisation et approbation des fonctionnalités). Il est essentiel que tout soit mis en œuvre pour éviter les pannes de l'HLR ou la perte des données des abonnés.

- Fonctions du registre des visiteurs VLR

Le VLR est un registre de base de données, mais sa fonction diffère de celle du HLR. Alors que le HLR est responsable de plus de fonctions statiques, le VLR fournit une gestion dynamique des données de l'abonné. Lorsque l'abonné se déplace d'un endroit à un autre, les données sont transmises à partir de l'ancien VLR où l'abonné se trouvait au nouveau VLR où l'abonné se trouve actuellement. Le VLR se voit octroyer une zone géographique limitée. La norme GSM permet d'associer un VLR à plusieurs MSC.

- Centre d'authentification AuC (Authentication Center)

Lorsqu'un abonné passe une communication, l'opérateur doit pouvoir s'assurer qu'il ne s'agit pas d'un intrus ; il protège les communications. L'AuC mémorise pour chaque abonné une clé secrète utilisée pour authentifier les demandes de services et chiffrer les communications [8]. C'est pour cela que l'AuC est toujours implémenté en tant que partie intégrante du HLR.

- Enregistreur de l'identité des équipements EIR (Equipment Identity Register)

L'EIR a été introduit pour identifier et combattre un marché noir de l'équipement volé, c'est-à-dire permet de suivre et d'interdire l'utilisation de tels équipements dans le réseau.

Chaque GSM a un identifiant unique, son IMEI, qui ne peut être modifié sans détruire le téléphone. L'IMEI contient un numéro de série et un identifiant de type.

Comme le HLR ou le VLR, l'EIR comporte essentiellement une base de données composée de trois listes: (1) la "liste blanche" contient tous les types de stations mobiles; (2) la "liste noire" contient les IMEI volées ou interdit pour des raisons techniques et (3) la "liste grise" qui permet le traçage de la station mobile associée comme l'illustre la figure I.9.

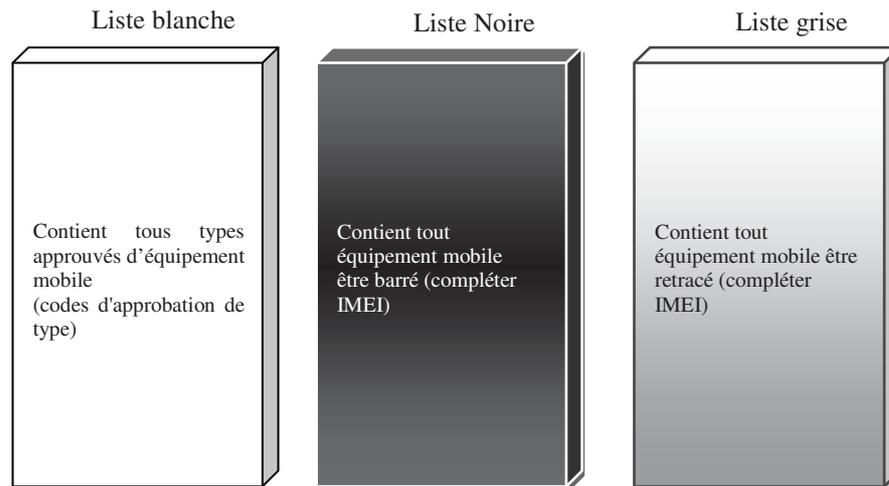


Figure I.9 : Contenu de l'EIR [6].

- Centre d'opération et de maintenance OMC (Operation and Maintenance Center)

Cette partie du réseau regroupe trois activités principales de gestion:

- La gestion administrative
- La gestion commerciale
- La gestion technique

Le réseau de maintenance technique s'intéresse au fonctionnement des éléments du réseau. Il gère notamment les alarmes, les pannes, la sécurité, ... etc. Ce réseau s'appuie sur un réseau de transfert de données totalement dissocié du réseau de communication GSM [8].

d) Sous système d'exploitation et de maintenance OSS

Il comporte de ce qui suit :

- ❖ L'administration du réseau

L'administration du réseau comprend toutes les activités qui permettent de mémoriser et de contrôler les performances d'utilisation et les ressources de manière à offrir un niveau correct de qualité aux usagers. On distingue 5 fonctions d'administration :

- *L'administration commerciale* : La déclaration des abonnés et des terminaux, la facturation, les statistiques ... etc.

- *La gestion de la sécurité* : La détection des intrusions, le niveau d'habilitation ...etc.
- *L'exploitation et la gestion des performances* : L'observation du trafic et de la qualité, les changements de configuration pour s'adapter à la charge du réseau, la surveillance des mobiles de maintenance ... etc.
- *Le contrôle de configuration du système* : Les mises à niveau des logiciels, les introductions de nouveaux équipements ou de nouvelles fonctionnalités ... etc.
- *La maintenance* : Les détections de défauts, les tests d'équipements ... etc. [11].

❖ Centre Réseau et Gestion NMC (Network and Management Center)

Deux niveaux de hiérarchie sont définis dans la norme GSM. Les OMC (Operations and Maintenance Center) et le NMC (Network and Management Center). Le NMC permet l'administration générale de l'ensemble du réseau par un contrôle centralisé [11].

e) Interface radio

L'une des caractéristiques importantes d'un système de communication radio mobile est l'interface radio. C'est l'interface entre les stations mobiles et la station de base. Elle permet aux utilisateurs d'être mobiles avec un accès sans fil. Le spectre radio est le terme utilisé pour décrire le montant de ressources (c'est-à-dire, bande passante / spectre de fréquences) que l'interface radio utilise. Dans les communications mobiles, le spectre radio est l'une des parties les plus importantes en raison de son coût élevé. En plus, le spectre radioélectrique est souvent limité et traité comme une ressource rare que les utilisateurs du système de communication mobile doivent partager. Le partage du spectre se fait en utilisant un schéma d'accès multiple que nous verrons plus loin dans ce chapitre. La largeur de bande fréquentielle maximale du GSM est de 25 MHz (figure I.10) pour chaque liaison (montante ou descendante); soit 124 fréquences porteuses séparées chacune d'elle par 200 KHz. Dans le GSM, le duplex de division de fréquence (FDD) est également utilisé pour séparer la gamme des fréquences de la liaison descendante de la liaison montante.

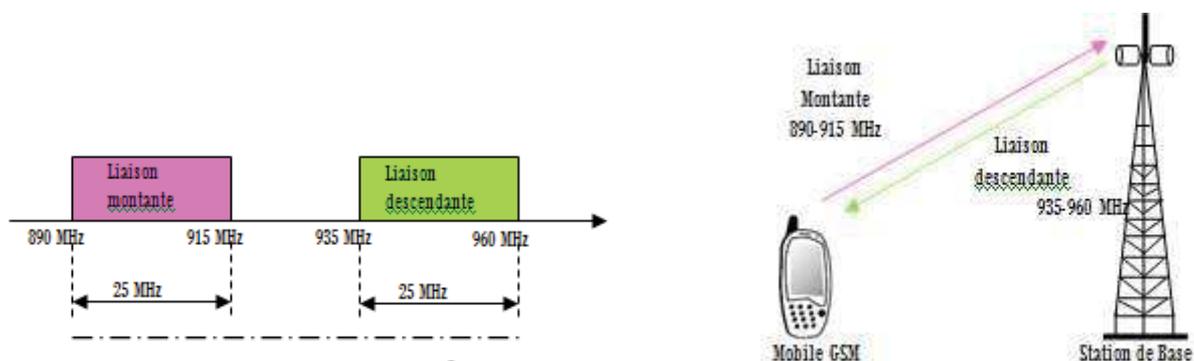


Figure I.10 : Liaison montante et liaison descendante [12]

En raison du besoin de débits plus élevés de données, la 3^{ème} génération est considérée comme une étape de la deuxième génération utilisant l'architecture Universal Mobile Telecommunication Système (UMTS) que nous évoquerons un peu plus loin.

I-4-2-GPRS

En raison de l'immense besoin de débits plus élevés de données que le service général de la radiocommunication en mode paquet requiert, le GPRS a été développé (figure I.11). Il est considéré comme une étape de la deuxième génération de la communication mobile GSM. Il offre des débits de données plus élevés entre 56 et 114 Kbps et des tarifs très bas. Cela a permis d'avoir de multitude de possibilités et de services à offrir par les opérateurs mobiles.

I-4-3-EDGE

Après le GPRS, l'évolution du système GSM a continué à soutenir encore plus de taux de données. Cela a mené au développement de données pour l'évolution du GSM en EDGE. La caractéristique principale d'EDGE était qu'elle permettait des débits de données jusqu'à 384 kbps, ce qui représente une amélioration significative par rapport au GPRS. L'augmentation du débit de données était réalisée en changeant le schéma de modulation GSM du décalage minimum gaussien Keying (GMSK) à 8PSK.

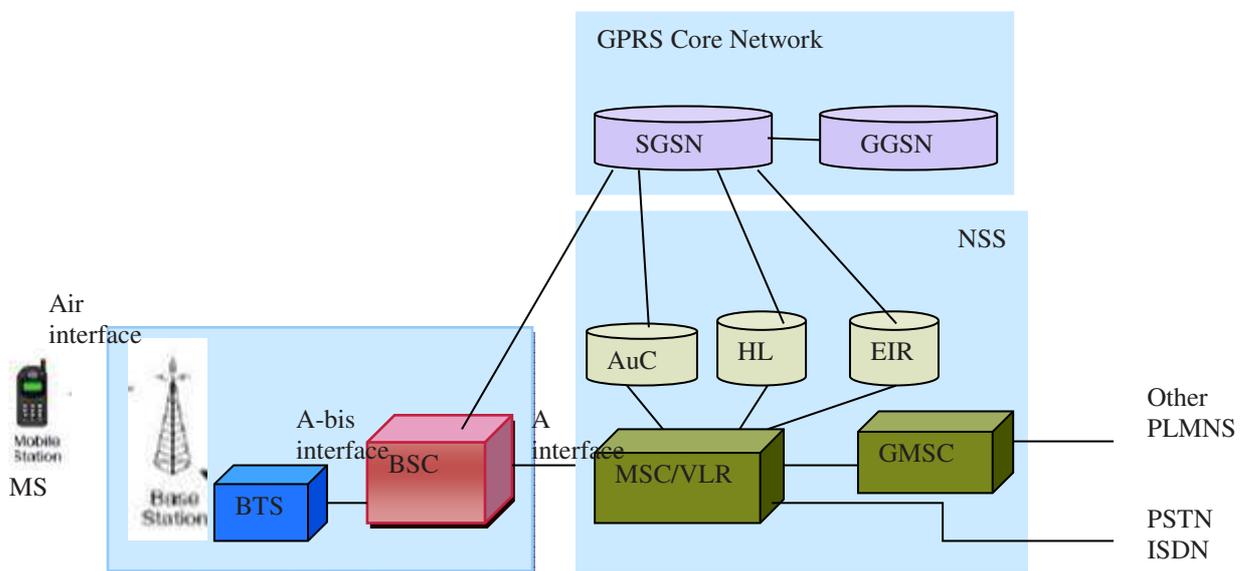


Figure I.11 : Architecture du GPRS.

I-5- 3^{ème} génération des systèmes de communication mobile

La troisième génération (3G) a vu le jour en l'an 2000. Elle introduit les services qui combinent l'accès à haute vitesse avec des services IP (Internet Protocol). La norme d'interface radio 3G W-CDMA a été conçue pour toujours servir le service sans fil par

paquets, de sorte que les ordinateurs, les appareils de divertissement et les téléphones mobiles, puissent tous partager le même service réseau sans fil et être connectés à internet. Le débit de données pris en charge par les réseaux 3G dépend aussi de l'environnement dans lequel l'appel est fait; 144 Kbps en communication par satellite et zone ouverte ou rurale, 384 Kbps en extérieur et zone urbaine, 2Mbps en intérieur et faible portée en zone ouverte. La bande de fréquence est comprise entre 1,8 et 2,5 GHz [4].

La technologie 3G est plus flexible car elle soutient les 5 principales technologies radio. Ces technologies radio fonctionnent sous CDMA, TDMA et FDMA. Le but de la 3G est de fournir plus de couverture et d'évolution avec le plus bas coût d'investissement. Parmi les limitations de la troisième génération, elle nécessite une bande passante plus grande, le coût du téléphone mobile 3G est élevé, la taille du téléphone est parfois importante et l'infrastructure pour la 3G est difficile à bâtir.

I-5-1-UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)

La norme UMTS est utilisée pour la 3G par les européens ; comme il existe d'autres technologies adaptées par d'autres pays dans le monde. La particularité des technologies 3G est d'avoir un réseau cœur IP. L'UMTS est basée sur la technologie W-CDMA (utilisée au Japon et en Corée du Sud). L'UMTS a été dimensionnée à partir de 2004. Sa bande de fréquence de fonctionnement est 1900MHz-2000MHz. C'est un système de troisième génération qui fait partie de la famille IMT 2000 et dont les spécifications techniques sont développées au sein du 3GPP (3rd Generation Partnership Project). Le réseau UMTS ne remplace pas le réseau GSM existant puisque la coexistence entre ces deux réseaux est possible. Comme le réseau GSM, l'UMTS est sectionné en plusieurs cellules de tailles variables comme l'indique la figure 1.12. Chacune d'entre elles est fonction de la densité de population à servir et de la vitesse de mobilité. L'accès par satellite est une extension.

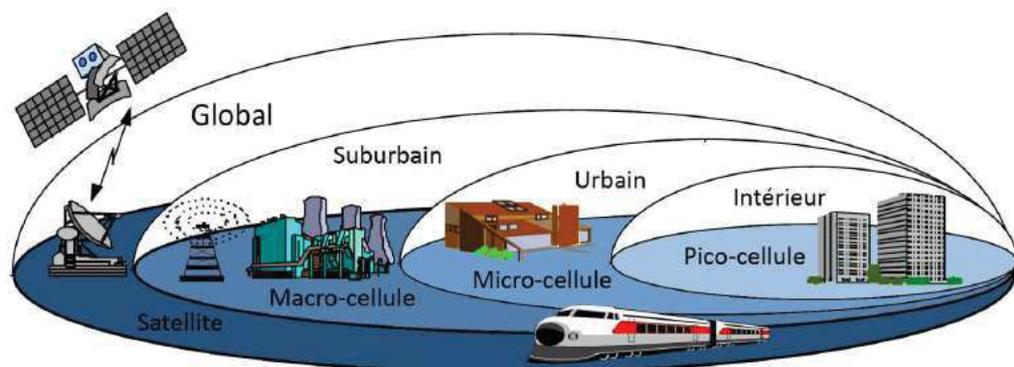


Figure I.12 : Hiérarchie des cellules de l'UMTS [14].

Le débit dépend de la vitesse de l'utilisateur supportée par une cellule particulière :

- Macro-cellule : 144 Kb/s pour 500 Km/h
- Micro-cellule: 384 Kb/s pour 120 Km/h
- Pico-cellule: 2 Mb/s pour 10 Km/h

I-5-2- Dispositions de l'UMTS

L'architecture de ce système est composée essentiellement d'un réseau terrestre d'accès radio en l'occurrence l'UTRAN (Universal terrestrial Radio Access Network) et d'un réseau cœur comme indiqué par la figure I.13. L'UMTS est compatible avec tous les réseaux du monde du fait de la possibilité de roaming au niveau mondial.

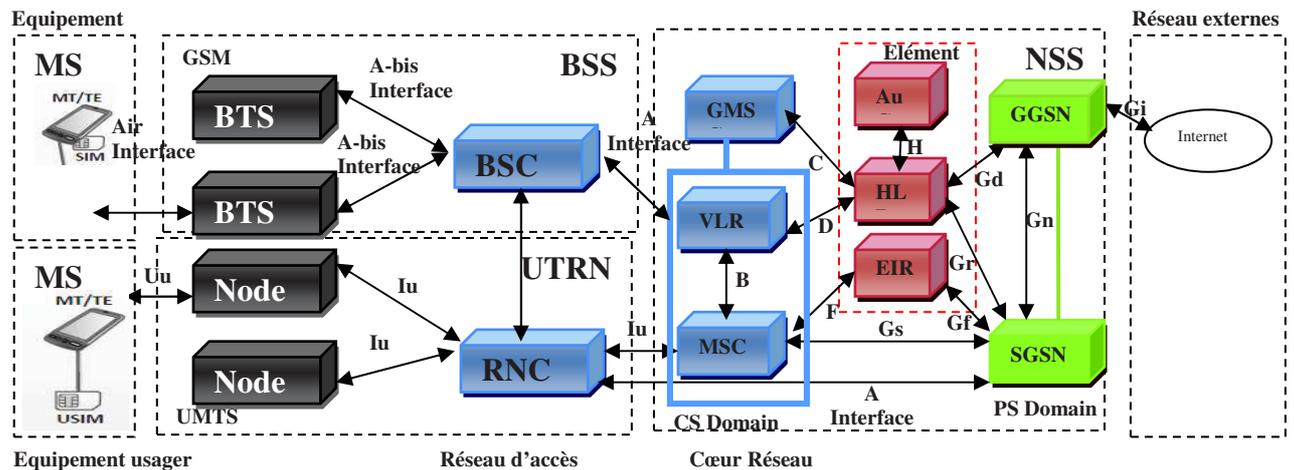


Figure I.13: Architecture de l'UMTS.

Le réseau d'accès UTRAN remplit plusieurs fonctionnalités. Il est le lien entre le MS et le réseau cœur via les interfaces Air-interface et A-interface. Par ailleurs, il est chargé d'autres fonctions :

- *Sécurité* : Il permet la confidentialité et la protection des informations échangées par l'interface radio en utilisant des algorithmes de chiffrement et d'intégrité.
- *Mobilité* : Une estimation de la position géographique est possible à l'aide du réseau d'accès UTRAN.
- *Gestion des ressources radio* : Le réseau d'accès est chargé d'allouer et de maintenir des ressources radio nécessaires à la communication.
- *Synchronisation* : Il est aussi en charge du maintien de la base de temps de référence des mobiles pour transmettre et recevoir des informations.

L'UTRAN utilise deux modes d'accès fondés sur la technologie CDMA large bande :

- L'UTRA/FDD (Universal Terrestrial Radio Access/Frequency Duplex Division).
- L'UTRA/TDD (Universal Terrestrial Radio Access/Time Duplex Division).

Les bandes de fréquences allouées pour l'IMT 2000 sont 1885-2025 MHz et 2110-2200 MHz. L'UMTS propose la répartition suivante (figure I.14) :

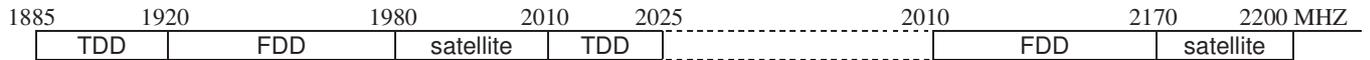


Figure I.14 : Utilisation de la bande de fréquence pour l'UMTS. TDD (Time Division Duplex) et FDD: (Frequency division duplex)

Le réseau d'accès UTRAN comprend plusieurs stations de base (appelées NodeB), des contrôleurs radio RNC (Radio Network Controller) et des interfaces de communication entre les différents éléments du réseau UMTS (figure I.15).

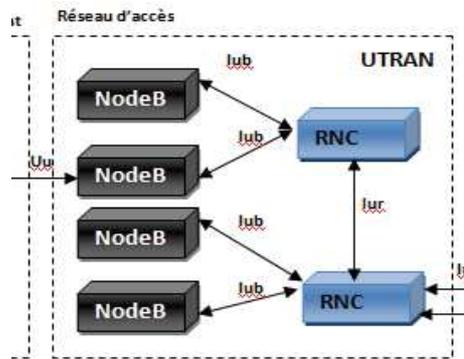


Figure I.15: Architecture du réseau d'accès UTRAN.

La tâche principale du NodeB, qui est une BTS, est d'assurer les fonctions de réception et d'émission radio pour une ou plusieurs cellules du réseau d'accès de l'UMTS avec le MS. Nous pouvons trouver deux types de NodeB :

- Node B avec antenne sectorielle (figure I.16).
- Node B avec antenne omnidirectionnelle (figure I.17).

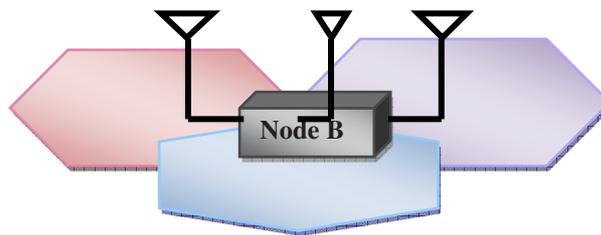


Figure I.16 : Node B avec antennes sectorielles.

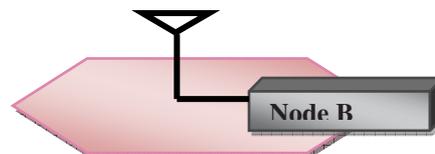


Figure I.17 : Node B avec antenne omnidirectionnelle.

Plusieurs types d'interfaces de communication coexistent au sein du réseau UMTS comme indiqué sur la figure I.13 :

- **Uu** : Interface entre équipement usager et le réseau d'accès UTRAN. Elle permet la communication avec l'UTRAN via la technologie CDMA.
- **Iu** : Interface entre le réseau d'accès UTRAN et le réseau cœur de l'UMTS. Elle permet au contrôleur radio RNC de communiquer avec le SGSN.
- **Iur** : Interface qui permet à deux contrôleurs radio RNC de communiquer.
- **Iub** : Interface qui permet la communication entre un NodeB et un contrôleur radio RNC.

Le rôle principal du RNC est de router les communications entre le NodeB et le réseau cœur de l'UMTS. Il constitue le point d'accès pour l'ensemble des services vis-à-vis du réseau cœur.

Concernant le réseau cœur de l'UMTS, il comprend trois parties dont deux domaines :

- Le domaine CS (Circuit Switched) utilisé pour la téléphonie.
- Le domaine PS (Packet Switched) qui permet la commutation de paquets.
- Les éléments communs aux domaines CS et PS

Les domaines CS et PS permettent aux équipements usagers ou MS de pouvoir gérer simultanément une communication paquets et circuits. Ces domaines peuvent être considérés comme des domaines de service. Ce type d'architecture permet de pouvoir créer ultérieurement d'autres domaines de service. Le réseau cœur de l'UMTS comprend les éléments communs suivants :

- Le HLR (Home Location Register)
- Le AuC (Authentication Center)
- L'EIR (Equipment Identity Register)

Le domaine CS comprend plusieurs éléments :

- Le MSC (Mobile-services Switching Center) est en charge d'établir la communication avec l'équipement usager. Il a pour rôle de commuter les données.
- Le GMSC (Gateway MSC) est une passerelle entre le réseau UMTS et le réseau téléphonique commuté PSTN (Public Switched Telephone Network). Si un équipement usager contacte un autre équipement depuis un réseau extérieur au réseau UMTS, la communication passe par le GMSC qui interroge le HLR pour récupérer les informations de l'utilisateur. Ensuite, il route la communication vers le MSC dont dépend l'utilisateur destinataire.

- Le VLR (Visitor Location Register) est une base de données, assez similaire à celle du HLR, attachée à un ou plusieurs MSC. Le VLR garde en mémoire l'identité temporaire de l'équipement usager dans le but d'empêcher l'interception de l'identité d'un usager. Le VLR est en charge d'enregistrer les usagers dans une zone géographique (Location Area) [14].

Le domaine PS est composé de plusieurs modules :

- Le SGSN (Serving GPRS Support Node) a pour rôle d'enregistrer les usagers dans une zone géographique dans une zone de routage RA (Routing Area).
- Le GGSN (Gateway GPRS Support Node) est un outil de passage vers les réseaux à commutation de paquets extérieurs tels que l'internet.

I-5-3-Principes du W-CDMA

L'interface radio de l'UMTS se base sur le W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access) ; mais, le W-CDMA s'articule sur une technique plus ancienne qui est le CDMA (Code Division Multiple Access) que nous verrons dans la suite parce qu'il est important de comprendre la technique du CDMA afin de comprendre les concepts du W-CDMA [8].

Des techniques d'accès multiple sont mises en place de génération à une autre pour permettre à plusieurs utilisateurs de partager efficacement la bande radio disponible. Ces techniques sont :

- Accès Multiple à Répartition en Fréquence AMRF (FDMA : Frequency Division Multiple Access)
- Accès Multiple à Répartition dans le Temps AMRT (TDMA : Time Division Multiple Access)
- Accès Multiple à Répartition de Code AMRC (CDMA : Code Division Multiple Access)

❖ Accès Multiple à Répartition en Fréquence (FDMA)

La technologie FDMA, ou accès multiple à répartition en fréquences, est comme son nom l'indique, permet de diviser la bande de fréquence en sous bandes de largeur étroite. Chacune est placée sur une fréquence dite porteuse, qui est la fréquence spécifique du canal. Chaque porteuse ne peut transporter que le signal d'un seul utilisateur [12]. Le système de communication AMPS constitue un exemple de système ayant adopté cette technique d'accès multiple. La figure I.18 représente la technique d'accès FDMA.

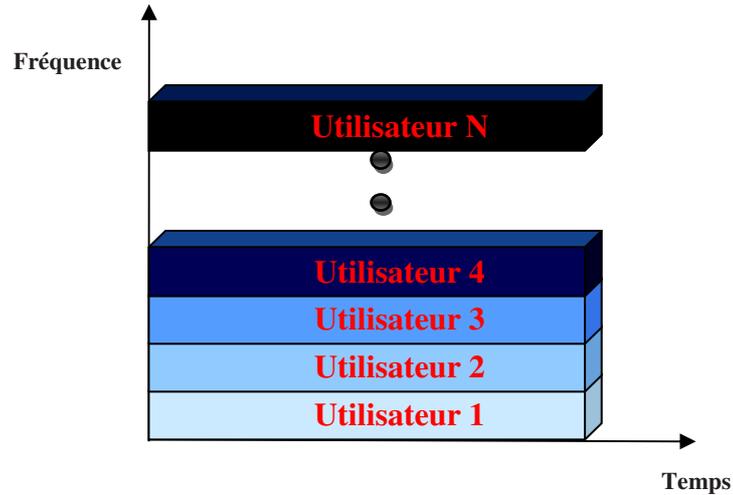


Figure I.18 : Accès multiple à répartition en fréquence (FDMA).

❖ **Accès Multiple à Répartition dans le Temps (TDMA)**

La technique TDMA quant à elle, permet un accès multiple à répartition dans le temps, qui offre la totalité de la bande de fréquences à chaque utilisateur pendant une fraction de temps donnée dénommée slot (intervalle) [12]. L'émetteur de la station mobile stocke les informations avant de les transmettre sur le slot.

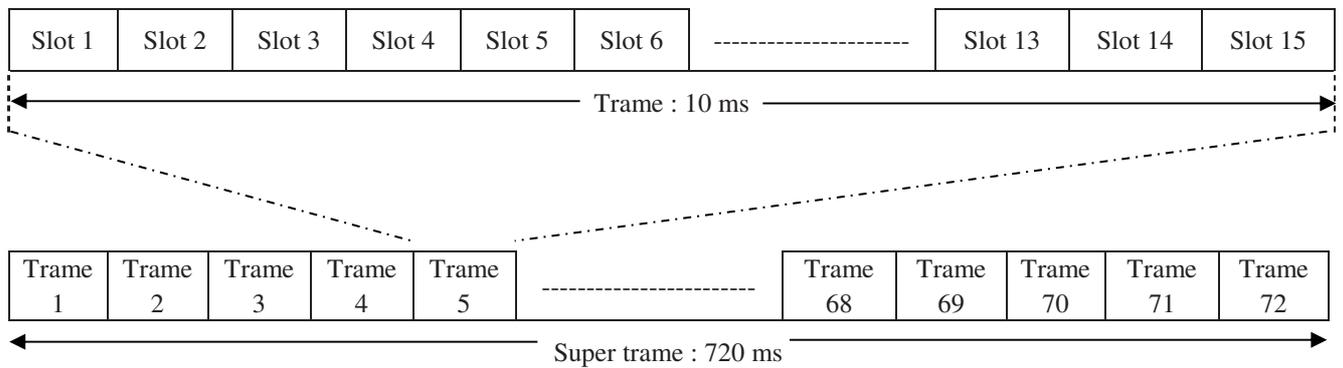


Figure I.19 : Structure de trame de l'UMTS

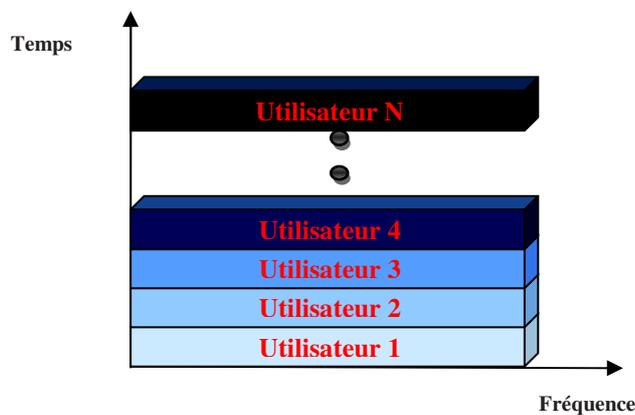


Figure I.20 : Accès multiple à répartition dans le temps TDMA.

Les différents slots sont regroupés en une trame (voir la figure I.19) ; le système offre ainsi plusieurs voies de communication aux différents utilisateurs. La succession des slots dans les trames forme le canal physique de l'utilisateur comme l'illustre la figure I.20. Le récepteur enregistre les informations à l'arrivée de chaque slot et reconstitue le signal à la vitesse du support de transmission.

La technologie TDMA présente toutefois certaines limites :

- Elle exige un pic en puissance lors de la transmission sur le lien montant, ce qui réduit considérablement son autonomie.
- Elle nécessite la synchronisation du signal à la réception pour délimiter les trames et extraire les messages.

Le TDMA s'applique principalement à la transmission de signaux numériques, contrairement au FDMA conçu pour une transmission analogique. Toutefois, la combinaison des deux techniques est envisageable. La figure I.21 illustre une bande de fréquences déjà divisée par le FDMA en sous bandes centrées autour de différentes porteuses. Chaque sous bande est ensuite partagée en slots, suivant la technique TDMA, ce qui permet d'augmenter considérablement le nombre des utilisateurs dans le réseau.

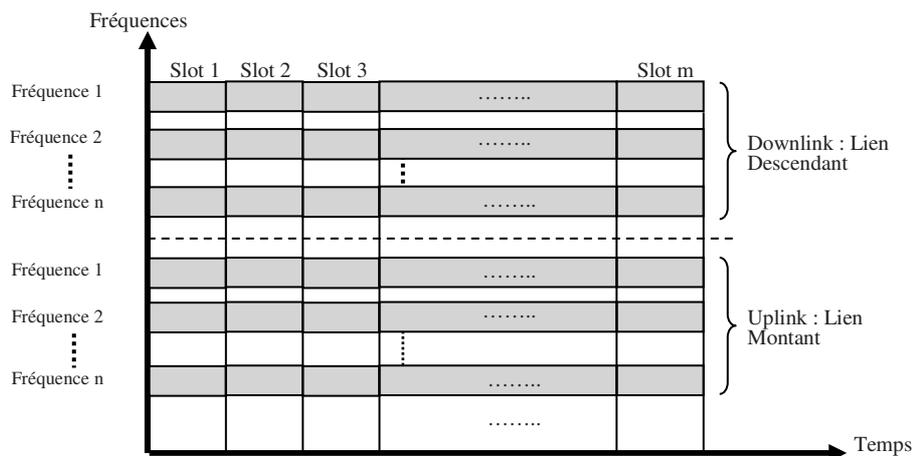


Figure I.21 : Combinaison des deux techniques TDMA et FDMA [12].

❖ Accès Multiple à Répartition de Code (CDMA)

La technique *CDMA*, ou accès multiple à répartition de code, autorise l'allocation de la totalité de la bande de fréquences (figure I.22) de manière simultanée à tous les utilisateurs d'une même cellule. Pour ce faire, un code binaire spécifique est octroyé à chaque utilisateur. L'utilisateur se sert de son code pour transmettre l'information qu'il désire communiquer en format binaire d'une manière orthogonale, c'est-à-dire sans interférence entre les signaux des autres communications. En *CDMA*, chaque utilisateur dispose de toute la largeur de la bande passante. L'attribution de différents codes permet une réutilisation de la même fréquence dans les

cellules adjacentes et cela offre un avantage considérable à cette méthode par rapport aux deux autres techniques *TDMA* et *FDMA*.

L'accès multiple par répartition de code *CDMA* est la technologie d'accès multiple clé utilisée dans les systèmes radio mobile de troisième génération d'aujourd'hui. Elle constitue la base pour le *WCDMA* du 3GPP et les systèmes sans fil *CDMA2000* de 3GPP2 et leurs évolutions respectives pour soutenir le haut débit [14].

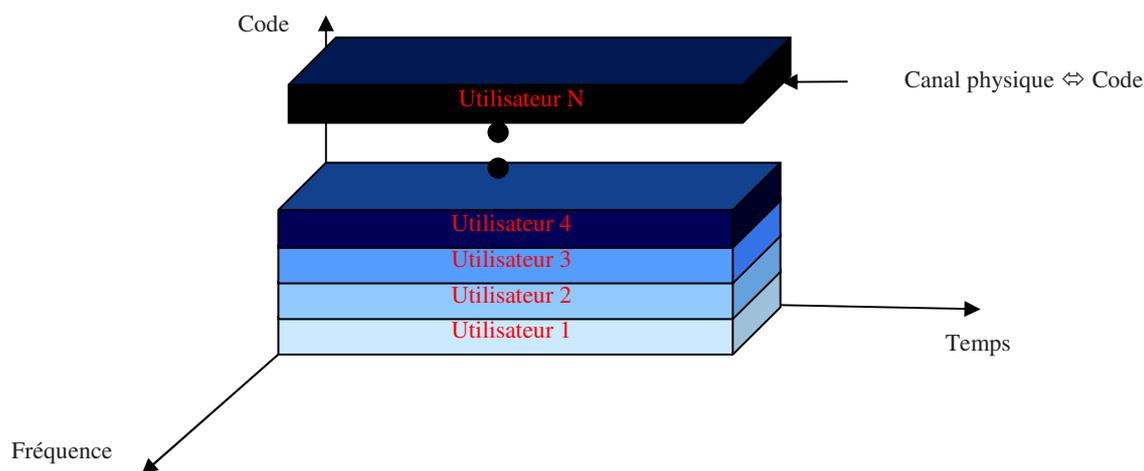


Figure I.22 : Accès Multiple à répartition de code *CDMA*.

I-5-4-Technologie HSDPA (3.5G)

La troisième génération (UMTS) impose des investissements énormes pour des débits qui ne sont pas éloignés de ceux du GPRS et se voit rapidement remplacée par la nouvelle génération 3.5G, appelée HSDPA. Cette nouvelle technologie offre des débits pouvant aller au-delà de 10 Mbps sur le lien descendant. Le HSDPA peut être installé et déployé sans changer radicalement l'architecture de l'UMTS. Il permet du coup aux opérateurs de réaliser cette évolution à moindre coût [15].

L'innovation principale du HSDPA concerne le passage d'une commutation circuit sur l'interface radio, où des ressources radio sont réservées à chaque UE pendant la durée de l'appel, à une commutation par paquets, où la station de base décide dynamiquement du partage des ressources entre les UE actifs. L'allocation dynamique des ressources est effectuée par la fonction d'ordonnancement, en fonction notamment de la qualité instantanée du canal radio de chaque UE, de ses contraintes de qualité de service, ainsi que de l'efficacité globale du système. La commutation par paquets optimise ainsi l'usage des ressources radio pour les services de données [16].

I-5-5-Technologie HSUPA+ (3.75G)

La mise sur le marché de terminaux attractifs, comme les Smartphones, et l'introduction de nouveaux services impliquant une connexion quasi-continue au réseau sont des facteurs qui ont mené à un essor brutal des usages et du trafic à écouler par les réseaux. Cette augmentation du trafic implique un partage des ressources entre les utilisateurs et, dans certains cas, une réduction des débits qui leur sont délivrés. Avec l'augmentation de la charge des réseaux, la qualité de service fournie aux clients se dégrade, ce qui pose un véritable problème aux opérateurs des réseaux mobiles. Deux pistes ont été suivies par le 3GPP afin de répondre à ces contraintes [16] :

- la définition d'évolutions du HSPA, appelées HSPA+ ;
- la définition du LTE.

HSPA+ est un terme qui regroupe plusieurs évolutions techniques visant principalement à améliorer :

- les débits fournis aux utilisateurs et la capacité du système ;
- la gestion des utilisateurs always-on.

La 3.75G est une variante de HSDPA sur la voie montante. HSUPA+ peut être considérée comme le successeur de HSDPA ; elle porte un débit montant (Uplink) à 5,8 Mbps théorique, le flux descendant (Downlink) étant de 14 Mbps comme en HSDPA. L'intérêt de cette technologie est d'offrir la possibilité d'émettre vers d'autres mobiles toutes sortes de documents électroniques (images, vidéos...) favorisant ainsi le développement de l'Internet haut débit [15].

I-6-4^{ème} génération des systèmes de communication mobile

La quatrième génération de système de communication radio mobile a été introduite en l'an 2010. C'est un système basé sur l'utilisation d'une IP qui fournit un accès via une collection d'interfaces radio. La 4G a la capacité de fournir une vitesse de 100 Mbps à 1 Gbps et a une qualité de service (QoS) et une sécurité élevées. Elle offre également à tout moment différents types de services selon les besoins de l'utilisateur où qu'il soit [13].

Les principales caractéristiques de la technologie 4G sont la vidéoconférence, les services basés sur la localisation, la télémédecine, la haute sécurité, la vitesse, la capacité et le faible coût par bit. Sa technologie est combinée avec la technologie existante du réseau sans fil (par exemple OFDM, MC-CDMA, LAS-CDMA) afin d'assurer l'itinérance sans faille d'une technologie à l'autre. Les technologies LTE (Long Term Evolution) et Wi-MAX (Interopérabilité mondiale pour hyperfréquences) sont utilisées pour la quatrième génération.



Figure I.23 : Téléphone portable 4G.

Cependant, Il y a quelques limitations dans la 4G :

- ❖ L'utilisation de la batterie dans le téléphone mobile 4G est plus importante,
- ❖ L'implémentation du matériel est difficile,
- ❖ Le matériel compliqué est nécessaire pour le réseau,

I-6-1-Présentation du 3GPP

Le 3GPP est un holding créé en 1998 à l'initiative de l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute). Le 3GPP a pour but de définir des spécifications permettant l'interfonctionnement d'équipements de constructeurs différents. Contrairement à ce que son nom suggère, le champ d'activité du 3GPP ne se limite pas à la normalisation de systèmes 3G. Son rôle consiste à maintenir et à développer les spécifications des systèmes :

- ❖ GSM/GPRS/EDGE ;
- ❖ UMTS (FDD et TDD) ;
- ❖ LTE, ainsi que celles du réseau cœur EPC.

I-6-2-Système LTE

Le LTE a été prévu dès novembre 2004 comme l'évolution à long terme de l'UMTS (d'où son nom de Long Term Evolution) lors d'un atelier appelé Future Evolution Workshop organisé par le 3GPP. Cette évolution était alors destinée à maintenir la compétitivité de l'UMTS sur un horizon de dix ans. Les travaux sur cette nouvelle norme ont débuté au 3GPP en janvier 2005 avec une étude de faisabilité qui s'est conclue en septembre 2006 avec une définition des grands principes de la technologie LTE. Les travaux de spécification proprement dits se sont alors déroulés jusqu'à décembre 2008. Le LTE est ainsi défini dans la Release 8 du 3GPP. Du fait du saut technologique qu'il représente par rapport au HSDPA, le LTE est considéré comme constituant une quatrième étape de l'évolution des réseaux d'accès mobiles, ou 4G. On peut ainsi véritablement parler d'une révolution de l'UMTS plutôt que d'une évolution [16].

I-6-3-Architecture de LTE/EPC

L'architecture générale de LTE/EPC est constituée de trois domaines (figure I.24) :

- ❖ l'UE,
- ❖ le réseau d'accès, appelé LTE ou E-UTRAN (Evolved-UTRAN),
- ❖ le réseau cœur, appelé EPC (evolved packet core).

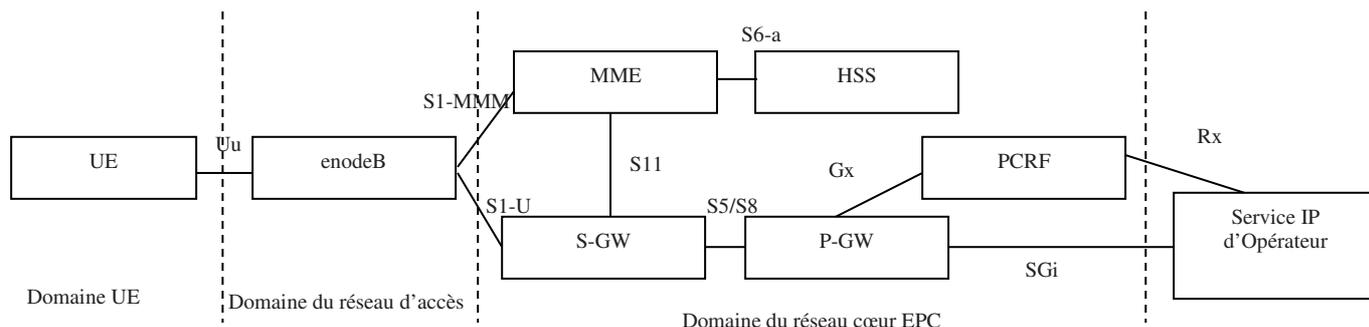


Figure I.24 : Architecture générale de LTE/EPC.

Le réseau cœur est représenté par figure I.25

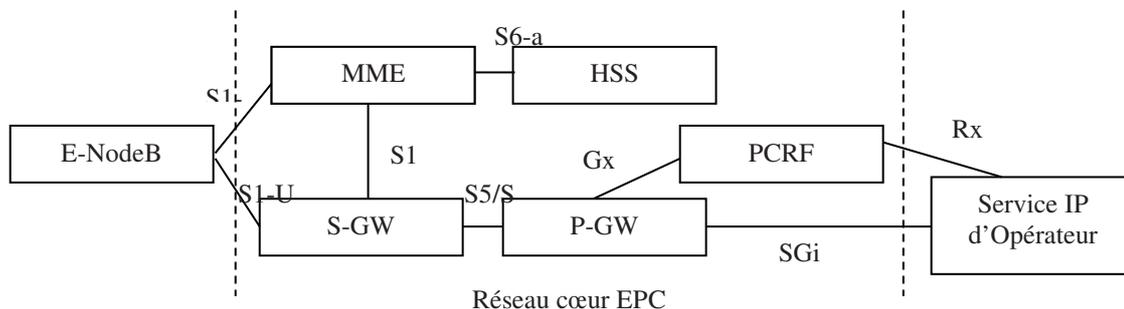


Figure I.25 : Architecture du réseau cœur LTE

Les principaux nœuds logiques de l'EPC selon l'architecture de la figure I.25 sont :

- ❖ S-GW (Serving Gateway) ;
- ❖ MME (Mobility Management Entity) ;
- ❖ P-GW (PDN Gateway) ;
- ❖ HSS (Home Subscriber Server).

En complément à ces nœuds, l'EPC inclut également le nœud PCRF (*Policy Control and Charging Rules Function*) de manière optionnelle. Les interfaces introduites à la figure précédente qui existent entre les nœuds de LTE/EPC sont :

- ❖ S1 -MME entre MME et eNodeB ;
- ❖ S1-U définie entre S-GW et eNodeB ;
- ❖ S5/S8 définie entre P-GW et S-GW ;
- ❖ S6-a définie entre HSS et MME ;
- ❖ S11 définie entre MME et S-GW ;
- ❖ Gx définie entre PCRF et P-GW.

Ces interfaces ne sont pas toutes présentées en détails dans cette thèse.

I-7- 5^{ème} génération des systèmes de communication mobile

La cinquième génération 5G des systèmes de communication radio mobile sans fil permet d'inclure OFDM, MC-CDMA, LAS-CDMA, UWB, réseau-LMDS et IPv6. La 5G est appelée "monde réel sans fil" parce qu'elle ne nécessite aucune limitation [7].



Figure I.26 : Téléphone portable 5G [7].

La couche physique et la couche de liaison de données définissent la technologie sans fil dans 5G. Ces deux couches indiquent que la technologie 5G est similaire à Open Wireless Architecture (OWA) et que le réseau virtuel multi-réseaux sans fil est également maintenu dans les téléphones mobiles de la technologie 5G. Pour ce faire, la couche réseau est subdivisée en couche réseau supérieure pour le terminal supérieur et la couche réseau inférieure pour l'interface et où tout le routage est basé sur des adresses IP et cela devrait être différent pour chaque réseau IP dans le monde entier. Le grand débit est contrôlé en utilisant le protocole OTP (Open Control Protocol) [16]. Cet OTP est pris en charge par la couche de transport et la couche de session dans les réseaux 5G. La couche application est destinée à la gestion de la qualité de service sur différents types de réseaux. Les largeurs de bande bidirectionnelles, la réduction du trafic, la disponibilité égale du réseau à travers le monde, la vitesse de connectivité de 25 Mbps, la bande passante supérieure à 1 Go et le faible coût sont les principales caractéristiques de la technologie 5G [7].

I-8-Concept cellulaire

Le principe de ce système est de diviser le territoire en de petites zones, appelées cellules, et de partager les fréquences radio entre celles-ci. Ainsi, chaque cellule est constituée d'une station de base (reliée au Réseau Téléphonique Commuté, RTC) à laquelle on associe un certain nombre de canaux de fréquences à bande étroite, sommairement nommés fréquences. Ces fréquences ne peuvent pas être utilisées dans les cellules adjacentes afin d'éviter les interférences. Ainsi, on définit des motifs, aussi appelés clusters (constitués de plusieurs cellules), dans lesquels chaque fréquence est utilisée une seule fois. La figure I.27 ci-dessous montre un tel motif.

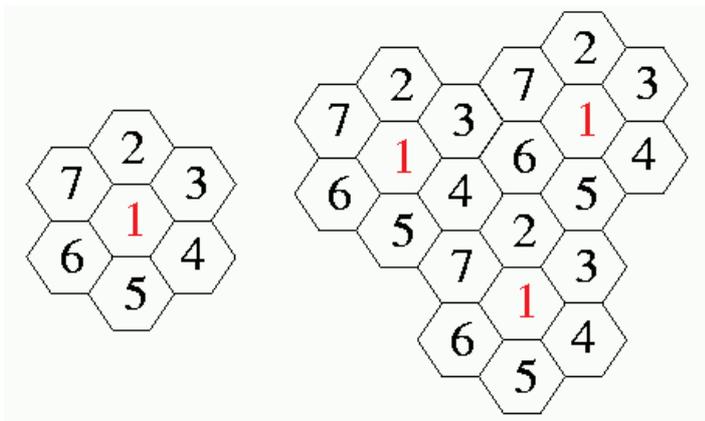


Figure I.27 : Motif élémentaire (à gauche) et un ensemble de motifs dans un réseau (à droite).

Le lien radio de la BTS à la MS est connu comme Downlink (DL) et l'autre direction est connue comme Uplink (UL). Graphiquement, on représente une cellule par un hexagone car cette forme est la plus proche de celle d'un cercle. Cependant, en fonction de la nature du terrain et des bâtiments, les cellules n'ont pas une forme circulaire. Afin de permettre à un utilisateur passant d'une cellule à une autre de garder sa communication, il est nécessaire que les zones de couverture se recouvrent de 10 à 15%, ce qui renforce la contrainte de ne pas avoir une même bande de fréquences dans deux cellules voisines.

Grâce à des mesures permanentes entre un téléphone mobile et une station de base, les puissances d'émission sont régulées en permanence pour garantir une qualité adéquate pour une puissance minimale.

I-8-1-Caractéristiques d'une cellule

Une cellule est contrôlée par un émetteur/récepteur appelé station de base, qui assure la liaison radio avec les terminaux mobiles sous sa zone de couverture. La couverture d'une station de base est limitée par plusieurs facteurs, notamment :

- ❖ La puissance d'émission du terminal mobile et de la station de base ;
- ❖ La fréquence utilisée ;
- ❖ Le type d'antenne utilisé à la station de base et au terminal mobile ;
- ❖ L'environnement de propagation (urbain, rural, ... etc.) ;
- ❖ La technologie radio employée.

Il faut noter que la taille des cellules n'est pas la même sur tout le territoire. En effet, celle-ci dépend :

- ❖ du nombre d'utilisateurs potentiels dans la zone ;
- ❖ de la configuration du terrain (relief géographique, présence d'immeubles, . . .) ;
- ❖ de la nature des constructions (maisons, buildings, immeubles en béton, . . .) et ;
- ❖ de la localisation (rurale, suburbaine ou urbaine) et donc de la densité des constructions.

Ainsi, dans une zone rurale où le nombre d'abonnés est faible et le terrain est relativement plat, les cellules seront plus grandes qu'en ville où le nombre d'utilisateurs est très important sur une petite zone et où l'atténuation due aux bâtiments est forte. Un opérateur devra donc tenir compte des contraintes du relief topographique et des contraintes urbanistiques pour dimensionner les cellules de son réseau. On distingue pour cela quatre services principaux :

- ❖ Le service Outdoor : qui indique les conditions nécessaires pour le bon déroulement d'une communication en extérieur.
- ❖ Le service Incar : qui tient compte des utilisateurs se trouvant dans une voiture. On ajoute typiquement une marge supplémentaire de 6 décibels Watt [dBw] dans le bilan de puissance pour en tenir compte.
- ❖ Le service Indoor : qui permet le bon déroulement des communications à l'intérieur des bâtiments. Cette catégorie de service se subdivise à son tour en deux types :
 - Le Soft Indoor : lorsque l'utilisateur se trouve juste derrière la façade d'un bâtiment ;
 - Le Deep Indoor : lorsqu'il se trouve plus à l'intérieur.

I-8-2-Objectifs du concept cellulaire

Le concept cellulaire se base sur deux principes fondamentaux :

- ❖ Changement dynamique de fréquence du poste d'un abonné pendant une communication en fonction du déplacement du mobile dans le réseau ;
- ❖ La réutilisation des fréquences (sans créer d'interférence) dans les cellules suffisamment éloignées l'une de l'autre pour :

- fournir potentiellement une capacité illimitée avec des bandes de fréquences peu importantes.
- Augmenter le nombre de communications simultanées dans le réseau.
- Elargir la zone de couverture.
- Réutilisation des fréquences et des canaux sur les mêmes fréquences porteuses pour couvrir des zones différentes.

I-8-3-Types de cellules

On distingue plusieurs types de cellules en fonction de leur rayon de couverture lié à la puissance d'émission de la station de base et de leur usage par les opérateurs (figure I.28) :

-Les cellules macro : sont des cellules larges, dont le rayon est compris entre quelques centaines de mètre et plusieurs kilomètres. Les cellules macro couvrent l'ensemble d'un territoire de manière régulière et forment ainsi l'ossature de la couverture d'un réseau mobile. Elles sont contrôlées par des stations de base macro dont la puissance est typiquement de 40 W (46 dBm) pour une largeur de bande de 10 MHz. Leurs antennes sont placées sur des points hauts, comme les terrasse d'immeubles ou des pylônes.

-Les cellules micro : sont des cellules de quelques dizaines à une centaine de mètres de rayon, destinées à compléter la couverture des cellules macro dans des zones denses ou mal couvertes. Les stations de base associées sont appelées des stations de base micro et leur puissance est de l'ordre de 10 W (40 dBm). Leurs antennes sont typiquement placées sous le niveau des toits, généralement en façade des bâtiments.

-Les cellules pico : poursuivent le même but que les cellules micro, mais sont associées à des puissances plus faibles de l'ordre de 0,25 à 5 W (24 à 37 dBm). Elles peuvent notamment servir à des hots spots ou de grandes zones intérieures (indoor) tels que des aéroports ou des centres commerciaux. Les antennes des stations de base pico peuvent être placées comme celles des stations de base micro, ou au plafond ou contre un mur à l'intérieur des bâtiments.

-Les cellules femto : sont de petites cellules d'une dizaine de mètres de rayon, principalement destinées à couvrir une habitation ou un étage de bureaux. Elles sont associées à des puissances faibles de l'ordre d'une centaine de mW (20 dBm) et sont généralement déployées à l'intérieur des bâtiments.

Chaque station de base requiert un site radio, habituellement acquis ou loué par l'opérateur, à l'exception des stations de base femto qui peuvent être déployées par l'utilisateur. On notera que seules les cellules macro sont généralement déployées selon un motif cellulaire et les autres types de cellules viennent, dans la plupart des cas, seulement compléter localement la couverture formant alors un réseau dit hétérogène [19].

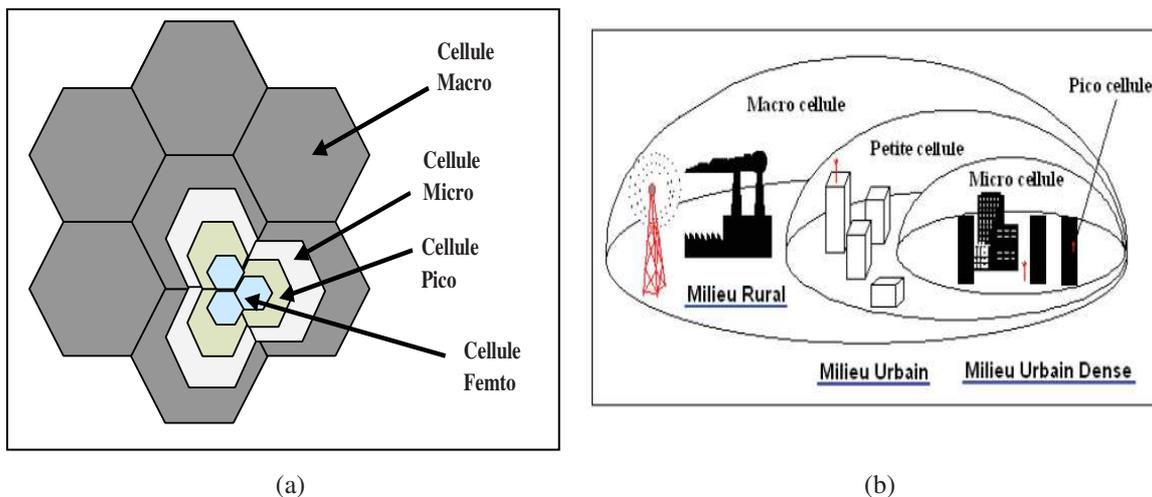


Figure I.28 : (a) Les différents types de cellules du réseau en nid d'abeille (b) Les différentes échelles du réseau radio mobile [18].

Pour minimiser le nombre de stations de base macro, on utilise régulièrement la tri-sectorisation qui consiste à mettre en œuvre un système d'émission/réception dans trois directions distinctes. Ces dernières sont accomplies en utilisant des antennes directionnelles où chaque antenne pointe dans une direction donnée. La figure I.29 présente une topologie commune de réseau macrocellulaire et illustre le concept de tri-sectorisation ; chaque flèche représente la direction de pointage d'une antenne et chaque hexagone représente une cellule. Dans le cas de la tri-sectorisation, une cellule est aussi appelée un secteur. Notons que dans la réalité, notamment en milieu urbain, les cellules ne sont pas disposées selon un motif aussi régulier et peuvent être de formes variées en fonction de la propagation locale [19].

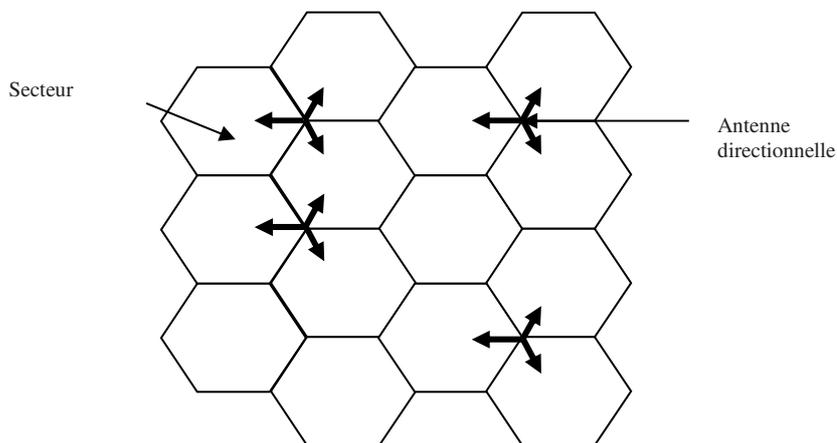


Figure I.29: Topologie d'un réseau cellulaire trisectorisé à structure hexagonale.

I-8-4-Handover et macro diversité

Contrairement aux réseaux téléphoniques fixes où l'abonné ne change pas d'endroit, les réseaux radio mobiles voient cette position sujette à des modifications continues ; ce qui mène à deux conséquences :

- ❖ Pour établir une communication, il faut savoir dans quelle cellule l'abonné se trouve. C'est la fonction de gestion de localisation.
- ❖ Il doit y avoir continuité de la communication lorsque l'abonné passe d'une cellule à une autre (transfert intercellulaire, communément appelé handover).

Si la mobilité d'un abonné s'étend à plusieurs pays, des accords de roaming doivent alors être passés entre les différents opérateurs pour que les communications d'un abonné étranger soient prises en charge. C'est pour cela le concept du handover apparaît et la figure I.30 illustre cette notion.

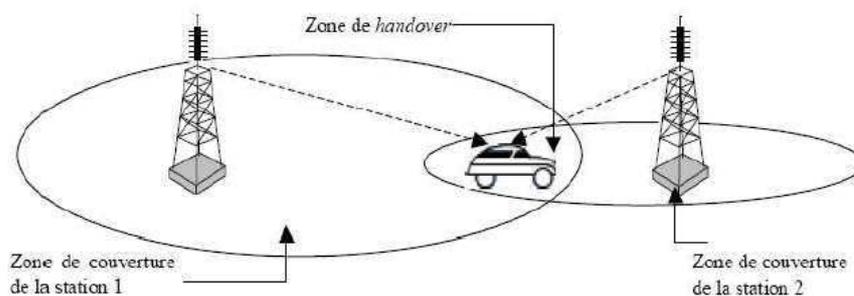


Figure I.30: Zone de handover entre deux cellules [17].

Le handover est un mécanisme fondamental dans la communication cellulaire. Globalement, c'est l'ensemble des opérations mises en œuvre permettant à une station mobile de changer de cellule sans interruption de service. Ce mécanisme permet l'itinérance entre cellules ou opérateurs [19].

a) Nécessité d'un handover

Il existe trois cas où un handover est nécessaire :

- ❖ Rescue Handover : la station mobile quitte la zone couverte par une cellule pour une autre. C'est la qualité de transmission qui détermine la nécessité du handover, qualité indiquée par le taux d'erreur, l'intensité du signal reçu, le niveau d'interférences et le délai de propagation [20].
- ❖ Confinement handover : la station mobile subirait moins d'interférences si elle changeait de cellule (les interférences sont dues en partie aux autres stations mobiles dans la cellule). La station mobile écoute en permanence d'autres cellules pour mesurer la qualité d'une connexion à ces dernières. De plus, chaque station mobile est synchronisée avec plusieurs BTS pour être prête en cas de handover [20].
- ❖ Traffic Handover : le nombre de stations mobiles est trop important pour la cellule, et des cellules voisines peuvent accueillir de nouvelles stations mobiles. Cette décision nécessite de connaître la charge des autres BTS [20].

b) Types d' handover

Le type de handover dépend de la situation de la station Mobile MS si cette dernière ayant déjà un canal dans une cellule donnée qui est gérée par un BSC et MSC donnés et reçoit un nouveau canal. Il existe quatre types de handover :

Handover Intra-BSC : le nouveau canal est attribué à la MS dans la même cellule ou une autre cellule gérée par le même BSC [20].

Handover Intra-MS : le nouveau canal est attribué à la MS mais dans une cellule gérée par un autre BSC, lui-même étant géré par le même MSC [20].

Handover Inter-MS : le nouveau canal est attribué dans une cellule qui est gérée par un autre MSC [19].

Handover Inter-Système : un nouveau canal est attribué dans un autre réseau mobile que celui qui est en charge de la MS (exemple entre un réseau GSM et un réseau UMTS) [20].

c) Roaming

Le roaming permet aux abonnés d'accéder à leurs services de téléphonie mobile depuis différents réseaux au fur et à mesure de leur déplacement. Cette option est spécialement utile en déplacement dans un pays étranger. Cette chance est possible du fait que le réseau mobile GSM conserve à chaque instant une information sur la zone de localisation de l'abonné mobile. Donc, le terme *roaming* désigne aujourd'hui le *roaming* international.

- ❖ *Roaming régional* : L'abonné a le droit de roamer uniquement sur une région donnée. Dans les premiers temps du réseau GSM, certains opérateurs mobiles avaient prévu de proposer des offres restreintes à une région. Avec le succès du GSM et la baisse des coûts du mobile, ce type d'offre a disparu. Dans les pays de grande extension géographique et constitués de plusieurs états (USA, Russie, Inde, Chine, etc.), ce genre de *roaming* peut exister mais est à la limite de la notion entre *roaming* régional et *roaming* national [20].
- ❖ *Roaming national* : En français, le "roaming national" peut se traduire par itinérance nationale. L'abonné peut roamer ou se localiser d'un opérateur mobile à un autre dans un même pays. Une autre exception profite aux opérateurs 3G ayant une licence UMTS (opérateurs 3G) n'ayant pas de licence d'opérateur GSM. Dans ce cas, pour des raisons de compétition loyale imposée par le régulateur national, un accord de *roaming* national limité géographiquement et dans le temps est trouvé entre l'opérateur 3G et un des opérateurs GSM [20].
- ❖ *Roaming international* : L'abonné peut aller *roamer* sur un opérateur d'un pays étranger. Pour permettre aux abonnés d'un opérateur mobile de passer en toute transparence d'un réseau de communication sans fil à un autre, les deux opérateurs mobiles passent un accord à plusieurs niveaux. Tous les opérateurs téléphoniques mobiles surviennent à faire

des accords d'un pays à l'autre pour permettre à leurs clients d'être desservie en continuité où qu'ils se trouvent. L'accord est toujours mutuel pour permettre aux abonnés de chaque opérateur d'aller *roamer* sur le réseau de l'autre opérateur dans le pays où l'opérateur ce trouve.

I-9-Planification du réseau cellulaire

Pour planifier un réseau cellulaire, d'une façon générale il faut respecter les principes sur lesquelles le réseau est basé, parmi ces principes on cite :

- ❖ Diviser le territoire en cellules,
- ❖ Chaque cellule contient une BTS qui la desserve,
- ❖ L'ensemble des cellules forment un seul réseau
- ❖ Les mêmes canaux de fréquences sont réutilisés dans plusieurs cellules.

Les dynamismes à garantir sont :

- ❖ Fournir une couverture,
- ❖ Garantir une capacité grâce à la réutilisation des ressources fréquentielles,
- ❖ Permettre une localisation automatique des stations mobiles (assurer un roaming/ international roaming),
- ❖ Permettre le handover.

I-10-Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur les systèmes radio mobiles à travers les diverses évolutions qu'ont connues les générations des systèmes radio mobiles existantes, ainsi que leurs architectures et leurs limitations.

Le concept cellulaire est très important ; il a été abordé ici avec ses objectifs et ses caractéristiques. Il consiste à découper les zones géographiques en cellules assurant ainsi une couverture radio dans la zone servie. , ainsi que les différents type de cellules qui ce base sur le rayon de couverture est qui est liée à la puissance d'émission de la station de base installée, et aussi du nombre d'usagers occupant cette cellule toute ces aspect nous permettent d'avoir une idée générale sur les systèmes radio mobiles.

On a vu aussi l'importance du mécanisme du handover, ainsi que ses différents types, dans la prise en charge de l'abonné lorsque celui-ci se déplace d'une cellule à une autre, d'un opérateur à un autre, et d'une région à une autre. La planification du réseau cellulaire, qui est une étape préliminaire à franchir avant toute mise en œuvre d'un système radio mobile, a été également abordée.

Chapitre II

Développement de modèles de propagation

II-1-Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'expliciter une vue sur les modèles de propagation pour les systèmes radio mobile. La présentation des différentes technologies, les différents types de modélisation et les outils utilisés par les ingénieurs des télécommunications pour le dimensionnement et la mise en place d'un réseau de téléphonie mobile seront formulés.

Cet état de fait va nous donner la possibilité de mettre en évidence les points où nous pouvons apporter des améliorations afin d'optimiser la modélisation radioélectrique. Cette optimisation a pour but d'apporter des améliorations aux performances des systèmes radio mobile ainsi que la qualité de service et elle peut se faire par une meilleure prise en compte du milieu où la propagation aura lieu ainsi que du modèle à utiliser pour telle zone ou telle zone.

II-2- Services radioélectriques importants

Les techniques de communications radioélectriques utilisées dans les systèmes radio mobiles se distinguent par le type d'ondes radioélectriques utilisées ainsi que par le mode de diffusion de ces ondes.

Les services de systèmes radioélectriques peuvent être classifiés en 6 grands domaines selon le type de technologies employées de télécommunication radio et selon les caractéristiques du récepteur et son type (parabole, antenne relais, antenne de téléphone portable, ... etc.), et selon que le récepteur soit fixe ou mobile. Le tableau II.1 présente les principales catégories des services radioélectriques.

Dans notre travail de thèse, nous nous intéresserons aux services radio mobiles terrestres utilisés dans les réseaux de télécommunications mobiles de type GSM et UMTS.

Tableau II.1 : Les principaux types de services radioélectriques

Service	Activité
Terrestres fixes	Services de radiocommunication entre points fixes (téléphonie en ondes courtes, faisceaux hertziens, etc.)
Fixes par satellite	Services de radiocommunication entre points fixes utilisant une ou plusieurs liaisons par satellite
Radio mobiles terrestres	Services entre deux points dont l'un au moins se déplace pendant la communication (le mobile peut être terrestre, en zone urbaine ou rurale, aéronautique ou maritime)
radiodiffusion	Services de radiocommunication caractérisés par le fait que les points de réception forment un public réparti sur un vaste territoire (ex : télévision hertziennne, télévision directe par satellite, radiodiffusion sonore)
Radiorepérage	Services ayant pour but de repérer et/ou localiser un objet à la surface de la terre (repérage de skieurs enfouis sous une avalanche, les concurrents d'une course, une flotte de véhicules d'urgence)
Services de collecte de données	Services destinés à collecter des données recueillies en des points fixes ou mobiles (pour la navigation maritime : le système ARGOS ; pour les géomètres : le théodolite couplé à un GPS et à un Système d'Information Géographique)

II-3- Exigences des opérateurs des systèmes de radio mobile

Les opérateurs des systèmes radio mobile, lorsqu'ils décident d'installer un nouveau réseau, se posent les questions suivantes concernant la propagation des ondes radioélectriques dans la zone à couvrir :

- *Quelle est le type des messages à transmettre ?*

Cette question est en réalité complexe, puisqu'elle vise à connaître aussi bien le type de message (son, données, images fixes ou animées) que la quantité d'information à transmettre [26].

- *Quelle est la distribution spatiale des points d'émission et de réception ?*

Par répartition, il faut entendre à la fois les distances entre les émetteurs et les récepteurs potentiels ainsi que leurs localisations géographiques. Cette question est décisive pour le choix de la gamme des fréquences à utiliser et le type de cellule.

- *Quels sont les effets de propagation d'ondes radio auxquels on peut s'attendre ?*

Les techniciens et ingénieurs spécialistes de la propagation devront pouvoir dresser une liste qualitative des effets de propagation auxquels le futur système de télécommunication sera

soumis (variation des conditions ionosphériques, prise en compte des trajets multiples, ... etc.) et permettre ainsi aux concepteurs du système de télécommunication une première estimation des points techniques qui devront s'adapter aux variations spatiales et temporelles de la propagation des ondes [26].

-Quelles est le nombre d'abonnés utilisant cette zone ?

Cette question traite le coté finance pour voir le volume de l'investissement.

II-4 - Développement des modèles de propagation

II-4-1 Objectif de la modélisation de la propagation des ondes radioélectriques

L'étude des ondes électromagnétiques se préoccupe du transport de l'énergie électromagnétique d'un point à l'autre d'un milieu matériel caractérisé par ses propriétés électriques.

Les usages pratiques des ondes électromagnétiques ont donné naissance à de nombreuses applications aussi bien diverses que variées. Plus le temps passe, plus ces applications se diversifient et se raffinent : télécommunications mobiles, télé localisation, télévision, radar, télédétection spatiale [26].

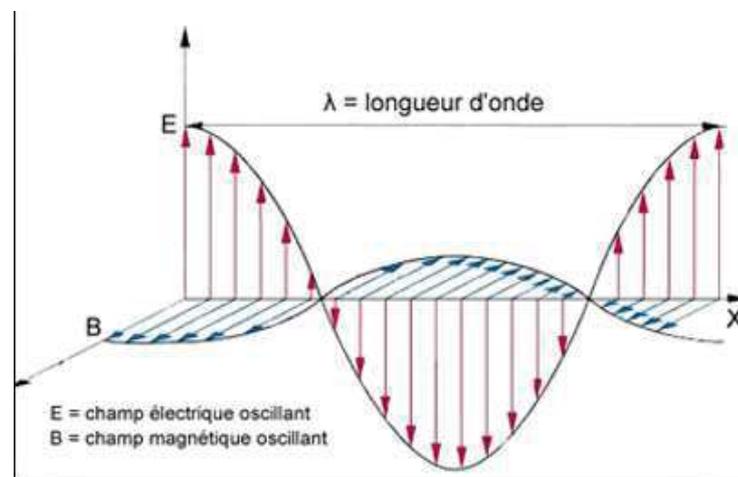


Figure II.1 : Représentation de la propagation d'une onde électromagnétique.

L'innovation des techniques de télécommunications radioélectriques a fait bouleverser la conception des modèles de propagation d'ondes radio ; et ceci est vrai pour chaque application (liaisons terrestres fixes, liaisons fixes par satellite, liaisons radio mobiles) séparément.

Donc, dans le domaine de la radio mobile, la modélisation est établie pour différents objectifs : soit pour dimensionner ou planifier les systèmes radio mobile pour pouvoir

déterminer le nombre d'antennes relais nécessaires dans une liaison point à point émetteur – récepteur pour avoir une bonne couverture de la zone concernée ; ce qui permet ainsi une optimisation des investissements des opérateurs des systèmes radio mobile, soit de déterminer leur couverture spatiale qui indiquera la portée d'une antenne relais en milieu urbain dense.

II-4-2 Canal de propagation

Dans les systèmes de télécommunication sans fils, l'information est transportée par une onde électromagnétique se propageant à travers un canal de propagation. La propagation des ondes radios dans les canaux sans fils terrestres est un phénomène compliqué caractérisé par une multitude d'effets [21-24] qui font varier la puissance du signal mesuré.

Une liaison radioélectrique se compose essentiellement de cinq éléments comme le montre la figure II.2.

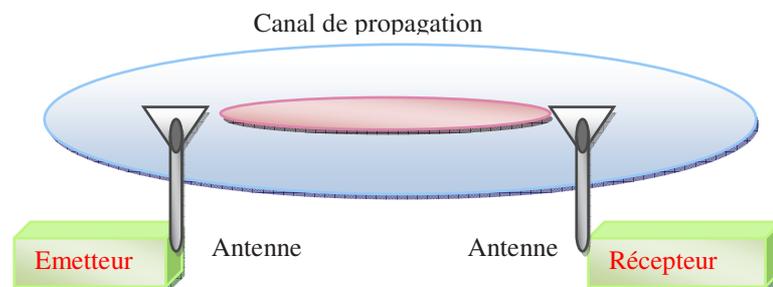


Figure II.2 : Représentation d'une liaison radio électrique.

Cette liaison contient :

- Deux éléments électroniques qui sont l'émetteur et le récepteur
- Le canal de propagation qui est le support de transmission
- Deux antennes qui font office d'interface entre le canal de transmission et l'émetteur et le récepteur.

Donc on peut définir le canal de propagation comme le milieu à travers lequel les ondes radioélectriques se propagent. Ce milieu peut correspondre à l'atmosphère terrestre, à l'ionosphère ; ou bien encore, pour les systèmes radio mobiles, à l'environnement géographique traversé (zone rural, urbain, suburbain).

II-4-3 Nature des zones concernées

Le type de zone traversée par les ondes radio est l'élément fondamental de toute étude de propagation. Dans le cas des systèmes radio mobiles, la zone de couverture a un impact important sur la propagation des ondes radio. L'ionosphère, les conditions atmosphériques, le

climat, ... etc. ont très peu d'impact sur la propagation du signal radio pour les ultras hautes fréquences (comprises entre 300 MHz et 3 GHz) puisque le phénomène de propagation de ces ondes repose sur la taille des objets traversés : pour les ondes UHF, la longueur d'onde étant de 30 centimètres, tous les éléments de petite taille, n'auront aucun impact sur la propagation du signal radio. Par contre les objets de 30 centimètres et plus (mobilier urbain, bâti, troncs d'arbres, etc.) vont considérablement atténuer la propagation du signal jusqu'à l'affaiblir complètement.

Aux fréquences supérieures à 30 MHz, l'effet du terrain et du sursol surgit. Ainsi, la géométrie du sol (topographie, orographie, ... etc.) et du sursol (bâtiments, mobilier urbain, routes, végétation, etc.) auront la plus grande influence. Par ailleurs, les trajets multiples sont sensibles à la réflectivité de certaines zones comme les lacs et les flancs de montagnes en zone rurale ainsi que les façades des bâtiments en zone urbaine. Tous ces aspects sont des éléments décisifs dans l'étude et la modélisation de la propagation des ondes radioélectriques, notamment pour les systèmes radio mobiles GSM 900-1800 MHz et UMTS 1900 MHz.

II-4-4 Développement de modèle

Généralement, pour le développement de modèle, l'étude scientifique s'appuie sur la modélisation des effets réels. Dans ce qui suit, il nous a été nécessaire d'analyser les différentes manières de modéliser les phénomènes de propagation d'ondes radio afin de bien mesurer ce qu'on peut attendre de tel ou tel type de modèle ou encore les différents éléments dont il est nécessaire d'améliorer la prise en compte.

a) Eléments que comporte un modèle

Dans ce qui suit, il est nécessaire de faire un tour sur les différents éléments que comporte un modèle.

❖ Paramètres et/ou variables d'état :

Du point de vue de l'informatique, en algorithmique, il n'y a pas de différence significative entre paramètre et variable ; on peut dire qu'un paramètre est plus difficile à faire varier qu'une variable. Par contre, les modèles en Analyse Spatiale font bien la différence entre les paramètres du modèle, qui permettent d'ajuster le modèle, et les variables qui correspondent aux informations en entrée du modèle. Les variables existent donc par elles-mêmes, alors que les paramètres font partie intégrante du modèle et ne peuvent exister en dehors [23].

❖ Variables endogènes :

Ce sont les variables qui amènent leur valeur du système lui-même ; elles sont exigées par le type de zone à couvrir. En propagation du signal la hauteur des immeubles, le type du sol ainsi que la nature du couvert végétal en font partie.

Par ailleurs, deux modèles d'un même système peuvent se distinguer par leurs variables respectives. Un cas particulier important est celui de la réduction d'échelle. En propagation

radio, il est plus immédiat d'aborder les systèmes par leur aspect microscopique. Le passage à des grandeurs d'état macroscopique reste à faire dans la plupart des modèles de propagation d'ondes radio, puisque l'étude de la mobilité des personnes est un exemple d'une réduction d'échelle efficace. On peut ainsi passer de l'échelle microscopique [24], qui correspond à l'étude de la mobilité d'un individu qui est considéré comme un "micro objet" (par exemple le parcours d'un individu à pieds en ville), à l'échelle macroscopique, correspondant à l'étude de la mobilité d'un groupe d'individus dans un espace plus vaste (un quartier, un tronçon de route, etc.) [23].

Certaines variables ne sont pas ou laborieusement mesurables et ne représentent donc pas une grandeur physique observable. En effet, les effets saisonniers, les effets climatiques, la végétation sont rarement estimables en modélisation radio. Il n'empêche que leur prise en compte est souvent indispensable pour avoir un modèle plus proche de la réalité que possible.

Les variables d'entrée peuvent être déterministes ou aléatoires. Par exemple, la distance est déterministe alors que le taux d'ozone dans l'air est aléatoire.

❖ Variables de sortie :

Ce sont les grandeurs que l'on cherche à modéliser, autrement dit les informations que l'on obtient en sortie du modèle. Ce sont les performances du système qu'on cherche à attendre.

❖ Expressions du modèle :

Dans cette phase le problème est résolu, le modèle est construit puisque la solution analytique ou numérique au problème posé est déduite. Le modèle permet ainsi d'avoir les variables de sortie recherchées à partir des variables d'entrée.

Les différentes méthodes de résolution de problème mise en œuvre dans un modèle, peuvent être de nature très différente : méthodes conceptuelles, mathématiques, empiriques, statistiques, informatiques, spatiales, ... etc. Au niveau des résultats obtenus, on trouve toutes les situations intermédiaires allant des simples solutions analytiques (par exemple l'affaiblissement en fonction de la distance Emetteur-Récepteur) jusqu'à des solutions numériques qui peuvent parfois être complexes [18].

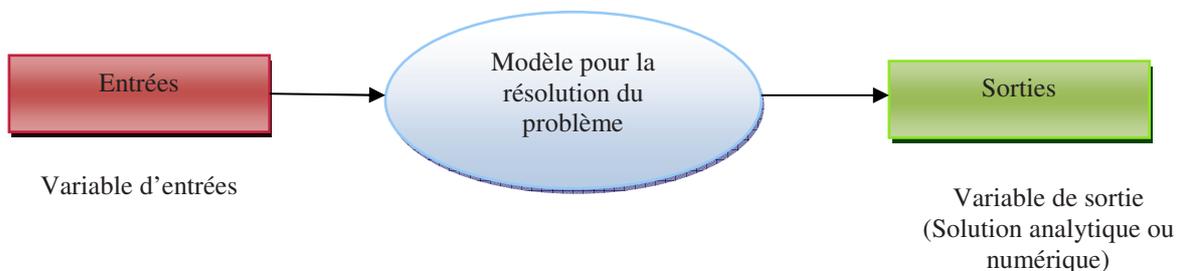


Figure II.3 : Les différentes étapes de résolution d'un problème par le développement d'un modèle.

b) Type de modélisation en téléphonie radio mobile

En téléphonie radio mobile, on distingue trois grandes catégories de modèles :

❖ Modèles descriptifs :

Ce modèle repose sur la description de la relation qui existe entre les variables caractéristiques d'un phénomène du système étudié. Donc, ce modèle consiste à représenter et/ou décrire ce que nous observons. Ce type de modèles est *a priori* très convenable pour les ingénieurs en radio mobile puisqu'il vise à retracer la réalité. Mais ces modèles présentent généralement l'inconvénient d'être établis à partir de bases de données trop restreintes ou à partir de généralités, ce qui rend leur validité relative.

❖ Modèles explicatifs :

Le but de ce modèle est de trouver les logiques qui peuvent expliquer les variations et/ou l'intensité du phénomène de propagation sur le comportement du système radio mobile. Ainsi, on recherche les causes et par l'utilisation d'outils théoriques on prétend rendre compte des observations. Le modèle explicatif trouve sa justification dans l'interprétation des résultats expérimentaux [18].

❖ Modèles prévisionnels :

Le modèle prévisionnel ou de prédiction se base sur la prédiction de la valeur de la grandeur étudiée. Un tel modèle ne peut être que causal. Ce type de modèle est celui sur lequel l'ingénieur en systèmes radio mobiles concentrera ses efforts, puisque c'est celui qui est le plus habituellement utilisé par les concepteurs des systèmes radio mobiles.

II-5- Conception d'un modèle de propagation pour les systèmes radio mobiles

Dans le souci d'offrir un service de téléphonie radio mobile de bonne qualité à leurs abonnés, les opérateurs de téléphonie mobile mènent des études techniques pour améliorer leurs systèmes. Pour ce faire, les services techniques de ces concepteurs réalisent des mesures du signal radio sur le terrain et mettent au point les outils d'ingénierie informatique permettant de prédire et visualiser la couverture radioélectrique pour une zone donnée. Pour cela, ils utilisent des modèles de prédiction de propagation des ondes radioélectriques dans le but de les aider à améliorer la qualité (couverture, transmission) du réseau radio mobile.

II-5-1-Aspect général

Les modèles de propagation sont utilisés lors de la conception d'une interface radio pour optimiser les performances du système et également lors de la planification sur le terrain pour déterminer la couverture radioélectrique.

Les modèles seront implantés dans des outils d'ingénierie, comme des logiciels de simulation, comme illustré par la figure II.4 du logiciel Atoll utilisé par les opérateurs en Algérie pour la 2^{ème} génération GSM pour la planification de leurs réseaux. Ils permettent de prédire la couverture radio associée à chaque émetteur. En effet, la prédiction de couverture est fondamentale car elle conditionne à la fois les critères radios (on peut prédire le taux d'interférence et le niveau de signal) et les critères trafic (dimensionnement du nombre de canaux).

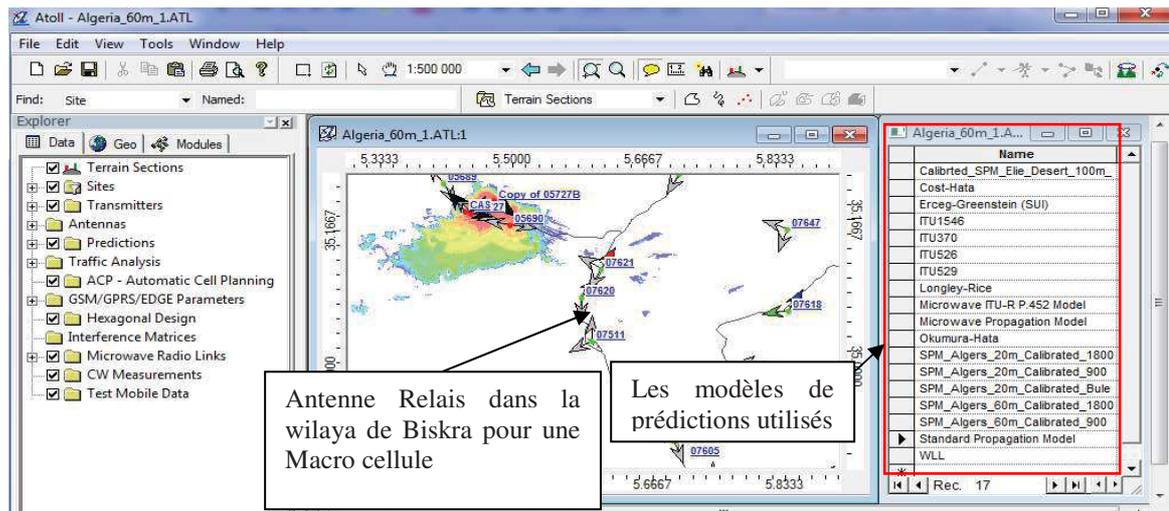


Figure II.4 : Interface du logiciel Atoll (a) une zone géographique de la wilaya de Biskra (b) Les différents modèles de prédictions utilisés

Les modèles sont très dépendants des bases de données géographiques comportant des éléments relatifs à la topographie et aux types d'occupation du sol. Ceci est du au fait que la manière dont les ondes radio UHF vont se propager dans un espace donné est intimement liée aux obstacles (bâtiments, troncs d'arbres, flancs de montagnes, ... etc.) rencontrés le long du canal de propagation. A partir de cela, la modélisation des objets géographiques est essentielle dans tout modèle de propagation des ondes UHF.

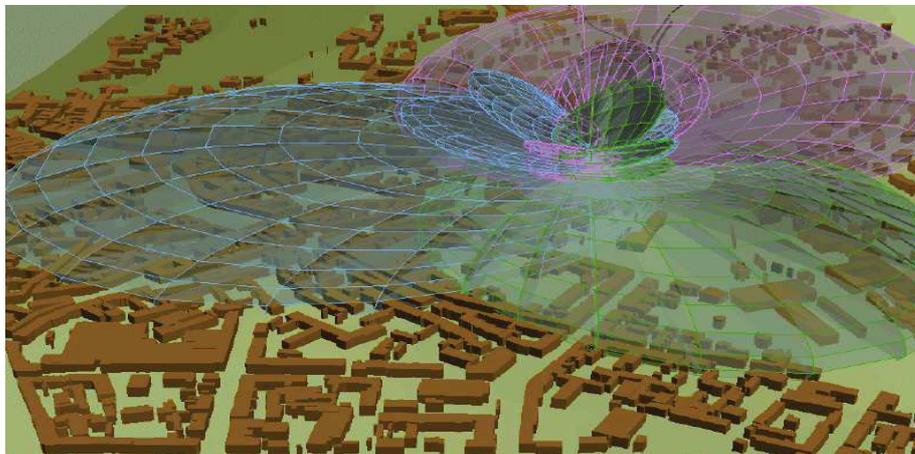


Figure II.5 : Visualisation en 3D des ondes radioélectriques se propagent dans une zone urbaine dense.

La figure II.5 permet de visualiser en trois dimensions la manière dont les ondes radioélectriques se propagent dans une zone urbaine dense à partir d'une antenne relais. On voit clairement les différents lobes de rayonnement pour chacune des trois antennes grâce à une modélisation graphique 3D d'un logiciel qui permet de mettre en œuvre le modèle de propagation des ondes radioélectriques issues du modèle de Hata. Ces diagrammes d'antennes 3D sont obtenus grâce au Système d'Information Géographique ArcView édité par la société ESRI.

II-5-2 – Définition d'un modèle de propagation

Un modèle de propagation des ondes radio est un modèle mathématique qui nous donne la possibilité d'avoir une simulation du canal de propagation entre un émetteur et un récepteur. Ce modèle est ultérieurement inséré dans un algorithme ensuite dans un programme informatique.

Il nous facilite la prédiction du niveau moyen du signal radio que l'on obtient en n'importe quel point à partir d'un certain nombre de paramètres (caractéristiques techniques, type d'environnement, zone traversée le long de la liaison...etc.). Il nous permet de modéliser les variations dues aux obstacles exposés à la propagation des ondes le long du canal radio mobile (effet de masques) auxquelles il faudra rajouter ensuite un algorithme pour prendre en considération les variations rapides (fading).

Donc pour un opérateur de téléphonie mobile, c'est important pour lui de développer un modèle de propagation parce qu'il est la base de tous les calculs qui peuvent être faits par un logiciel d'ingénierie radio (niveau de champ radio reçu, affaiblissement du signal, calcul des interférences, analyse du handover...etc.). Pour les opérateurs de téléphonie mobile l'optimisation de l'implantation des antennes relais ainsi que le dimensionnement correct du réseau (implantation des relais sur le terrain) sont importants en termes de coût et d'une meilleure couverture possible de la zone ciblée. Pour cela, ces outils de modélisation leurs apportent une aide inappréciable.

Le développement d'un modèle de propagation impose des études approfondies de l'environnement où l'onde va se propager pour parvenir à un modèle optimal du point de vue des performances de prédiction (résultats radio calculés proches des mesures radio collectées sur le terrain), mais aussi qui réponde aux besoins d'exploitation journalière du réseau par l'opérateur comme par exemple le temps de calcul des couvertures des champs radio en temps réel.

Ainsi, de récents modèles de propagation voient le jour afin d'analyser et de prendre de nouveaux paramètres en considération. Ces modèles permettent de se rapprocher de plus en plus de la réalité des différents milieux géographiques et des phénomènes physiques liés à la

propagation. Pour cela, il est important que nous prenions en compte ces éléments pour produire de nouveaux algorithmes de simulation prenant en considération de nouveaux paramètres d'entrée. Par ailleurs, il est important de mener des campagnes de mesures particulières pour l'optimisation et la validation du nouveau modèle.

II-5-3-Domaine d'application d'un modèle

On peut distinguer une multitude de modèles de propagation des ondes radioélectriques ; chacun d'eux possède un domaine d'application bien défini. Chaque opérateur de téléphonie mobile (Mobilis, Ooredoo, Djezzy, et autres opérateurs mondiaux) ainsi que les concepteurs de matériel de télécommunication (Oppo, Samsung, Alcatel, Nokia, ... etc.) développent leurs propres modèles de propagation d'ondes radio pour qu'ils répondent au mieux à leurs attentes.

Il n'existe pas de modèle valable pour tout environnement ou tout opérateur, mais on peut dire que certains modèles présents dans la littérature sont considérés comme des références (Okumura-Hata, Walfisch-Ikegami...). Ces derniers sont ensuite adaptés par selon les études de chacun ; nous verrons ce point dans le prochain chapitre en détails.

L'utilisation d'un modèle doit se faire selon son domaine d'application qui dépend surtout de deux facteurs :

- Le type de système radio mobile considéré : qui va rendre directement un certain nombre de paramètres radio tels que, par exemple, la fréquence, la dimension des cellules (qui fixe la distance maximale d'utilisation), la hauteur et le type d'antennes...etc.
- L'environnement : le type de milieu ou la zone géographique parcourue par l'onde le long du canal qui va influencer sur la propagation du signal de façon différente ; et on doit donc avoir des modèles capables de simuler chaque cas :
 - Premier cas : Les modèles pour l'extérieur avec des phénomènes très différents suivant le milieu de propagation (urbain, suburbain, rural, maritime, montagneux...). Chaque milieu nécessite le développement d'un modèle [25].
 - Deuxième cas : Les modèles de pénétration pour l'utilisation des portables à l'intérieur des bâtiments à partir d'émetteurs situées à l'extérieur [25].
 - Troisième cas : Les modèles Indoor pour la couverture intérieure à partir d'émetteurs situés à l'intérieur même des bâtiments [25].
 - Quatrième cas : Les modèles pour le canal Terre-satellite [25].

Il en ressort d'après tout ça qu'un même système radio mobile nécessite plusieurs types de modèles pour calculer et prédire les couvertures dans les divers environnements rencontrés

(rural, urbain dense, suburbaine, indoor, ... etc.) puisque les phénomènes de propagation à prendre en compte diffèrent selon le milieu ou la zone géographique parcourue.

Les différents types de milieux géographiques traversés par les ondes radio ainsi que les différentes technologies de télécommunications mises en œuvre (satellite, antenne relais, tour hertzienne, ... etc.) sont illustrés par la figure II.6.

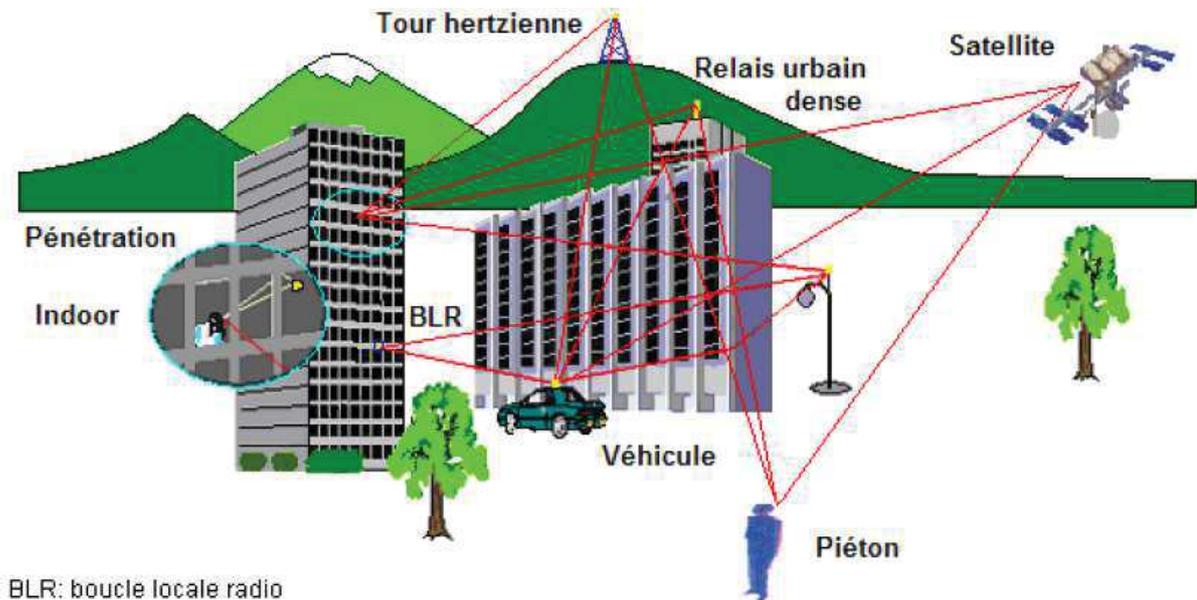


Figure II.6: Utilisation d'un mobile dans différents types d'environnement géographique [18]

II-5-4- Différents types de modèles

Il existe une multitude de modèles de propagation d'ondes radioélectriques. Chaque concepteur participe avec ses connaissances et son savoir-faire à la complexité de la tâche qui consiste à simuler le canal de propagation qui est variable dans le temps et dans l'espace.

Nous nous limitons dans notre travail aux modèles de propagation qui sont utilisés pour la planification d'un réseau de téléphonie radio mobile GSM et les modèles actuellement développés pour la conception de systèmes UMTS.

Ainsi, on cherche à prédire les variations rapides du signal radioélectrique provoqué par l'évanouissement du signal dû au fading (terme anglais qui signifie "affaiblissement, dispersion) et qui désigne les phénomènes d'affaiblissement liés à des variations rapides du signal radioélectrique suite à la présence d'objets dans l'environnement qui engendrent plusieurs répliques du signal transmis.

Elles ont pour objectif de prédire au mieux les variations lentes du signal radio dues aux obstacles (dits aussi effets de masques) le long de la liaison Emetteur- Récepteur. Pour mieux prendre en compte ce phénomène, plusieurs avancées sont possibles :

- **Modèles théoriques, déterministes :**

Ce type de modèle s'appuie sur les lois fondamentales de la physique du signal radioélectrique ainsi que sur des modèles de l'atmosphère et des modèles de terrain. Les problèmes électromagnétiques, dans le contexte d'un environnement géographique donné, conduisent rarement à des solutions analytiques, même en faisant des simplifications rigoureuses. C'est la raison pour laquelle ce type de modélisation est assez rare en propagation radioélectrique. Cependant, ce type de modèle ne se résume pas forcément à l'établissement de formules mathématiques.

Ce type de modélisation n'existe en fait que sur le papier puisqu'il est très ambitieux de prétendre modéliser l'ensemble des phénomènes qui influent sur la propagation du signal radio. De plus, il est très complexe de vouloir tenir compte également des variations temporelles (variations saisonnières, mobilité des obstacles...etc.). Cependant, des modèles théoriques ont été développés, pour avoir une modélisation la plus proche de la réalité avec notamment des algorithmes déterministes pour le calcul de la diffraction ; on peut citer par exemple la méthode de Vogler [27].

Des modèles à base de TGD (Théorie Géométrique de Diffraction) ont également fait l'objet de publications [27]. Ils sont consacrés de préférence pour des travaux de recherche, ce qui les rend incompatibles avec l'ingénierie des réseaux radio mobiles où l'on a besoin d'outils efficaces et rapides. En plus de cela, les performances de ces modèles ne répondent pas aux exigences attendues.

- **Modèles empiriques ou statistiques :**

Ce type de modèle décrit mathématiquement la propagation grâce aux statistiques et à un ensemble de mesures collectées sur le terrain ; il s'agit de modèles qui représentent le mieux la réalité.

Si le modèle empirique est bien construit, avec la fermeté demandée par l'analyse statistique, il représentera convenablement les données qui ont servi à l'établir. Il est généralement simple et en même temps facile à le mettre en œuvre (en termes de développement mathématique et de programmation informatique). A noter que le concepteur d'un système de télécommunication est prédisposé à le choisir parmi d'autres.

Il faut savoir que le modèle empirique n'est toujours pas fonctionnel car d'autres conditions (fréquence différente, milieu géographique différent, ... etc.) sont toujours différentes de celles qui ont présidé à son développement. Toute généralisation de ce modèle doit être prise avec prudence.

Le modèle le plus connu de cette catégorie est celui d'Okumura-Hata [28]. Ce dernier est basé sur l'analyse statistique d'un grand nombre de mesures expérimentales effectuées pour l'agglomération de Tokyo et sa périphérie et que nous aborderons dans le prochain chapitre.

Les paramètres pris en compte correspondent aux caractéristiques des systèmes radio mobile (fréquence, hauteurs des antennes, distance émetteur-récepteur et à des données sur l'environnement telles que rural, suburbain, urbain...etc.).

Les performances réussies avec ce type d'approche sont variables suivant le modèle et le milieu géographique étudié. L'utilisation d'un tel modèle doit se faire avec beaucoup de prudence pour qu'il donne des résultats admissibles. Il faut entre autres se trouver dans un environnement géographique qui fait partie de son domaine d'application et qui est assez proche des situations qui ont été mesurées sur le terrain et qui ont servi à son élaboration.

Ces modèles ont été très utilisés dans les années 70-80 lorsqu'on ne disposait pas encore de données géographiques numériques pour représenter l'environnement. À l'heure actuelle et avec l'évolution technologique due à la forte croissance de l'outil informatique, de grands progrès en matière de collecte automatique des données géographiques, de numérisation des données analogiques, et de développement de nombreux algorithmes de traitements de l'information (images, signal radio, etc.) ont été accomplis. Il est actuellement possible d'avoir un volume important de données et d'en déduire un certain nombre de paramètres utiles pour effectuer un calcul d'affaiblissement de propagation plus proche de la réalité. Pour cela, les modèles exclusivement statistiques sont de moins en moins utilisés, et les opérateurs de la téléphonie mobile sont allés vers une troisième approche qui correspond aux modèles semi-empiriques.

- **Modèles semi-empiriques :**

Les modèles semi-empiriques combinent une formulation analytique des phénomènes physiques (réflexion, transmission, diffraction, diffusion) [25], et un ajustement statistique par variable à l'aide de mesures expérimentales.

Ces modèles sont un jumelage des deux modèles statistique et empirique. Il s'agit de modèles dont les variables d'entrée et de sortie sont choisies en fonction d'une analyse physique du phénomène. La partie empirique réside alors dans l'estimation des valeurs numériques des coefficients du modèle à partir des résultats expérimentaux. Il est clair que cette approche est meilleure que la précédente car on évite ainsi les erreurs de modélisation dues aux variables liées. C'est pourquoi, on attachera toujours plus de confiance aux généralisations de ce type de modèle qu'à celles provenant de modèles purement empiriques [18].

Les modèles semi-empiriques se basent sur une partie théorique assez simplifiée pour tenir compte des phénomènes opérants lors de la propagation (calcul de diffraction multiple, réflexion...).

Puis à partir de cela, un certain nombre de corrections statistiques sont généralement effectuées sur l'ensemble des variables calculées par le modèle ; ce qui permet de l'ajuster par rapport aux situations réelles rencontrées sur le terrain [18].

- **Modèles stochastiques :**

Cette catégorie de modèle recouvre les trois catégories précédentes. On trouve des modèles stochastiques théoriques, empiriques et semi-empiriques. Un modèle est stochastique dès qu'une variable d'entrée ou de sortie est aléatoire. Les relations du modèle feront alors intervenir les variables déterministes ainsi que des statistiques provenant des variables aléatoires ou des paramètres permettant de préciser leurs lois de probabilité. Souvent ces statistiques et/ou paramètres sont déterminés grâce à d'autres variables d'entrée.

II-5-5 – Édification d'un modèle

On ne peut pas donner une seule démarche scientifique pour la modélisation. Toutefois une démarche intelligente permet d'éviter certaines erreurs. Parmi les points que l'on doit respecter tout au long de la conception du modèle on trouve :

a) Préciser le problème à résoudre

C'est une phase d'analyse où l'on précise ce que nous cherchons ; c'est-à-dire de dégager les variables de sortie ainsi que les éléments qui agissent sur le processus de propagation des ondes radio (réfraction de l'atmosphère, forme et taille des immeubles, topographie du terrain, types d'occupation du sol, ... etc.).

b) Recherche des variables d'entrée

Un modèle est plus pratique à utiliser si le nombre des variables d'entrée est réduit. Il est donc parfaitement légitime d'accepter une certaine dégradation des performances du modèle (justesse de la prédiction du signal reçu) en échange d'une simplification du modèle ou d'un gain en temps de calcul machine. Dans le cas des milieux urbains, par exemple, un modèle numérique de surface (hauteur du sursol) et une théorie de la diffraction pourraient idéalement constituer un modèle parfait ; il n'empêche que la découverte d'une ou de plusieurs variables (à différentes échelles) résumant les propriétés d'une ville (morphologie urbaine, ... etc.) du point de vue de la propagation radioélectrique serait du plus haut intérêt.

c) Recherche des relations

Cette étape va assembler des études théoriques, des campagnes de mesure ainsi que des simulations numériques. Deux approches importantes sont possibles :

Première approche : Chercher à base de processus fondamentaux à mettre en évidence, la relation entre les paramètres pertinents et les variables de sortie. Cette approche utilise tout l'arsenal théorique de l'électromagnétisme et de la géographie. On aboutit alors à des modèles théoriques ou semi-empiriques.

Deuxième approche : chercher la relation qui lie les variables d'entrée aux variables de sortie en employant pour cela une technique de régression statistique. Cette seconde approche aboutit à des modèles purement empiriques.

II-6- Obtention de données radioélectriques expérimentales

Le développement puis la validation d'un modèle se font à partir de notions théoriques ainsi que de données mesurées sur le terrain, et ceci quel que soit le type de modèle (modèle de propagation du signal en télécommunication, modèle d'analyse spatiale en géographie, ... etc.). La validation et l'optimisation du modèle s'effectuent en comparant les données mesurées sur le terrain avec les valeurs calculées par le modèle. Avant d'entamer une campagne de mesure il faut d'abord qu'on détermine les paramètres que l'on veut mettre en évidence lors des mesures : définir le type de campagne de mesures à faire en extérieur, pénétration radio dans les bâtiments, mesures à l'intérieur des bâtiments (Indoor), le type de signal que l'on veut mesurer (champ, réponse impulsionnelle, qualité, ...), les caractéristiques de l'environnement (zone urbain, zone suburbaine, zone rural ; mais aussi les caractéristiques morphologiques et architecturales des bâtiments pour les modèles de pénétration et l'Indoor), les caractéristiques radio (fréquence, hauteur des antenne ainsi que leurs types, distance entre l'émetteur et récepteur, ...etc.).

II-6-1-Mesures de champ en extérieur

La méthodologie utilisée pour les mesures de champ radioélectrique est la suivante :

- Une station émettrice fixe émet avec une certaine puissance une onde porteuse non modulée sur une fréquence donnée.
- Un véhicule équipé d'un récepteur mesureur de champ suit un trajet défini au préalable et relève la valeur du champ mesuré à intervalles de distances fixes (appelés pas de mesure Δx). Les valeurs sont stockées sur un ordinateur portable.
- Ensuite vient la phase de post traitement : on effectue un traitement *a posteriori* des données collectées afin d'associer à chaque point de mesure les coordonnées géographiques. Les mesures ainsi réalisées sont dites brutes. Elles reproduisent l'ensemble des variations qui affectent le signal et qui sont proportionnelles à

l'enveloppe du champ électrique. Un traitement apparenté au filtrage numérique permet d'éliminer les variations rapides (fading de Rayleigh) des variations lentes de moyenne et de grande échelle qu'il est possible de modéliser et de prédire [25] (figure II.7).

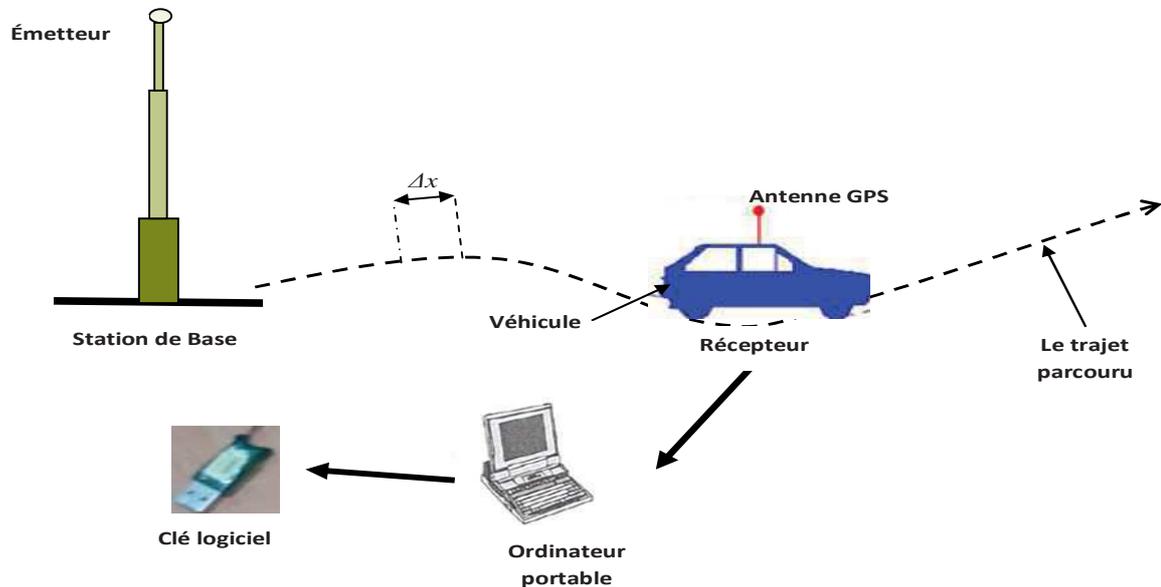


Figure II.7: Principe de la mesure du champ radioélectrique en radio mobile.

L'intérêt de l'utilisation d'un Système d'Information Géographique (SIG) lors de la collecte des données sur le terrain apparaît clairement. En effet, l'utilisation d'un GPS connecté à un logiciel SIG, lors de la collecte des données, permet d'obtenir automatiquement des données géo référencées et rend inutile la phase de digitalisation des données et permet également d'améliorer la qualité des données (précision, erreurs de localisation).

Le pas d'échantillonnage spatial (Δx) du système d'acquisition des mesures est choisi de telle sorte à pouvoir reconstituer le signal. Le théorème de Nyquist impose un échantillonnage inférieur ou égal à $\lambda/2$. Il faut donc que le nombre d'échantillons soit supérieur à cette périodicité pour faire apparaître ces variations du signal (figure II.8). On utilise en général un pas de mesure de l'ordre du quart de la longueur d'onde ($\lambda/4$). L'effet de la diffraction par exemple est plus sensible au fur et à mesure que la fréquence augmente. Celui-ci est déterminée de façon empirique selon les environnements traversés (rural, montagneux, suburbain, urbain, intérieur des bâtiments, ... etc.) et selon la fréquence. Une longueur moyenne égale à 40λ est généralement utilisée ; et la moyenne locale du signal radio mobile est alors estimée à ± 1 dB dans 90% des cas [26].

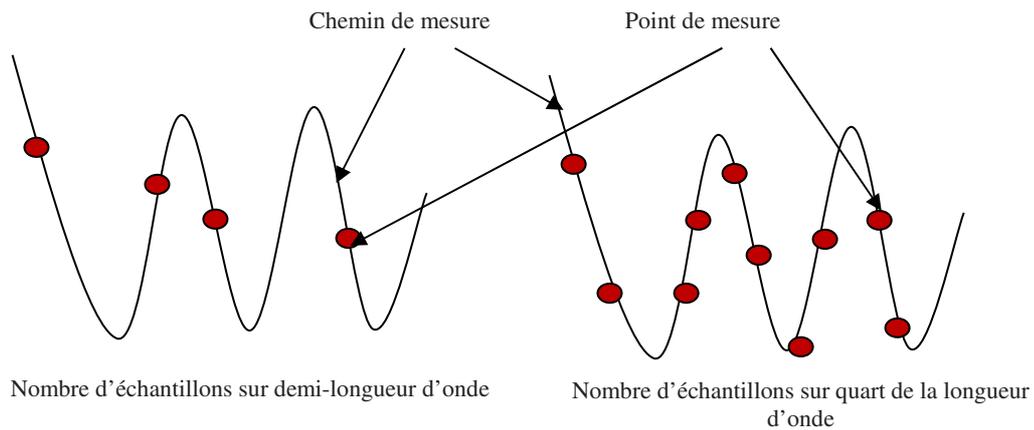


Figure II.8: Principe de la mesure du champ radioélectrique en radio mobile.

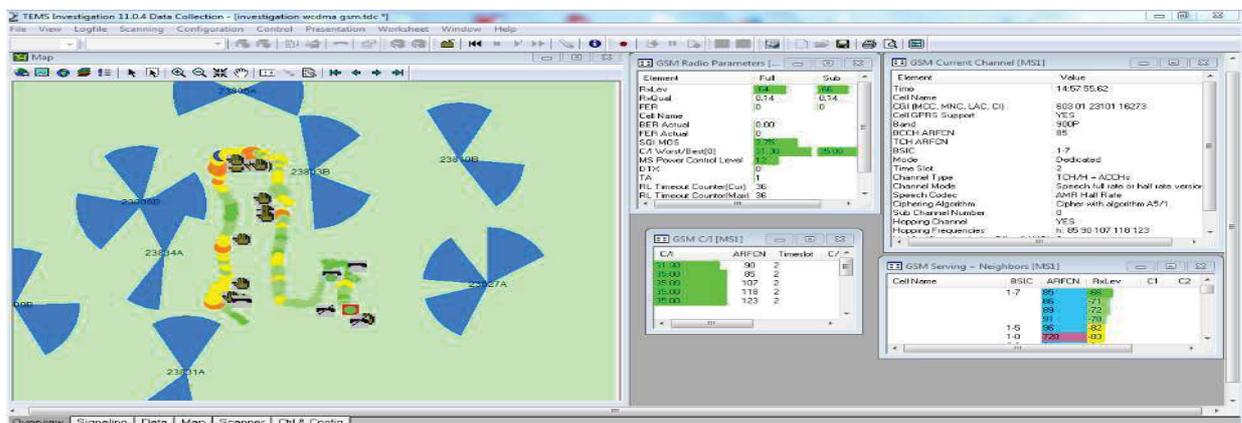


Figure II.9: Exemple de chemin de mesure à Annaba.

Une fois le travail de la collecte et le traitement des données obtenues au terrain sont terminés, on peut alors stocker ces données radio dans une base de données. Cette dernière nous permettra d'utiliser les mesures collectées dans un outil de planification du réseau radio mobile, et on peut également les utiliser pour la validation des modèles de propagation d'ondes radio. La figure II.9 illustre le trajet parcouru pour la collecte des mesures du niveau du signal dans la ville d'Annaba.

Concernant les mesures à l'intérieur des bâtiments pour étudier soit la pénétration des ondes (émetteur à l'extérieur), soit la propagation Indoor (émetteur à l'intérieur), les méthodes pour les mesures dans les couloirs sont presque les mêmes que pour les mesures extérieures. Dans ce cas, le véhicule est en fait un chariot qui transporte le même matériel précédant. Dans ce type de campagne de mesure, le nombre de points collectés est très faible en raison de la dimension réduite de l'environnement (zone limitée). Il faut noter, que dans ce cas, on obtient très bonne précision du positionnement de la mesure (de l'ordre de 20 cm au lieu de plusieurs mètres tolérés en extérieur).

Concernant les mesures dans les pièces, on fixe l'antenne de réception sur un tourniquet qui fait une rotation en effectuant alors une série de mesures. On répète cette opération plusieurs fois dans chaque pièce pour différentes positions du chariot. On doit également faire cette campagne de mesure sur tous les étages pour voir l'influence de la pénétration à travers les dalles et connaître l'étendue de la couverture dans le bâtiment.

D'autres types de mesures concernant aussi bien l'extérieur que l'intérieur des bâtiments touchent les mesures à large-bande qui permettent d'obtenir la réponse impulsionnelle du canal de propagation.

On peut aussi faire des mesures concernant la qualité de service où l'on cherche dans ce cas à mesurer des paramètres liés au T.E.B. (Taux d'Erreur Bit) qui consentent d'estimer la qualité de la liaison en fonction du fading, de la vitesse du mobile, du niveau de champ moyen et des interférences.

II-6-2- Mesures de réponses impulsionnelles

Il existe deux familles de méthodes permettant de mesurer la réponse impulsionnelle d'un système : les méthodes fréquentielles et les méthodes temporelles.

Les méthodes fréquentielles mesurent l'affaiblissement de propagation sur une bande de fréquence par un balayage en fréquence. La difficulté de ces méthodes réside dans l'obtention de la phase. La solution couramment utilisée est une synchronisation entre l'émetteur et le récepteur au moyen d'un câble (cas de l'analyseur de réseau). Elles sont plus particulièrement adaptées à la caractérisation large bande de la propagation en bande millimétrique à l'intérieur des bâtiments [27].

Concernant les méthodes temporelles, on en distingue deux types :

- La méthode la plus simple est la transmission d'une très courte impulsion aussi proche que possible d'une fonction de Dirac. Le champ instantané reçu au récepteur correspond directement à la réponse impulsionnelle du canal radioélectrique. Cette méthode, simple en théorie, s'avère difficile à mettre en œuvre : il est difficile d'émettre des impulsions à la fois très courtes dans le temps et fortes en puissance ; d'autre part la réception est délicate [28].
- Une seconde méthode consiste à utiliser comme signal sondeur une séquence binaire pseudo-aléatoire ayant de bonnes propriétés d'autocorrélation, séquence de longueur maximale, qui va moduler une porteuse généralement avec une modulation de type MDP2. Le récepteur va effectuer la corrélation de la séquence reçue avec une réplique de la séquence émise et, grâce à la propriété d'autocorrélation des séquences de longueur maximale, un pic de corrélation va être obtenu. Des sondeurs à

corrélateurs glissants analogiques ont été utilisés mais ils étaient limités, en particulier, parce qu'ils ne fournissaient pas l'information de phase [29].

Les principales caractéristiques d'un sondeur sont les suivantes :

- La bande d'analyse : c'est la bande autour de la fréquence centrale du canal dans laquelle est effectuée la mesure. Elle doit bien sûr être supérieure à la bande prévue pour le signal utile. Plus la bande est large, meilleure est la résolution temporelle de l'instrument, c'est-à-dire la possibilité de séparer des retards proches. Les bandes d'analyses sont typiquement de l'ordre de quelques mégahertz à plusieurs dizaines de mégahertz.
- La durée maximale des réponses impulsionnelles : dans les environnements montagneux le retard maximal dû à des échos lointains peut atteindre quelques dizaines de microsecondes (1 μ s représente approximativement un trajet de 300 m).
- Le pas d'échantillonnage spatial ou temporel qui correspond à la largeur du spectre Doppler analysable : cette largeur est inversement proportionnelle à l'intervalle de temps qui sépare deux réponses impulsionnelles successives.
- La dynamique de la mesure qui peut être exprimée par le rapport entre la puissance du trajet le plus fort et le plancher de bruit. Des dynamiques de 30 dB sont couramment obtenues avec les sondeurs actuels.

II-7-Critères d'évaluation d'un modèle

Pour avoir la possibilité d'évaluer les performances d'un modèle, on doit avoir des paramètres statistiques qui permettent d'estimer sa précision. On décrit donc pour chaque point de mesure l'erreur de prédiction en tant que différence entre l'affaiblissement mesuré sur le terrain et l'affaiblissement prédit par le modèle de propagation [18] :

$$E_{\text{prédiction}} = A_{\text{mesuré}} - A_{\text{prédit}} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$E_{\text{prédiction}}$: est l'erreur de prédiction (en décibels)

A est l'affaiblissement du signal radioélectrique (en décibels)

A partir de cette valeur, on détermine un certain nombre de paramètres statistiques qui résument les caractéristiques de la distribution des erreurs. Il s'agit de :

$\langle E_{\text{prédiction}} \rangle$: valeur moyenne de l'erreur de prédiction (en décibels).

σ : écart-type de l'erreur de prédiction (en décibels).

Q_x : Pourcentages de points pour lesquels la valeur absolue de l'erreur de prédiction est inférieure à x dB.

Avec ces différents paramètres, on peut alors juger de la précision d'un modèle. On admet en général qu'un modèle est acceptable pour l'ingénierie s'il est centré (la valeur $\langle E_{\text{prédiction}} \rangle$ est inférieure à 1 dB en valeur absolue) avec un écart-type le plus faible possible (6 à 7 dB actuellement pour les radios mobiles). Il faut de plus que ces critères soient vérifiés aussi bien d'un point de vue global (sur la totalité des sites de mesure) que pour chaque site pris séparément pour pouvoir juger de la robustesse du modèle.

II-8- Différents usages des modèles

Lors de la conception d'une interface radio, les modèles de propagation sont utilisés pour optimiser les performances des systèmes radio mobile pour leurs déploiements sur le terrain pour déterminer la couverture radioélectrique optimale.

Dans le premier cas, les modèles de propagation seront mis en œuvre dans des logiciels de simulation de la chaîne de transmission et ils devront mettre en évidence et reproduire de façon suffisamment détaillée les caractéristiques pertinentes du canal pour l'évaluation de l'interface radio notamment en termes de qualité (taux d'erreur, etc.). La réponse impulsionnelle, avec ses évolutions dans le temps et l'espace, constitue la base de ce type de modèles. Les modèles ne feront en général pas appel à des bases de données géographiques mais plutôt à des environnements génériques ou typiques [36].

Dans le second cas, les modèles seront implantés dans des outils d'ingénierie pour prédire différentes quantités utiles pour la planification et le déploiement des systèmes radios mobile, l'étude de la couverture (choix des sites, allocation de fréquences, définition des puissances, gains d'antenne) et la définition des brouillages. Ils sont très dépendants des bases de données géographiques comportant des éléments relatifs à la topographie et à la nature d'occupation du sol (annexe 1).

II-8-1-Modèles macro cellulaires

Ce sont des modèles semi-empiriques généralement basés sur l'analyse du profil vertical émetteur-récepteur et des obstacles qui les séparent (colline, forêt, etc.). Ils se fondent souvent sur des données géographiques de type maillé de sol et de sursol. Une mise au point par adaptation de variables est opérée à l'aide de mesures expérimentales vu la pauvreté des

informations géographiques fournies et de la simplicité des algorithmes de calcul. On distingue deux types de modèles : les modèles ruraux et moyennement urbanisés et les modèles montagneux.

a) Modèles ruraux

Ces modèles ruraux tiennent seulement en compte la coupe verticale du terrain entre l'émetteur et le récepteur pourvu de définir les affaiblissements qui sont dus à la diffraction par les obstacles (sol et sursol). Ils nous donnent la possibilité d'évaluer une couverture radioélectrique avec une précision de l'ordre de 6 à 7 dB d'écart-type sur la moyenne de l'erreur entre valeurs mesurées et valeurs prédites. Comme on peut améliorer les performances en milieu urbain par l'utilisation de données géographiques plus précises. Elles se détériorent lorsque les hauteurs deviennent importantes (plus particulièrement en région montagneuse) car les effets des trajets réfléchis deviennent prépondérants.

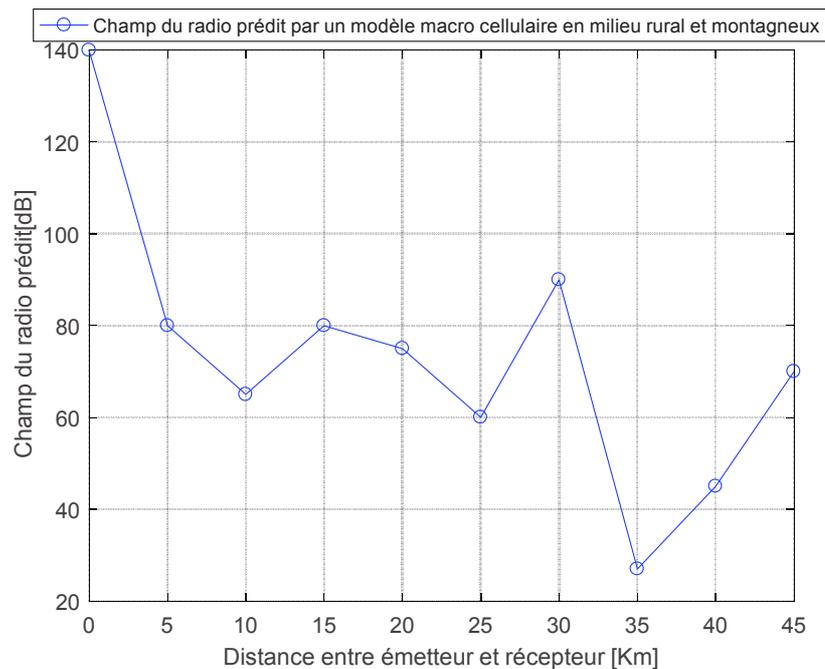


Figure II.10 : Le champ radio prédit par un modèle macro cellulaire rural.

b) Modèle montagneux

Le modèle montagneux prend en compte, outre le trajet direct, les trajets réfléchis sur les flancs des montagnes avoisinantes [31-33]. La reconnaissance des zones de réflexion rend les algorithmes de calcul de l'affaiblissement plus complexes et plus gourmands en temps de calcul.

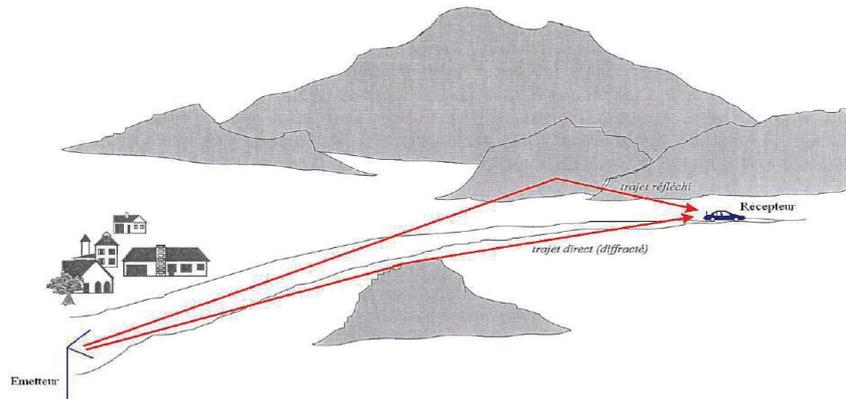


Figure II.11 : Représentation d'une configuration montagneuse [30]

Différentes méthodes ont été recherchées afin d'optimiser les temps de calcul nécessaires à la prévision :

- La recherche des trajets réfléchis confinée dans une ellipse dont les foyers sont l'émetteur et le récepteur et dont le retard maximum autorisé Δt_{\max} est égal à $25 \mu\text{s}$ (voir figure II.12),
- La prise en compte d'une seule réflexion sur les parois en visibilité à la fois de l'émetteur et du récepteur,
- La prise en compte de la taille de la maille. Il apparaît que des mailles de 400 m constituent un compromis entre le temps de calcul et la précision de la prévision,
- Les regroupements des mailles sous forme de facettes afin de ne retenir qu'un seul profil entre le point de réception et le barycentre du groupe de mailles.
- Le prétraitement des données géographiques pour déterminer la visibilité entre mailles et éviter ainsi l'extraction d'un grand nombre de profils.

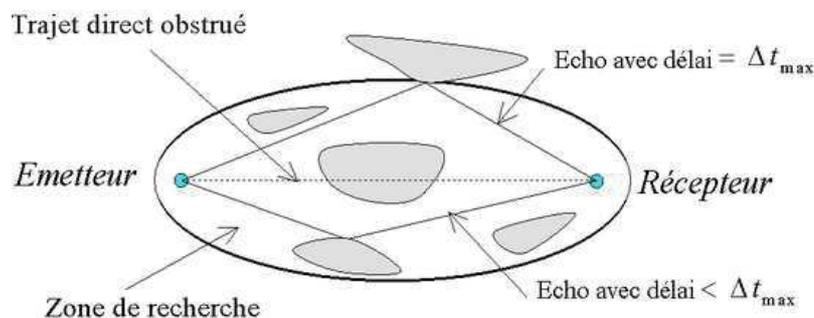


Figure II.12 : Représentation schématique d'une configuration montagneuse [25].

II-8-2- Modèle pour les petites cellules

a) Modèle COST-NET

L'amélioration des modèles statistiques pour les petites cellules suburbaines et urbaines est obtenue par l'intégration du mode profil et de différents algorithmes de diffraction multiple en environnement rural. Ce modèle prend en compte de l'influence du relief et du sursol par l'intermédiaire d'une base de données géographiques plus ou moins précise.

Le modèle le plus connu est celui élaboré dans le cadre de l'Action COST 231 [18]. C'est un modèle semi-empirique pour petites cellules. Le profil se trouve dans le plan de coupe verticale contenant l'émetteur et le récepteur. Il convient plus particulièrement à l'ingénierie du GSM à 900 MHz et du DCS 1800 à 1800 MHz avec une émission à 5 à 15 m au-dessus des toits. La propagation s'effectue principalement par-dessus les toits pour finalement plonger dans la rue où se déplace le mobile. Pour que ce modèle soit adapté avec l'environnement, un terme de diffraction supplémentaire a été ajouté. Du fait des altitudes (les variations d'altitudes sont rarement très importantes au sein même d'une ville) et des distances mises en jeu, la méthode de Deygout [18] habituellement utilisée à FTR&D est généralement retenue pour calculer ce terme.

La méthode de calcul de l'affaiblissement est issue des travaux de Walfish et Bertoni sur la diffraction multiple par des arêtes alignées et uniformément réparties [34-36], et sur ceux d'Ikegami pour la prise en compte de la dernière diffraction au niveau du mobile [37]. Deux contributions sont prises en compte : un trajet direct entre la dernière arête et le mobile et un trajet qui se réfléchit sur le bâtiment derrière le mobile dans le plan émetteur-récepteur (figure II.13).

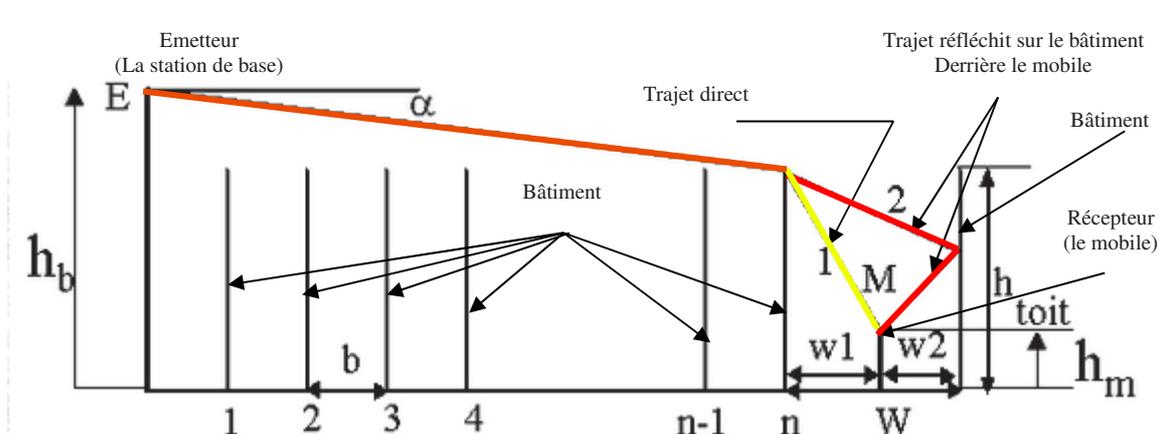


Figure II.13 : Profil synthétique du modèle COST 231.

Où :

- h_b est la hauteur de l'émetteur
- h_{toit} est la hauteur du toit du bâtiment
- h_m est la hauteur du récepteur
- b est l'affaiblissement lié à la diffraction sur une arête principale
- w_1 est la distance entre le récepteur et le bâtiment qui est devant
- w_2 est la distance entre le récepteur et le bâtiment qui est derrière
- w est la largeur entre les deux bâtiments où le récepteur se trouve

Les affaiblissements totaux (L) obtenues se décomposent en 4 termes principaux représentant successivement les pertes liées à la distance entre l'émetteur et le récepteur, les pertes liées à la diffraction multiple sur les arêtes, les pertes liées à la dernière diffraction et à la réflexion respectivement sur les immeubles et derrière le mobile et les pertes liées à la diffraction sur une arête principale :

$$L = L_0 + L_{msd} + L_{rts} + L_{deg} \quad (\text{II.2})$$

Où :

- L_0 est l'affaiblissement en espace libre
- L_{msd} est l'affaiblissement de diffraction multiple sur les arêtes
- L_{rts} est l'affaiblissement lié à la dernière diffraction et à la réflexion respectivement sur les immeubles et derrière le mobile.
- L_{deg} est l'affaiblissement lié à la diffraction sur une arête principale.

Pour plus de détails **voire l'annexe 1**.

II-8-3-Modèles micro cellulaires

La modélisation micro cellulaire repose sur une coexistence attachée aux faibles distances : un calcul en visibilité (LOS, Line Of Sight) et un calcul en non-visibilité (NLOS, Non Line of Sight). En effet, l'émetteur étant situé dans la rue au-dessous du niveau des toits comme illustré par la figure II.14 ; il s'agit principalement d'une propagation "guidée" le long des rues : soit dans la rue où se trouve l'émetteur (LOS), soit dans les rues adjacentes après le passage d'au moins un coin (NLOS) [35]. Nous retrouvons ces deux types de calcul dans la plupart des modèles analytiques 2D (profil) proposés dans la littérature, notamment le modèle à double pente [35] qui considère un affaiblissement en d^2 ($20\log_{10}d$) pour la visibilité à

faibles distances et un affaiblissement en d^4 ($40\log_{10}d$) pour la non-visibilité ou la visibilité à longues distances (combinaison du rayon direct et du rayon réfléchi sur le sol). La position du point de rupture de pente est généralement donnée par la relation suivante :

$$d = \frac{2\pi h_b h_m}{\lambda} \quad (\text{II.3})$$

Où h_b et h_m représentent respectivement la hauteur de la station d'émission et celle du mobile.

Pratiquement, il est très difficile d'évaluer la valeur de la pente en NLOS puisqu'elle dépend beaucoup de l'angle α entre les rues. Ce sont en fait les travaux sur la Théorie Uniforme de la Diffraction [38-39] qui ont permis de parvenir à une formulation analytique précise des phénomènes de propagation en zones urbaines [40-42].

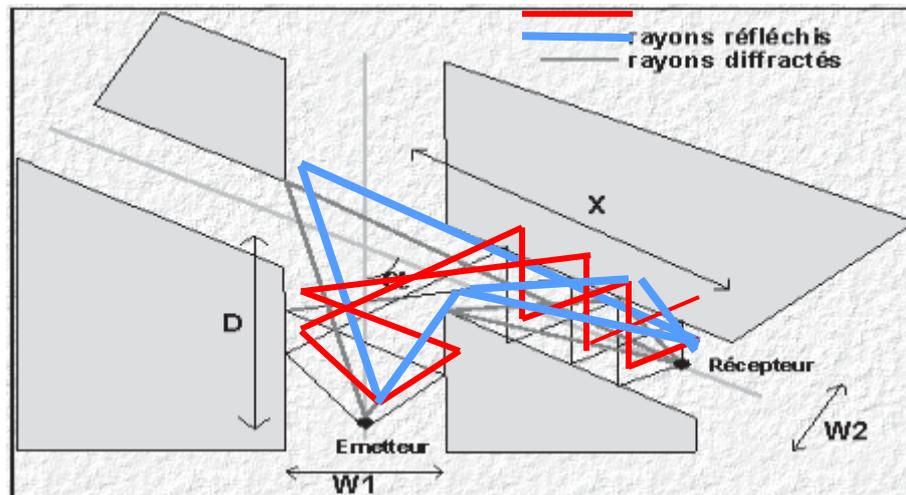


Figure II.14 : Propagation dans une zone macro cellulaire.

Où :

- D est la distance entre l'émetteur et l'axe de la rue où le récepteur se trouve.
- X est la distance entre le récepteur et l'axe de la rue où l'émetteur se trouve.
- α est l'angle entre les rues où se trouvent l'émetteur et le récepteur
- w_1 est la largeur de la rue où se trouve l'émetteur
- w_2 est la largeur de la rue où se trouve le récepteur

Le modèle Micro G-CNET est un modèle analytique 2x2D qui généralise ces deux aspects [43], voir l'annexe 2.

II-8-4 - Modèle pico cellule

a) Modèle de pénétration

L'affaiblissement dans ce type de modèle est la perte de puissance subie par le champ électromagnétique entre l'extérieur autour du bâtiment et une ou plusieurs positions à l'intérieur de l'immeuble. Il est calculé en comparant le champ extérieur et le champ dans les pièces de l'immeuble où se trouve le mobile récepteur. Les modèles d'affaiblissement, intégrés aux outils de prédiction de champ, se doivent de prendre en compte l'environnement proche du bâtiment étudié.

Les paramètres qui affectent les valeurs d'affaiblissement de pénétration sont :

- l'environnement proche.
- la profondeur de réception dans les bâtiments [44].
- l'angle d'incidence.
- la hauteur de réception plus communément appelée "effet d'étage"[44-46].
- la distance entre l'émetteur et le récepteur,
- la hauteur de l'antenne d'émission,
- la fréquence,
- le type de matériaux traversés [47-49]

L'affaiblissement de propagation (L) s'exprime par une somme des pertes en espace libre (L_0), des pertes dues aux obstacles traversés par le rayon direct (dalles, murs, portes, fenêtres) et d'une constante (L_c) [49]. La base de données peut différencier les différents obstacles auxquels est associée une valeur particulière d'affaiblissement (voir Annexe 4). C'est le modèle le plus utilisé.

$$L = L_0 + L_c + \sum_{j=1}^N N_j L_j + N_f L_f \quad (\text{II.4})$$

Où :

- N_j est le nombre de murs traversés de type j
- L_j sont les pertes dues aux murs de type j
- N est le nombre de types de murs différents,
- N_f est le nombre de dalles traversées,
- L_f sont les pertes par dalle.

II-9-Conclusion

Après avoir donné une vue sur les services radioélectriques ainsi que leur classement selon le type de technologie de télécommunication radio employée, nous avons abordé les exigences des opérateurs des systèmes radios mobile lors de la planification et l'installation de leurs réseaux en posant un nombre de questions concernant la propagation des ondes radioélectriques.

Tout d'abord, nous avons rappelé la définition d'un canal de propagation, ses composants ainsi que ses différents aspects. Tous ces éléments permettent la caractérisation du milieu de propagation.

Puis, la description des différentes étapes de développement d'un modèle a été appréhendée en vue de nous permettre la modélisation du phénomène de propagation d'ondes radio.

A la fin du chapitre, nous avons présenté les différents modèles pour le déploiement des systèmes radio mobiles et objets communicants dans différents environnements (rural, montagneux, suburbain, urbain, intérieur des bâtiments). Par ailleurs, les différents types de cellules (macro cellulaire, petite cellule, micro-cellulaire et pico-cellulaire) ont été également présentés en nous limitant essentiellement aux modèles à bande étroite. Notons que des détails plus développés concernant ces différents modèles peuvent être obtenus dans la littérature [50].

Chapitre III

Mécanismes de propagation et modèles de prédiction pour déploiement des réseaux cellulaires

III-1-Introduction

La propagation électromagnétique se fait dans des milieux complexes caractérisés par des obstacles et des sources de brouilleurs. Cela fait de l'interface radio la partie la plus délicate à maîtriser dans les systèmes de communications radio mobiles. Le dimensionnement adéquat de cette interface nécessite une modélisation fiable du canal.

Les méthodes de modélisation et les modèles de propagation sont divers. Leurs performances nécessitent la prise en compte des phénomènes électromagnétiques survenant dans l'environnement. On va voir dans ce chapitre les différents mécanismes subis par l'onde lors de sa propagation à savoir la réflexion, la réfraction, la diffraction, la transmission et la diffusion. Tous ces phénomènes dépendent notamment de la fréquence utilisée et du type d'environnement (urbain, suburbain, rural, indoor...). Ensuite nous détaillerons les différents modèles empiriques utilisés pour la prédiction de la propagation en milieu outdoor.

III-2-Objectifs des modèles de prédiction de la propagation

Vu l'apparition des systèmes radio mobiles, la prédiction délicate de la propagation électromagnétique devient un investissement stratégique pour les différents opérateurs et un sujet de recherche prometteur.

Le but de la prédiction est d'apporter une aide aux opérateurs des systèmes radio mobile à planifier et à concevoir leurs systèmes de transmission radioélectriques actuels et futurs, ainsi que le déploiement de leurs réseaux. On choisit des hypothèses sur leurs contraintes puis on simule la propagation pour un type donné d'environnement afin d'obtenir, de façon statistique, le pourcentage de situations où la qualité de la transmission sera assurée [51].

La prédiction n'est pas supposée pour un type d'environnements mais pour une situation à chaque fois bien particulière ; elle nous apporte une assistance sur les performances de la liaison de façon à l'installer en étant assuré de sa future qualité. Sans modèles adaptés, des

campagnes de mesures avec ajustement des caractéristiques des sites après chaque essai et révision a posteriori des paramètres de la liaison sont nécessaires.

C'est un outil adapté qui permet de participer au choix des sites, ou au moins à préciser leurs caractéristiques en planifiant leurs portées. Les services des opérateurs se limitent alors à des campagnes de contrôle. Le gain en moyens humains et matériels et en délai est important.

Enfin, après même l'installation d'un réseau peuvent surgir des problèmes de brouillages entre installations d'un même système ou entre systèmes différents. Les modèles de propagation sont nécessaires à la recherche des changements des caractéristiques des liaisons permettant d'éliminer les brouillages en absence de champs suffisants. Il est nécessaire d'avoir des prévisions précises, fiables et répondant aux besoins des utilisateurs.

III-3-Mécanismes de propagation

Dans les systèmes radio mobiles, l'information est transportée par une onde électromagnétique se propageant à travers un canal de propagation. La propagation des ondes radios dans les canaux sans fils terrestres est un phénomène compliqué caractérisé par une multitude d'effets [52-53] qui font varier la puissance du signal mesuré.

III-3-1-Aspects physiques de la propagation

Les performances des systèmes radio mobiles sont principalement régies par l'environnement du canal sans fil. Contrairement aux caractéristiques typiquement statiques et prévisibles d'un canal filaire, le canal sans fil est plutôt dynamique et imprévisible, ce qui rend une analyse du système de communication sans fil souvent difficile.

Pour cela, les systèmes radio mobiles ont généralement besoin d'un modèle plus raffiné prenant en compte les différentes caractéristiques du milieu qui perturbent la propagation, appelées encore atténuations ou évanouissements, et qui affectent la puissance du signal. Le phénomène d'évanouissement peut être grossièrement classé en deux types différents : l'évanouissement à grande échelle et l'évanouissement à petite échelle [54] :

a) L'évanouissement à grande échelle

Cette classe comprend deux effets : l'affaiblissement en distance et les effets de masquage [55]. L'évanouissement à grande échelle se produit lorsque le mobile se déplace sur une grande distance, par exemple, une distance de l'ordre de la taille de la cellule [56].

Il provoque une perte de puissance qui est due à la propagation en espace libre de l'onde électromagnétique, et qui s'explique par la dispersion isotrope de l'énergie transmise suivant les trois dimensions spatiales. Les pertes en espace libre augmentent avec la fréquence et avec la distance. L'effet de masquage est dû à la présence d'obstacles (bâtiment, forêt...) entre l'émetteur et le récepteur. Aux fréquences auxquelles opèrent les systèmes radio mobiles, l'onde électromagnétique traverse ces obstacles, mais subit une atténuation de puissance qui est fonction de la nature du matériau traversé. Dans la littérature anglo-saxonne, cet effet est désigné sous le terme "shadowing".

b) L'évanouissement à petite échelle

Les variations de la puissance à petite échelle sont mesurées sur un intervalle de temps suffisamment court pour négliger une variation des phénomènes à grande échelle [57]. Les variations observées de puissance ont pour origine la présence d'objets dans l'environnement qui engendrent plusieurs répliques du signal transmis pouvant s'additionner de manière constructive ou destructive au niveau du récepteur. Les évanouissements peuvent être classés comme étant des évanouissements rapides ou des évanouissements lents illustrés par la figure III.1.

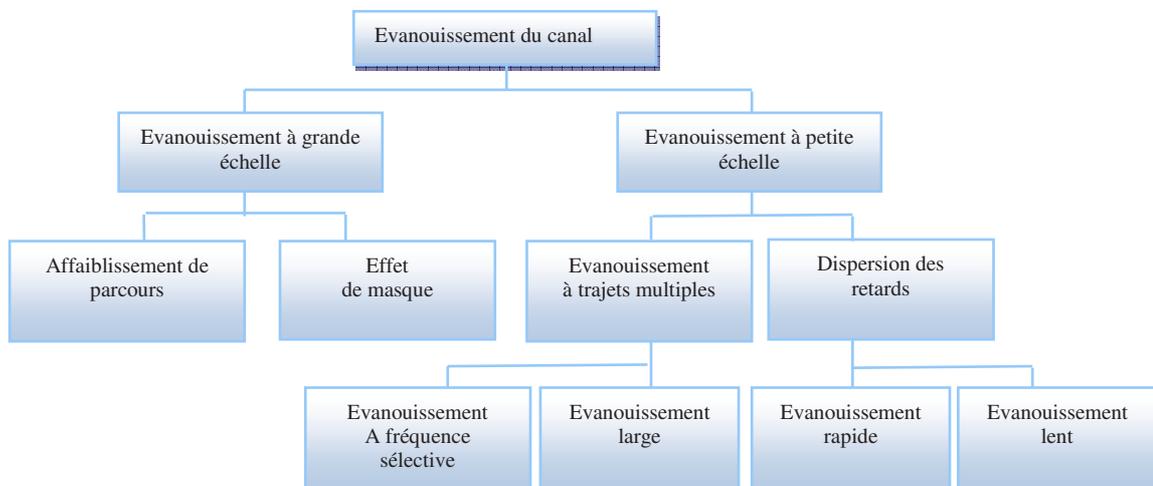


Figure III.1 : Classification des évanouissements du canal.

En milieu urbain, un mobile est entouré par de nombreux obstacles. Il reçoit des signaux provenant de divers trajets ayant subi des atténuations différentes provenant de diverses directions et ayant des déphasages et délais différents. Les réflexions multiples provoquent donc plusieurs trajets entre l'émetteur et le récepteur, c'est le phénomène des trajets multiples [58]. L'atténuation petite échelle est à l'origine de plusieurs problèmes dont les principaux sont : la dispersion des retards et le phénomène d'évanouissement large, évanouissement rapide et évanouissement lent.

III-3-2-Différents mécanismes de propagation

Dans la communication sans fil, la propagation radio se réfère au comportement des ondes radio émises qui se propagent de l'émetteur au récepteur dans un milieu homogène idéal sous une forme de rayons rectilignes. Au cours de la propagation, les ondes radio sont principalement affectées par différents phénomènes physiques dus aux obstacles matériels (constructions, humains, reliefs) qui vont entraîner une modification du trajet de l'onde émise. En fonction de la nature de l'impact, l'onde subira de la réflexion, de la diffraction, de la diffusion, de l'absorption et du guidage (figure III.2).

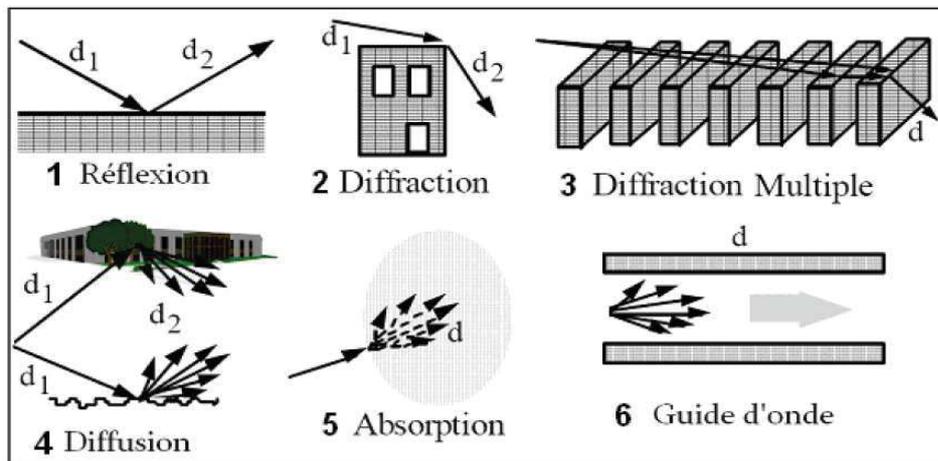


Figure III.2 : Les différents mécanismes de propagation [18].

a) Réflexion

On a réflexion lorsque l'onde rencontre une surface dont les dimensions sont grandes (dimension surface $\gg 32$ cm pour une fréquence $f = 900$ MHz) et les irrégularités petites (dimension irrégularités $\ll 32$ cm pour $f = 900$ MHz) par rapport à la longueur d'onde λ ($\lambda = 33$ cm pour les ondes UHF à 900 MHz).

Le champ réfléchi est lié au champ incident par l'intermédiaire des relations de Fresnel, qui sont les quatre formules de calcul proposées par celui-ci en 1818, qui permettent de calculer les facteurs de réflexion R_V et R_H et de transmission T_V et T_H des ondes électromagnétiques (voir annexe 3). On distingue 2 types de réflexion : la réflexion spéculaire et la réflexion diffusée.

❖ Réflexion spéculaire

La réflexion spéculaire, phénomène commun à toutes les fréquences, est celle due à une surface homogène parfaitement plane. Elles sont dues à des obstacles tels que le sol, les façades d'immeubles et les surfaces planes. L'affaiblissement de propagation induit par ces réflexions découle des relations de Fresnel et dépend des caractéristiques diélectriques de la surface réfléchissante (conductivité σ , permittivité ϵ (ou permittivité relative $\epsilon_r = 8.85 \cdot 10^{-12}$ F/mou sa permittivité relative complexe $\epsilon_r = \epsilon_r - j.60. \sigma.\lambda$)). Des valeurs sont disponibles dans

la littérature : par exemple à 60 GHz, $\epsilon_r = 4$ pour les murs et $\epsilon_r = 3$ pour le sol. On peut noter que les valeurs des caractéristiques diélectriques présentent une grande variabilité suivant le type de matériaux et leur mesure est souvent délicate à réaliser.

Ce type de recherche, de classification des objets géographiques, notamment en milieu urbain, à partir de leurs caractéristiques radiométriques fait l'objet de recherches approfondies par des géographes spécialisés dans le domaine de la télédétection.

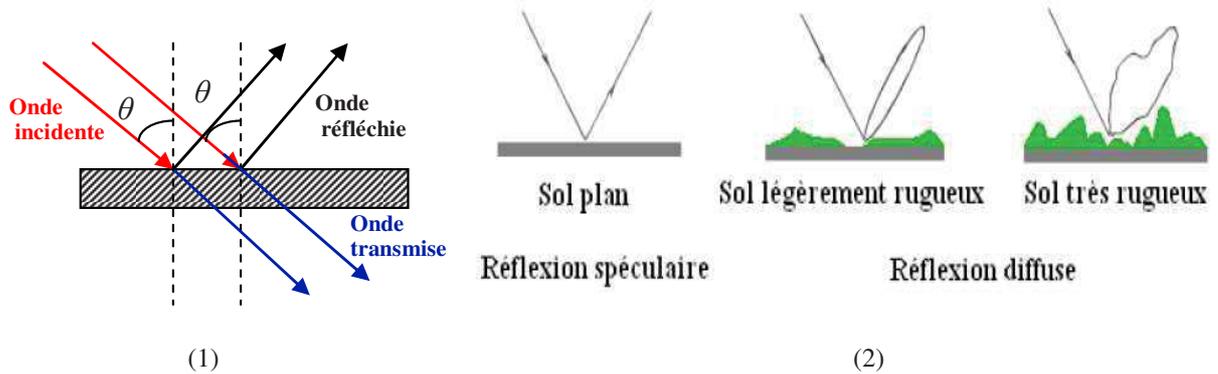


Figure III.3 : (1) La Réflexion des ondes, (2) la réflexion spéculaire à la réflexion diffuse.

❖ Réflexion diffusée

La réflexion diffusée est due aux réflexions par des surfaces qui ne sont pas planes mais rugueuses ; les surfaces présentent des inégalités de hauteur en différents points. Il en résulte une onde incidente qui n'est plus réfléchie dans une direction unique mais diffusée dans de multiples directions. Afin de préciser si une réflexion est diffuse ou spéculaire, on utilise généralement le critère de Rayleigh (figure III.4), à savoir la considération de la hauteur des irrégularités de la surface (h) et l'angle d'incidence (Φ).

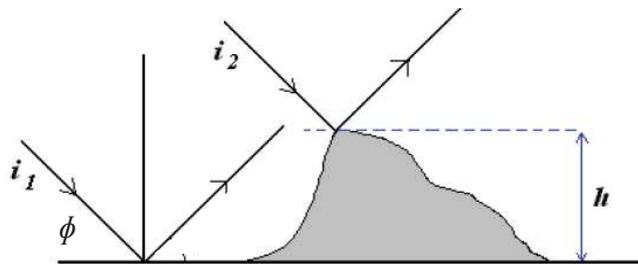


Figure III.4 : Déphasages créés par une irrégularité de surface de hauteur H .

L'irrégularité de hauteur h va alors créer, pour 2 ondes réfléchies i_1 et i_2 par la surface, au plus une différence de marche $\delta = 2.h.\sin(\Phi)$ et donc une différence de phase donnée par :

$$\Delta\Phi = \frac{4\pi(\Phi)}{\lambda} \tag{III.1}$$

Avec :

λ : la longueur d'onde

Φ : l'angle formé entre le sol et l'onde incidente.

Lorsque la hauteur h est suffisamment petite pour que ces deux ondes soient en phase, on se trouve dans le cas précédent de réflexion spéculaire. Sinon la surface est considérée comme rugueuse. En résumé, la réflexion est diffuse, selon le critère de Rayleigh, lorsque $\Delta\Phi > \pi/2$, c'est à dire lorsque $h > \lambda/8\sin(\Phi)$. La rugosité dépend donc de la fréquence, de l'angle d'incidence et de la hauteur des irrégularités [25].

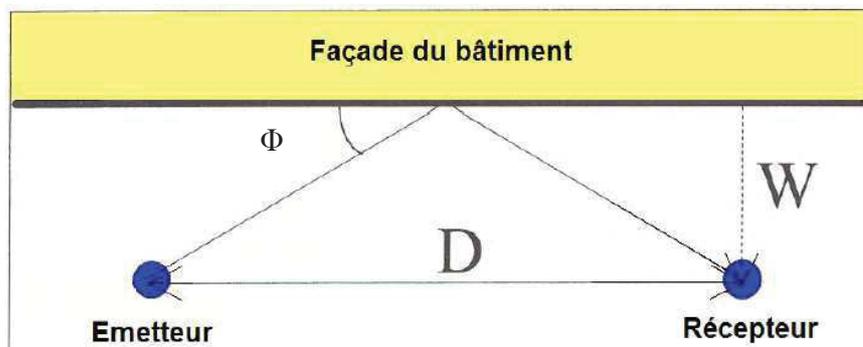


Figure III.5 : Géométrie d'une réflexion sur une façade.

L'angle i de réflexion spéculaire est donné par les lois de l'optique géométrique [25]:

$$\sin(\Phi) = \frac{W}{\sqrt{W^2 + \frac{D^2}{4}}} \quad (\text{III.2})$$

Le critère de rugosité s'écrit alors :

$$h > \lambda \frac{\sqrt{W^2 + \frac{D^2}{4}}}{8W} \quad (\text{III.3})$$

On peut dire que la réflexion est diffuse.

Pour $W = 5$ mètres on obtient les résultats suivants figure III.6.

La figure III.6, montre que la hauteur critique est une fonction de la distance D et une fonction décroissante de la fréquence. Les faibles valeurs tolérées (de l'ordre du cm) montrent que la rugosité des surfaces ne peut à priori être négligée pour des bandes de fréquences supérieures à 10 GHz.

Deux modèles sont couramment utilisés pour représenter la réflexion : le modèle de LAMBERT et le modèle de PHONG [25].

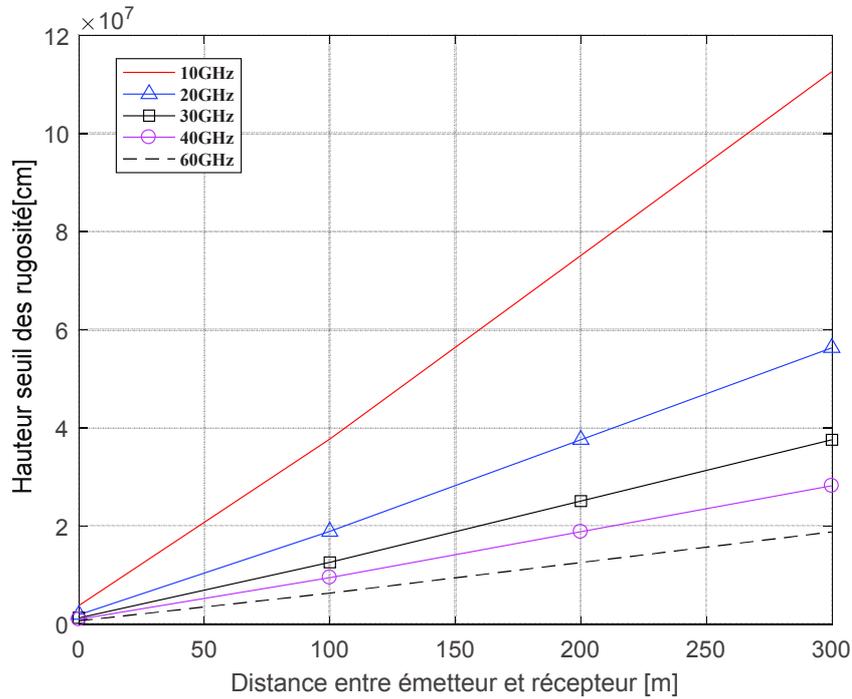


Figure III.6 : Hauteur de rugosité au-delà de laquelle la réflexion est considérée comme diffusé suivant le critère de Rayleigh.

❖ Modèle de LAMBERT

Certaines surfaces sont très irrégulières et réfléchissent le rayonnement, par exemple, dans toutes les directions indépendamment du rayonnement incident. De telles surfaces sont dites diffuses et peuvent être représentées par le modèle de LAMBERT. Le modèle est très simple et très facile à implanter dans les logiciels de calcul. Il est décrit par l'équation suivante [25] :

$$R(\theta_0) = \rho R_i \frac{1}{\pi} \cos(\theta_0) \quad (\text{III.4})$$

où :

ρ : est le coefficient de réflexion de la surface,

R_i : représente la puissance incidente,

θ_0 : est l'angle d'observation.

❖ Modèle de PHONG

Le modèle de PHONG considère le diagramme de réflexion comme la somme de deux composantes : la composante diffuse et la composante spéculaire. Le pourcentage de chaque composante, dépendante principalement des caractéristiques de la surface, est un paramètre du modèle. La composante diffuse est modélisée par le modèle de LAMBERT. La composante spéculaire est modélisée par une fonction qui dépend de l'angle d'incidence θ_i et de l'angle d'observation (angle de réflexion) θ_o . Le modèle de PHONG est donné par [25] :

$$R(\theta_i, \theta_o) = \rho \frac{R_i}{\pi} \left[r_d \cos(\theta_o) + (1 - r_d) \cos^m(\theta_o - \theta_i) \right] \quad (\text{III.5})$$

Où :

ρ : est le coefficient de réflexion de la surface,

R_i : représente la puissance incidente,

r_d : est le pourcentage du rayon qui est réfléchi sous forme diffuse (c'est une valeur comprise entre 0 et 1),

m : est un paramètre qui contrôle la directivité de la composante spéculaire de la réflexion.

θ_i : est l'angle d'incidence,

θ_o : est l'angle d'observation.

On notera que le modèle de LAMBERT est obtenu à partir de celui de PHONG en prenant r_d égal à un. Le modèle de PHONG, dépendant de l'angle d'observation et de l'angle d'incidence, est plus complexe que le modèle de LAMBERT. Les temps de calculs s'en trouvent allongés. Le diagramme de réflexion présente un module principal centré autour de la direction de la réflexion spéculaire.

b) Transmission

C'est un phénomène qui admet le passage des ondes électromagnétiques à travers un obstacle. Les trajets transmis qui traversent les immeubles, la végétation, ... etc. ont en général un rôle assez faible. Le champ transmis est relié au champ incident par l'intermédiaire des relations de FRESNEL. On définit la profondeur de pénétration de l'énergie radioélectrique δ comme celle à laquelle l'intensité de l'onde est affaiblie (soit 37%) de la valeur qu'elle avait à la surface. La figure III.7 montre la profondeur de pénétration δ en fonction de la fréquence pour différents types de sol et d'eau [59]. Selon la figure III.7, on peut remarquer qu'aux fréquences supérieures à 10 GHz la profondeur de pénétration est quasi nulle excepté dans la glace (quelques centimètres voire quelques dizaines de centimètres).

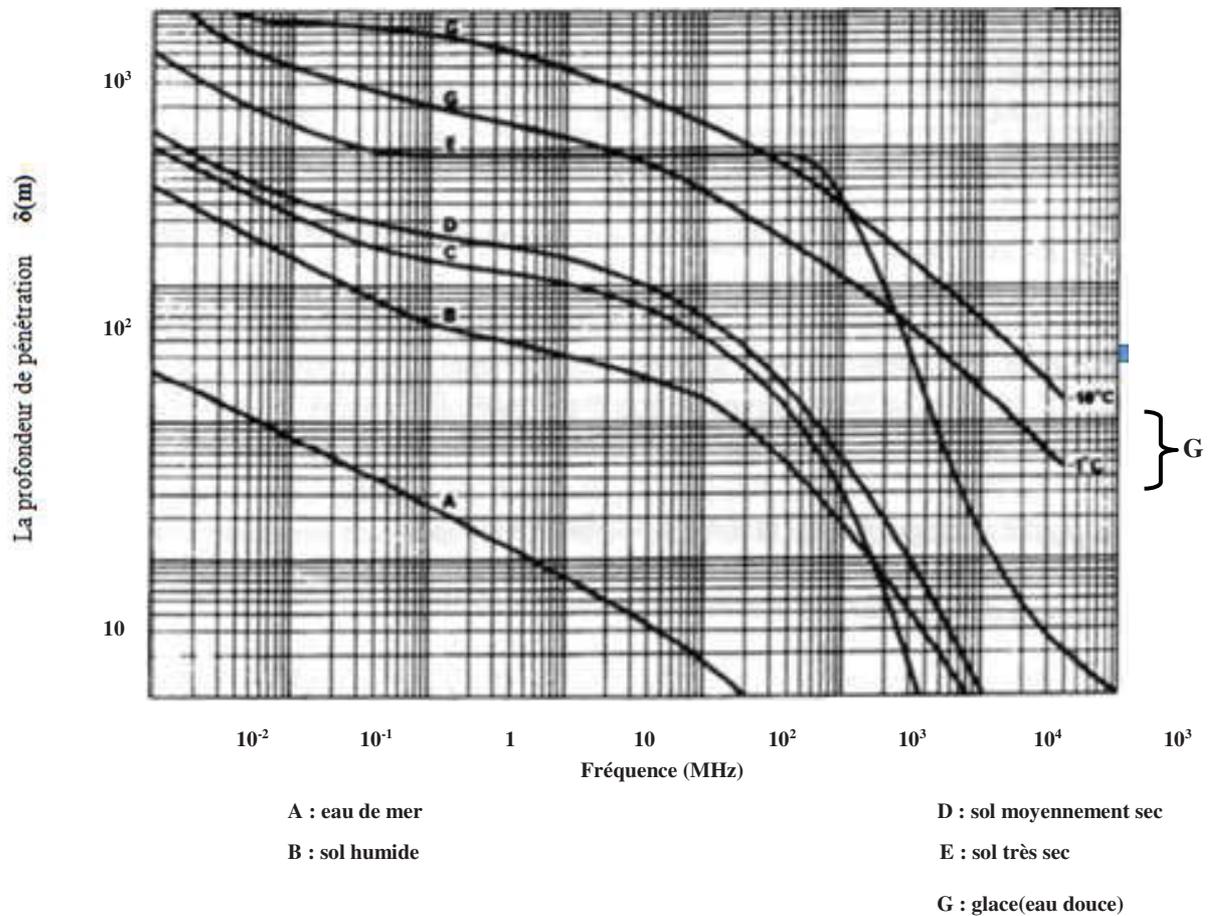


Figure III.7: profondeur de pénétration en fonction de la fréquence [60].

c) Diffraction

La diffraction permet de contourner les obstacles (immeuble colline, végétation, toits, coins de bâtiment, structures routières ou autres). Elle se produit lorsqu'une onde coïncide avec une arête dont les dimensions sont grandes devant la longueur d'onde (voir figure III.8). Elle constitue l'un des facteurs les plus importants intervenant dans la propagation des ondes radioélectriques. L'utilisation de la Théorie Géométrique de la Diffraction (TGD) [62] permet de représenter ce phénomène sous forme de rayons. La théorie montre que l'affaiblissement supplémentaire (hors espace libre) de la diffraction a une dépendance en fréquence en $10\log(f)$ pour ce qui est de la diffraction par une arête. Elle est très présente pour la propagation des ondes dans les bandes de fréquences allant jusqu'à quelques GHz. Au-delà des fréquences supérieures à 15 GHz, l'affaiblissement de diffraction peut devenir important par rapport à un simple affaiblissement de réflexion.

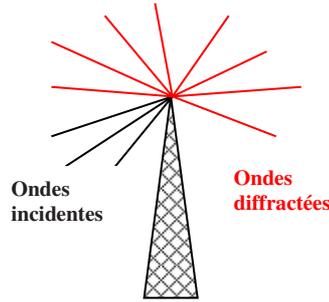


Figure III.8: Onde diffractée.

Afin d'évaluer un ordre de grandeur de l'affaiblissement par diffraction dans les bandes de fréquences qui nous intéressent, considérons une arête sans épaisseur au sommet à la hauteur h par rapport à la droite qui joint l'émetteur T au récepteur R . Soit d la distance totale, d_1 et d_2 les distances respectives de l'arête à l'émetteur et au récepteur (figure III.9).

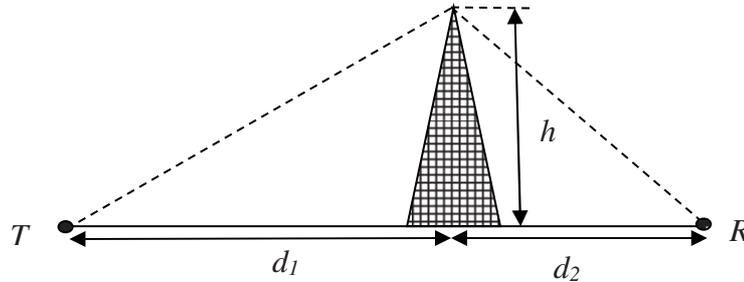


Figure III.9: Géométrie des obstacles pour affaiblissement par diffraction.

Si l'on prend comme variable v qui est le rapport entre la hauteur h et r le rayon de l'ellipsoïde de Fresnel aux distances d_1 et d_2 des antennes T et R respectivement [25] :

$$v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \quad (\text{III.6})$$

Le champ E à l'emplacement du récepteur est donné en amplitude et en phase, par rapport à l'espace libre, par l'expression suivante [25]:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{1}{1+j} \int_0^{+\infty} e^{j\pi \frac{t^2}{z}} dt \quad (\text{III.7})$$

où E_0 est le champ existant en l'absence d'arête.

Le rapport des puissances correspondantes s'écrit alors [25]:

$$\frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{2} - \xi(v) \right)^2 + \left(\frac{1}{2} - \mu(v) \right)^2 \right] \quad (\text{III.8})$$

En désignant par $\xi(v)$ et $\mu(v)$, les intégrales de Fresnel [62] sont :

$$\xi(v) = \int_0^v \cos \frac{\pi t^2}{2} dt \quad (\text{III.9})$$

$$\mu(v) = \int_0^v \sin \frac{\pi t^2}{2} dt \quad (\text{III.10})$$

Si v est négatif, c'est à dire lorsque le sommet de l'arête est au-dessous de la droite reliant l'émetteur au récepteur, P/P_o tend en oscillant vers le niveau d'espace libre, tandis que pour v positif, P/P_o décroît régulièrement à mesure que l'obstruction de l'arête augmente. Pour v nul, l'émetteur et le récepteur sont alignés avec le sommet de l'arête et l'affaiblissement est de 6 dB (en optique on a la visibilité tandis qu'en radio on perd 6 dB) [25].

Un calcul approché de l'atténuation causée par la diffraction peut être fait. La formule recommandée est valide lorsque $v > -0.55$, sinon on considère aucune atténuation par diffraction et l'affaiblissement est nul car la zone de Fresnel est dégagée et on néglige les oscillations de l'interférence [63] :

$$10 \log \frac{P}{P_0} = 6,9 + 20 \log [\sqrt{w^2 + 1} + w] \quad (\text{III.11})$$

Avec :

$$w = \sqrt{2}v - 0.1 \quad (\text{III.12})$$

Afin de se fixer des ordres de grandeur, évaluons l'équation (III.11) expression approchée sur une distance d de 1Km entre l'émetteur et le récepteur avec d_1 et d_2 à mi-distance de l'obstacle, pour deux valeurs de la hauteur h de 1m et 10m respectivement, à 4 fréquences (20, 40, 60 et 100 GHz). Le tableau III.1 résume ces résultats :

Tableau III.1 : Evaluation de l'affaiblissement par diffraction.

Fréquence en GHz	Affaiblissement	
	$d_1=0,5 \text{ Km et } d_2= 0,5 \text{ km}$	
	$h=1 \text{ m}$	$h= 10 \text{ m}$
20	55,8	95,4
40	61,7	101,4
60	65,2	104,9
100	69,5	109,4

Également à ces fréquences, cette possibilité de propagation, compte tenu des affaiblissements mis en jeu, n'est habituellement pas prise en compte dans le déploiement de la liaison car trop sanctionnant au niveau du bilan. Il est donc généralement admis que les liaisons millimétriques sont des liaisons en visibilité : On ne considère donc pas d'obstacle engagé dans le premier ellipsoïde de Fresnel. Des mesures [63-65] et des simulations réalisées [64] ont montré que le phénomène était négligeable par rapport à la réflexion spéculaire.

d) Diffusion

La diffusion apparaît lorsque l'obstacle présente de nombreuses irrégularités de la taille par rapport à la longueur d'onde. Sachant que les obstacles soient généralement de grande taille par rapport à la longueur d'onde ($\lambda < 2\text{cm}$), leurs surfaces doivent être bien souvent considérées comme " rugueuses " (balcons, fenêtre des façades, mobilier urbain, végétation).

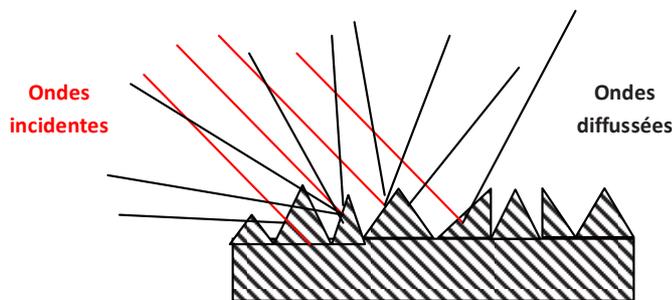


Figure III.10: La Diffusion des ondes.

e) Guidage

Quelques environnements urbain et suburbains typiques (rues étroites, tunnels, ... etc.) cernent la propagation des ondes radioélectriques comme de véritables guides d'ondes. Ce phénomène est dû à de multiples réflexions successives sur les parois des rues, des tunnels, ...etc. (figure III.11). Dans ce cas, on applique la théorie des modes de propagation et celle des rayons, et ceci plus particulièrement lorsque la longueur d'onde est très petite par rapport à la section traversée du tunnel ou de la ruelle [66].

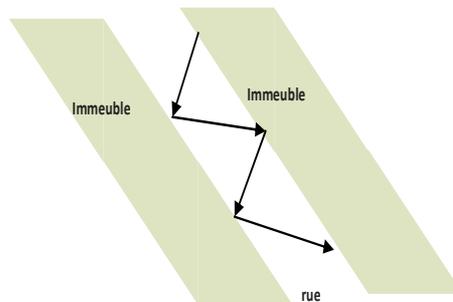


Figure III.11: Le guidage des ondes

III-4- Principaux phénomènes physiques et dépendance en fréquence.

III-4-1-Différents trajets de propagation

La propagation radio mobile est une propagation multi-trajets (on retrouve aussi cette notion en propagation ionosphérique par réflexion sur les différentes couches). Les signaux suivent souvent des trajets de longueurs différentes pendant des temps de parcours différents également et arrivent au récepteur avec des phases différentes. Parmi ces trajets, on distingue :

- **Trajets directs** : l'onde suit le segment de droite passant par le point d'émission et de réception.
- **Trajets transmis** : généralement le trajet direct n'existe pas. Il est souvent fermé plus particulièrement par différents obstacles telque les immeubles, la végétation, ...etc. Son rôle est assez faible.
- **Trajets réfléchis** : les ondes arrivent au récepteur suite à des réflexions sur différents obstacles (façades d'immeubles, flancs des montagnes, sol, ...etc.). Ces différents trajets contiennent suffisamment d'énergie pour être efficaces.
- **Trajets diffractés** : les ondes peuvent contourner des obstacles par diffraction (massifs de végétation, immeubles, arêtes des toits, collines,).
- **Trajets diffusés** : ce phénomène se manifeste plus spécialement lorsque l'onde rencontre des surfaces qui ne sont pas lisses (sol, végétation, mer...) ou des hétérogénéités petites par rapport à la longueur d'onde. Le concept de surface lisse est étroitement lié à la fréquence.

Ces différents trajets, d'amplitude et de phases différentes, interfèrent en arrivant au récepteur. Les interférences sont soit constructives (les trajets arrivent en phase), d'où renforcement du signal ; soit destructives et on a alors un évanouissement du signal. De plus il est à noter que le mobile se déplace dans cette image d'interférences. Il voit successivement des tâches lumineuses et des tâches sombres (les franges d'interférences) provoquant des évanouissements du signal.

III-4-2-Propriétés du canal

Vu la présence de trajets multiples et du déplacement de la station de réception, le canal de propagation dispose de trois propriétés fondamentales : affaiblissement, variabilité, et sélectivité en fréquence (voir annexe 4).

En analogique, la notion d'affaiblissement était suffisante pour étudier le canal de propagation. En contexte de communication numérique, les évanouissements dus à la variabilité et à la sélectivité induisent des dégradations de la qualité de la communication indépendamment de l'affaiblissement.

III-5-Modèles de propagation

III-5-1-Affaiblissement de propagation en espace libre

Différents modèles d'affaiblissements sont définis dans la littérature [25]. On distingue généralement l'affaiblissement de propagation en espace libre visible (LOS) et en espace non visible (NLOS).

Le modèle de l'affaiblissement de propagation en espace libre entre dans l'évanouissement à grande échelle. Il est utilisé pour prédire l'intensité du signal reçu dans le l'environnement direct de visibilité entre l'émetteur et le récepteur (LOS) où il n'y a pas d'obstacle entre eux. Il est souvent adopté pour les systèmes de communication par satellite. Soit d la distance en mètres entre l'émetteur et le récepteur. Lorsque des antennes non isotropes sont utilisées avec un gain G_t de l'antenne de transmission et un gain G_r de l'antenne de réception, la puissance reçue à la distance d est $P_r(d)$ exprimée par l'équation de Friis [66] donnée comme suit :

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (\text{III.13})$$

Où :

P_t : représente la puissance d'émission (Watts),

λ : est la longueur d'onde du rayonnement (m),

L : est le facteur de perte du système qui est indépendant de l'environnement de propagation,

G_t : le gain de l'antenne de transmission,

G_r : le gain d'antenne de réception,

$P_r(d)$: la puissance reçue à la distance d .

Le facteur de perte du système représente l'affaiblissement ou la perte totale du matériel réel du système, y compris la ligne transmission, filtre et antennes.

En général, $L > 1$, mais $L = 1$ si l'on suppose qu'il n'y a pas de perte de matériel du système. Il est évident à partir de l'équation (III.13) que la puissance reçue s'atténue

exponentiellement avec la distance d . La perte de trajet en espace libre, $PL_F(d)$, peut être directement déduite de l'équation (III.13) avec $L = 1$ comme :

$$PL_F(d)[dB] = 10 \log \frac{P_t}{P_r} = -10 \log \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \quad (III.14)$$

Sachant que l'affaiblissement en espace libre est l'affaiblissement de transmission due à la dispersion de l'énergie de l'onde qui serait obtenu si les antennes étaient remplacées par des antennes isotropes placées dans un milieu diélectrique parfait, homogène et illimité, la distance entre antennes étant conservée. Dans ce cas les gains d'antenne ($G_t = G_r = 1$), et l'affaiblissement est donné par la relation suivante :

$$PL_F(d)[dB] = 10 \log \frac{P_t}{P_r} = 20 \log \frac{4\pi d}{\lambda} \quad (III.15)$$

Après développement de l'équation (III.15) on aura :

$$PL_F(d)[dB] = 32,4 + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}(d) \quad (III.16)$$

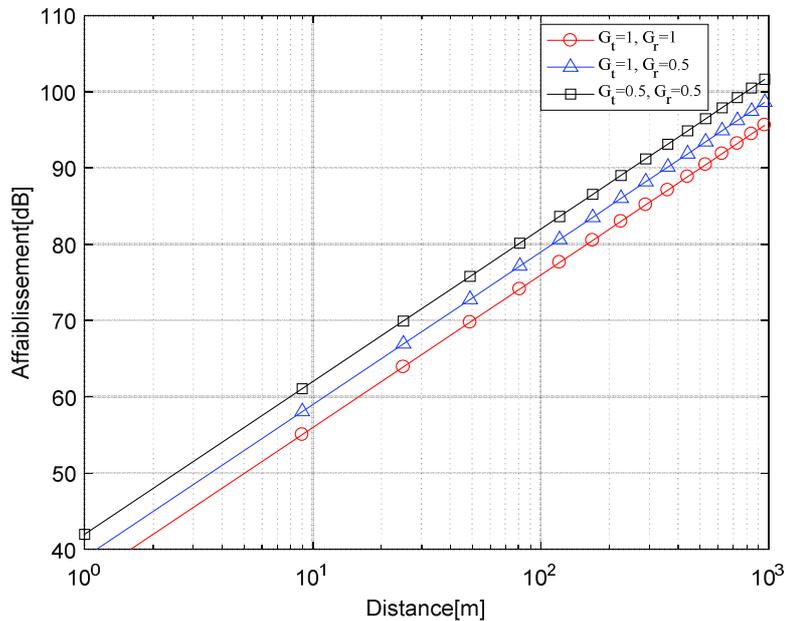


Figure III.12 : Modèle d'affaiblissement en espace libre.

Où :

d : est la distance entre l'émetteur et le récepteur (km),

λ : est la longueur d'onde (m),

f : est la fréquence (MHz).

La figure III.12 montre la perte de trajet en espace libre à une fréquence $f = 1,5$ GHz pour des valeurs différents des gains des antennes d'émission et de réception et pour différentes distances. Il est évident que l'affaiblissement du parcours ou du trajet augmente lorsque les gains d'antenne diminuent. Comme dans le modèle d'espace libre susmentionné, la moyenne reçue du signal dans tous les autres environnements réels diminue avec la distance d entre l'émetteur et récepteur d'une manière logarithmique.

III-5-2-Modèle log-distance

Le modèle log-distance est en fait une forme plus généralisée du modèle d'affaiblissement du parcours et qui peut être construit en modifiant l'affaiblissement du parcours en espace libre avec le coefficient de propagation n (n varie avec les types d'environnements). L'affaiblissement du parcours à la distance d est donné par :

$$PL_{LD}(d)[dB] = PL_F(d_0) + 10n \log \frac{d}{d_0} \quad (III.17)$$

Où d_0 est une distance de référence. Comme indiqué dans le tableau III.2, le coefficient de propagation n de l'affaiblissement de parcours n peut varier de 2 à 6 en fonction de l'environnement où la propagation se fait.

De plus, n tend à augmenter car il y a plus d'obstacles dans la réalité et dans la plupart des environnements où la propagation se fait. Pendant ce temps, la distance de référence d_0 doit être correctement déterminée pour différents environnements de propagation. Par exemple, d_0 est généralement fixé à 1 km pour un système cellulaire avec une large couverture (rayon de cellule supérieur à 10 km par exemple). Cependant, il pourrait être de 100 m ou 1 m, respectivement, pour un système macrocellulaire (avec un rayon de cellule de 1 km) ou un système microcellulaires (avec un très petit rayon) [67].

Tableau III.2 : Exposant de l'affaiblissement de parcours [67].

Type d'environnement	Coefficient de propagation (n)
Espace libre	2
Zone urbaine	2.7-3.5
Zone suburbaine	3-5
A l'intérieur des constructions en ligne de vue directe	1.6-1.8
A l'intérieur des constructions en présence d'obstacle	4-6
A l'intérieur des usines avec obstacle	2-3

La figure III.13 montre l'affaiblissement pour le modèle log-distance défini par l'équation (III.17) à la fréquence porteuse de $f = 1,5$ GHz pour des valeurs différentes du coefficient de

propagation n . On voit clairement que l'affaiblissement augmente chaque fois que n augmente, ce qui implique l'influence de l'environnement sur l'affaiblissement.

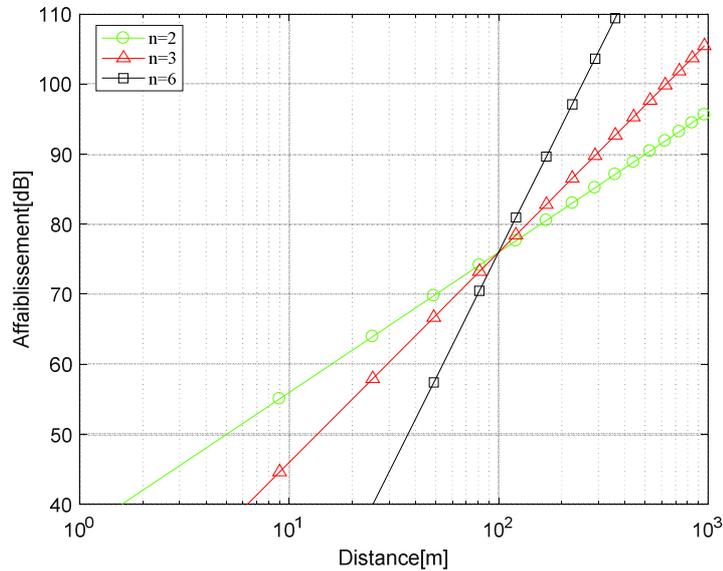


Figure III.13 : Modèle d'affaiblissement log-distance.

III-5-3-Modèle Log normal shadowing

Il est clair que l'affaiblissement de parcours augmente avec le coefficient de propagation n . Chaque trajet peut avoir une perte de trajectoire différente, puisqu'en pratique, les environnements proches peuvent varier en fonction de l'emplacement du récepteur. Cependant, tous les modèles d'affaiblissement de parcours susmentionnés ne prennent pas cette situation particulière en compte. Un modèle d'effet de masque log-normal est utile pour traiter une situation plus réaliste. Soit X_σ une variable aléatoire gaussienne avec une moyenne nulle et un écart-type σ . Ensuite, le modèle d'effet de masque log-normal est donné par :

$$PL_{LNS}(d)[dB] = PL_{LD}(d) + X_\sigma = PL_F(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (\text{III.18})$$

L'équation (III.18) n'est pas prise en considération que si deux positions du récepteur auront la même distance avec l'émetteur, les puissances reçues peuvent être différentes [25]. En effet les expériences ont montré que pour une distance d l'atténuation à une distance donnée est aléatoire. Pour cela la variable aléatoire X_σ obéissant à la loi log normale et modélisant l'effet de masque est ajoutée au modèle.

La figure III.14 illustre l'affaiblissement de parcours qui suit le modèle log-normal à effet de masque pour une fréquence $f = 1,5$ GHz avec $\sigma = 2$ dB, $d_0 = 100$ m et $n = 2$. On voit nettement l'effet aléatoire dû à l'effet de masque qui impose la nature déterministe de ce modèle.

L'allure aléatoire de l'affaiblissement pour trois trajets différents pour un environnement ouvert et pour une fréquence de 1500 MHz est donnée par la figure III.14.

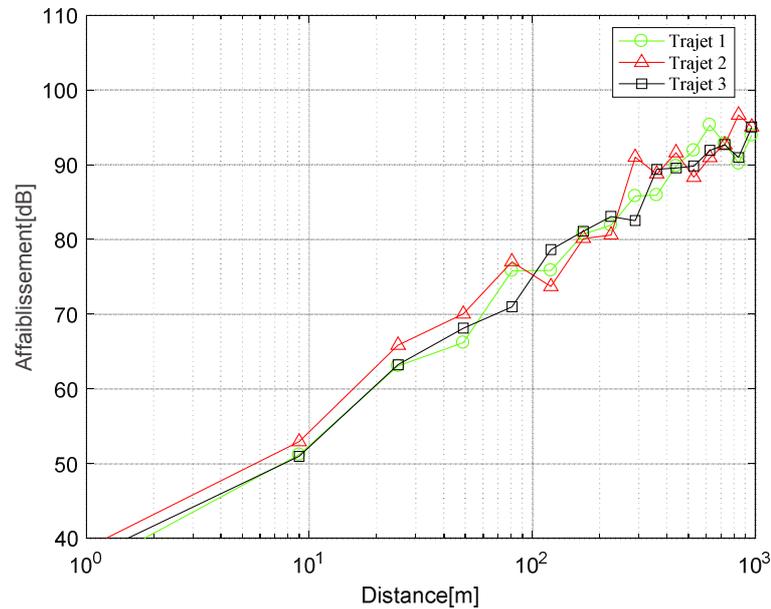


Figure III.14 : Modèle d'affaiblissement log-normal à effet de masque.

III-6-Modèles de prédiction empirique

Les modèles de prédiction empiriques de propagation sont, en réalité, des formulations mathématiques exprimant l'atténuation en fonction de plusieurs paramètres tels que la fréquence d'émission, le degré d'urbanisation, la hauteur des terminaux, ... etc.

Leur qualification d'empirique vient du fait que ces modèles sont élaborés à partir des statistiques effectuées sur un ensemble de mesures [68].

La classification des modèles empiriques se fait selon leurs distances d'application. Ainsi, nous pouvons distinguer les modèles macro cellulaire et les modèles micro-cellulaires. Dans notre travail, nous nous sommes intéressés à la propagation dans les environnements urbains denses, suburbains et ruraux. Donc la catégorie des modèles macro et micro-cellulaires est celle qui nous intéresse. Pour affiner notre étude, nous allons donner un aperçu sur les modèles Outdoor.

III-6-1-Modèles Outdoor

a) Modèle Okumura

Le modèle Okumura [69-70] est un modèle empirique classique bien connu pour mesurer la puissance du signal radio dans les zones d'agglomération. Le modèle a été construit par les

données recueillies dans la ville de Tokyo au Japon. Okumura a obtenu des données de mesure étendues pour l'affaiblissement médian par rapport à l'espace libre A_{mn} pour différentes distances et différentes fréquences.

Il a fait des mesures dans la ville de Tokyo ; et donc son modèle était fondamentalement applicable à la ville urbaine, et plus précisément, pour les zones urbaines denses avec des terrains quasi-lisse. Avec moins de précision, le modèle peut également être utilisé pour d'autres environnements comme les zones suburbaines et rurales en ajoutant un facteur de correction de zone G_{AREA} . Le modèle est applicable aux distances de 1 km à 100 km, avec une gamme de fréquences de 150 MHz à 1920 MHz, et des hauteurs des antennes des stations de base de 30 à 1000 m [71].

Sur la base de mesures, Okumura a pu dessiner la courbe de la figure III.15 pour l'atténuation médiane qui est fonctions de la distance et de fréquence [70]. La perte de chemin moyenne totale due au modèle est décrite dans la formule suivante :

$$PL_{OK}[dB] = L_f + A_{mn}(f, d) - G(h_b) - G(h_r) - G_{AREA} \quad (III.19)$$

Où :

PL_{Ok} : Affaiblissement de parcours Médian [dB]

L_f : Affaiblissement de parcours en espace libre [dB]

$A_{mn}(f, d)$: Affaiblissement médian en espace libre [dB]

$G(h_b)$: Facteur de gain de l'antenne d'émission [dB]

$G(h_r)$: Facteur de gain de l'antenne du mobile (réception) [dB]

G_{AREA} : Facteur de correction du gain dû à l'environnement [dB]

$A_{mn}(f, d)$ et G_{AREA} sont trouvés à partir des graphiques de la figure III.15. Les facteurs de gain des hauteurs des antennes d'émission et de réception sont donnés par [69]:

$$G(h_b) = 20 \log_{10} \left(\frac{h_b}{200} \right) \quad 30m < h_b < 1000m \quad (III.20)$$

$$G(h_r) = 20 \log_{10} \left(\frac{h_r}{200} \right) \quad h_r \leq 3m \quad (III.21)$$

$$G(h_r) = 20 \log_{10} \left(\frac{h_r}{200} \right) \quad 3m < h_r < 10m \quad (III.22)$$

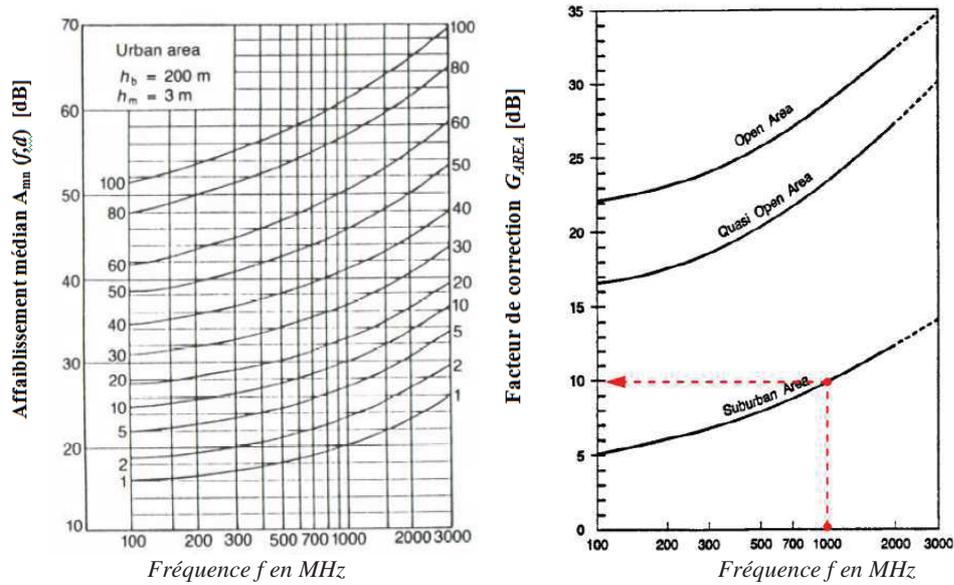


Figure III.15 : Les courbes d'Okumura [72].

À titre d'exemple, les indicateurs en pointillés rouges de la figure III.15 montrent comment lire les valeurs de $A_{mn}(f,d)$ et G_{AREA} à partir des courbes d'Okumura à la fréquence 1000 MHz, à 80 km de la station de base dans une zone de banlieue.

b) Modèle d'Okumura-Hata

Le modèle Okumura a été étendu pour couvrir les différents environnements de propagation, y compris les zones urbaines, suburbaines et rurales qui est maintenant connu comme le modèle Okumura-Hata [73]. Le modèle Hata est actuellement le modèle de prédiction de l'affaiblissement de parcours le plus populaire. Pour une hauteur de l'antenne de transmission h_r [m], et une fréquence f [MHz], l'affaiblissement à la distance d [m] dans une zone urbaine est donné par le modèle Hata comme suit :

$$PL_{OH_{Urb}}(d)[dB] = 69,55 + 26,16 \log_{10}(f) - 13,82 \log_{10}(h_b) - C_m + (44,9 - 6,55 \log_{10}(h_b)) \log_{10}(d) \quad (\text{III.23})$$

Où h_b [m] est la hauteur de l'antenne d'émission, h_r [m] est la hauteur de l'antenne de réception et C_m est le coefficient de correction qui dépend de la taille de la zone à couvrir.

Pour les moyennes et petites cellules, C_m est donné par :

$$C_m = 0,8 + (1,1 \log_{10}(f - 0,7)) h_r - 1,56 \log_{10}(f) \quad (\text{III.24})$$

Pour une macro cellule, C_m dépend de la plage de la fréquence porteuse, par exemple,

$$C_m = \begin{cases} 8,29(\log_{10}(1,54h_r))^2 - 1,1 & \text{si } 150\text{MHz} \leq f \leq 200\text{MHz} \\ 3,2(\log_{10}(11,75h_r))^2 - 4,97 & \text{si } 200\text{MHz} \leq f \leq 1500\text{MHz} \end{cases} \quad (\text{III.25})$$

D'autre part, les affaiblissements de parcours à une distance d dans les zones suburbaines et rurales sont donnés respectivement par le modèle Okumura-Hata comme suit :

$$PL_{OH\text{Sub}}(d)[\text{dB}] = PL_{OH\text{Urb}}(d) - 2(\log_{10}(\frac{f}{28}))^2 - 5,4 \quad (\text{III.26})$$

$$PL_{OH\text{Rur}}(d)[\text{dB}] = PL_{OH\text{Urb}}(d) - 4,78(\log_{10}(f))^2 + 18,33\log_{10}(f) - 40,97 \quad (\text{III.27})$$

La figure III.16 présente les courbes de l'affaiblissement de parcours pour les trois environnements différents, urbain, suburbain, et ruraux données par les modèles des équations (III.23), (III.26) et (III.27), respectivement. A noter que les obstructions denses observées dans la zone urbaine causent le plus d'affaiblissement du signal le long de son parcours par rapport aux autres zones.

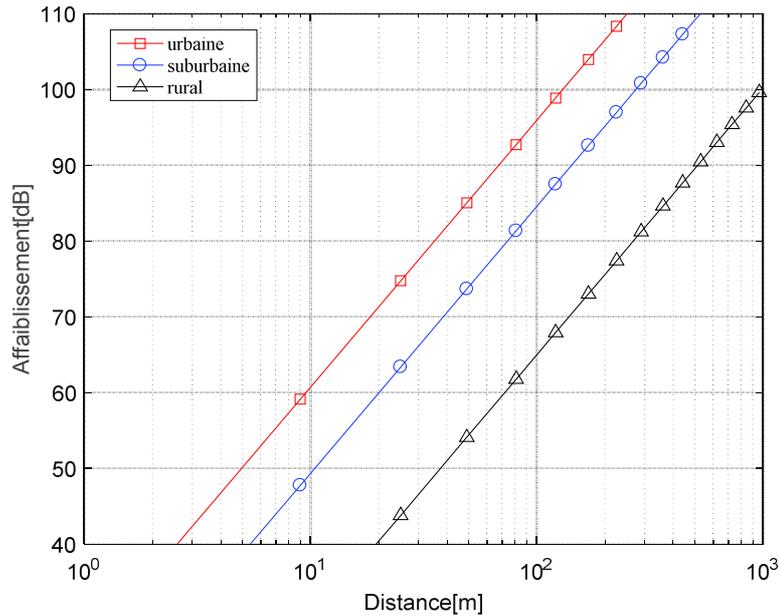


Figure III.16 : Affaiblissement de parcours pour le modèle Okumura-Hata.

c) Modèle de Walfisch-Bertoni

Dans le cas des zones urbaines denses, le modèle se rapproche des rangées de bâtiments avec des distances, des hauteurs et des séparations uniformes. Étant un modèle semi-empirique, il a une formulation pour l'affaiblissement de parcours qui introduit plus de paramètres que le modèle Okumura-Hata. Le modèle synthétise l'affaiblissement de parcours en trois composantes, l'affaiblissement en espace libre, l'affaiblissement le long des bâtiments et l'affaiblissement au niveau des rues.

Pour calculer l'affaiblissement le long des bâtiments, le modèle utilise le théorème de l'intégrale de Kirchhoff répétée pour des écrans parallèles qui représentent les obstacles uniformes (c'est une application scalaire de la théorie de la diffraction avec quelques approximations) [74].

Le modèle est représenté par l'équation suivante :

$$PL_{w1}(d) [dB] = 89,5 - 10(\log_{10} [\frac{\rho_1 d^{0,9}}{(H_B - h_m)^2}]) + 21\log_{10}(f) - 18\log_{10}(h_t - H_B) + 38\log_{10}(D) \quad (\text{III.28})$$

$$\rho_1 = \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + (H_B - h_m)^2} \quad (\text{III.29})$$

Où :

f : est la fréquence en [MHz],

D : est la distance entre l'émetteur et le récepteur en [Km],

ρ_1 : est la distance du trajet en [m],

d : est la distance qui sépare les bâtiment en [m],

h_m : est la hauteur de l'antenne de réception (mobile) en [m],

h_t : est la hauteur de l'antenne d'émission (BTS) en [m].

H_B : est la hauteur des bâtiments en [m]

Sur la base de la théorie, la figure III.17 nous montre l'affaiblissement de parcours pour le modèle de Walfisch-Bertoni lorsque la propagation se produit le long des bâtiments avec une hauteur et un espacement uniforme.

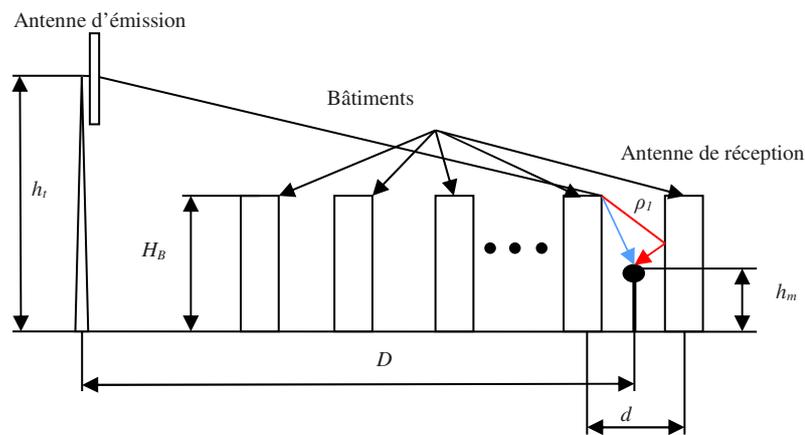


Figure III.17 : Affaiblissement de parcours pour le modèle Walfisch- Bertoni.

Les simulations ont été tracées pour différentes fréquences f , hauteurs d'émetteur h_t , séparations des bâtiments, distances d et H_B les hauteurs de construction. La figure III.18 nous montre l'influence de la fréquence sur l'affaiblissement du parcours en utilisant le modèle Walfisch-Bertoni ; l'affaiblissement augmente avec l'augmentation de la fréquence f (hauteur de l'antenne de réception égale à 1,7 mètre, une distance entre les bâtiments égale à 40 mètres, une hauteur des bâtiments de 15 mètres et une antenne de transmission d'une hauteur de 35 mètres).

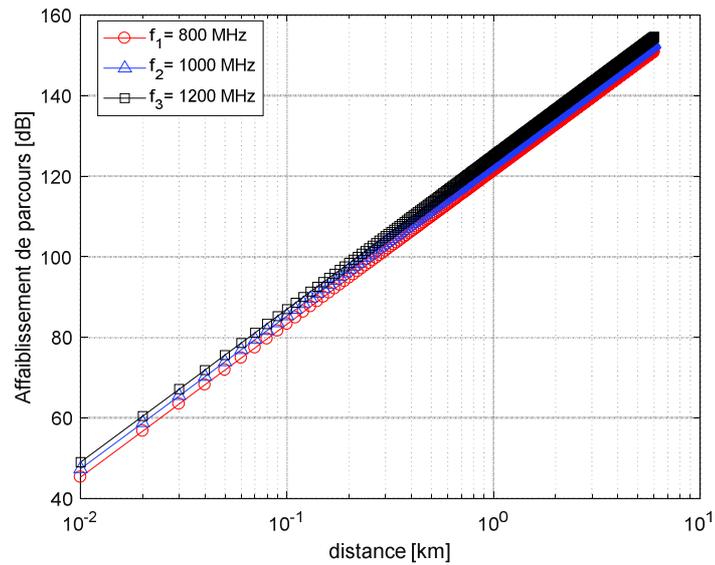


Figure III.18 : Dépendance en fréquence de l'affaiblissement de parcours pour le modèle Walfisch-Bertoni.

La figure III.19 nous montre cette fois ci l'influence de la hauteur de l'antenne d'émission sur l'affaiblissement du parcours en utilisant le modèle Walfisch-Bertoni, où il augmente avec la diminution de la hauteur de l'antenne d'émission h_t pour une hauteur de l'antenne de réception égale à 1,7 mètre, une distance entre les bâtiments égale à 40 mètre, une hauteur des bâtiments de 15 mètre, et une fréquence de 1000MHz.

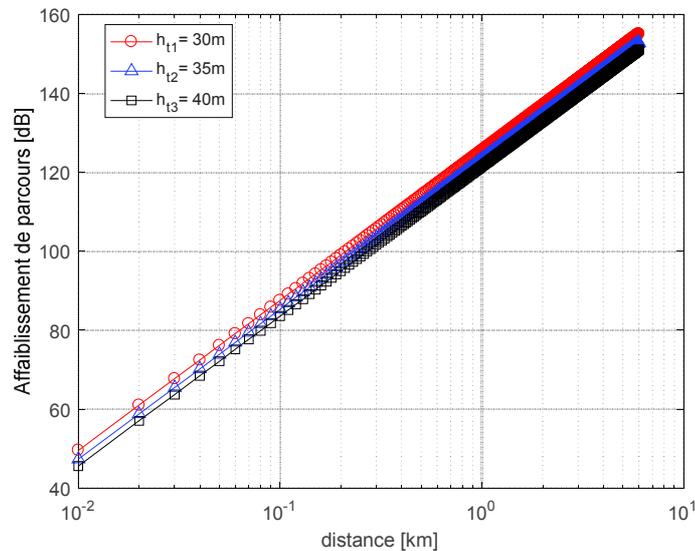


Figure III.19 : Dépendance de l'affaiblissement de parcours à la hauteur du transmetteur pour le modèle Walfisch-Bertoni.

Pour la figure III.20, quant à elle, nous permet de voir la dépendance de l'affaiblissement de parcours pour ce modèle à la distance qui sépare les bâtiments où la propagation ce fait, l'affaiblissement augmente avec la diminution de la distance qui sépare les bâtiments d (Pour une hauteur de l'antenne de réception égale à 1,7 mètre, différentes valeurs de la distance qui sépare les bâtiments, une hauteur des bâtiments de 15 mètre, une hauteur de l'antenne d'émission 35 m, et une fréquence de 1000MHz).

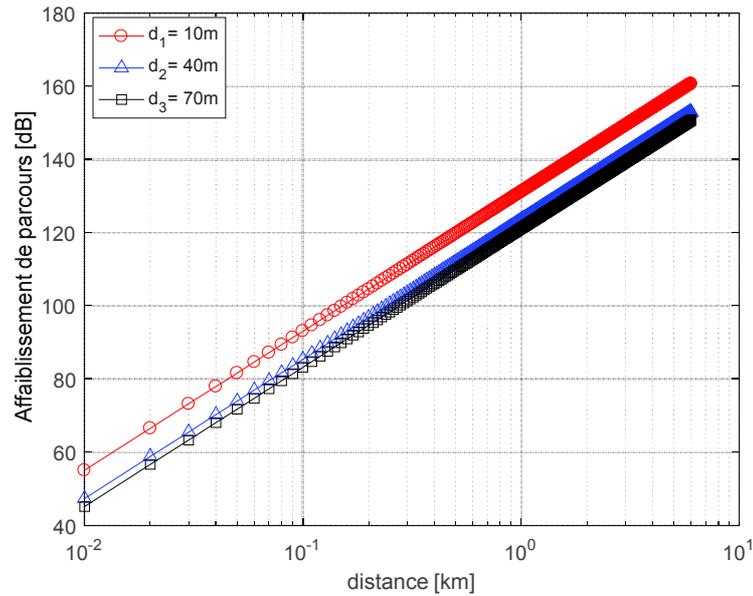


Figure III.20 : Dépendance de l'affaiblissement de parcours à la distance séparant les bâtiments pour le modèle Walfisch-Bertoni.

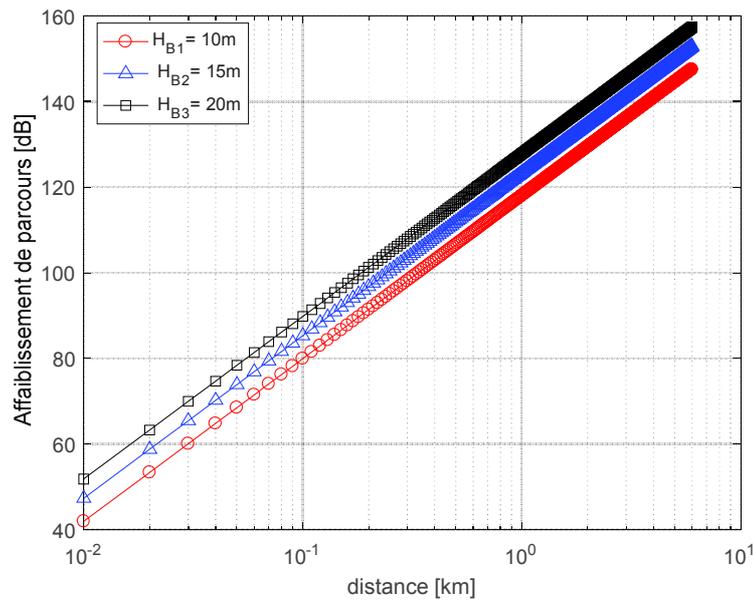


Figure III.21 : Dépendance de l'affaiblissement de parcours à la hauteur des bâtiments pour le modèle Walfisch-Bertoni.

Enfin, en ce qui concerne la figure III.21, elle nous permet de voir la dépendance de l'affaiblissement de parcours pour ce modèle de Walfisch-Bertoni à la hauteur des bâtiments où la propagation se fait. On voit clairement l'augmentation de l'affaiblissement avec l'augmentation de la hauteur des bâtiments H_B (pour une hauteur de l'antenne de réception égale à 1,7 mètre, différentes valeurs pour la hauteur des bâtiments, pour une distance qui sépare les bâtiments de 40 mètres, une hauteur de l'antenne d'émission égale à 35 mètres et une fréquence de 1000MHz).

III-7- Conclusion

Pendant la propagation de l'onde électromagnétique, celle-ci subie plusieurs phénomènes dont la plupart ont un effet nuisible. Tous les aspects physiques liés à la propagation sont clairement exposés, tels que l'évanouissement à grande échelle, l'effet de masque, l'évanouissement à petite échelle. A noter qu'au cours de sa propagation, l'onde est exposée à plusieurs mécanismes de propagation qui vont aider et parfois nuire à la propagation pendant la traversée des différents environnements. Parmi ces mécanismes, on peut citer la réflexion, la réfraction et la diffraction spéculaire ou diffuse.

Les modèles empiriques que nous avons vus dans ce chapitre permettent de donner une modélisation globale de ces effets. Sachant qu'il existe d'autres modèles pour modéliser ces effets qui traduisent l'affaiblissement en fonction de plusieurs paramètres tels que les hauteurs des bâtiments, la distance qui sépare les bâtiments, ...etc. A noter que pour l'adaptation d'un modèle à un cas donné, un arrangement de quelques paramètres pour améliorer la précision des modèles doit être fait.

Nous avons explicité les modèles de propagation les plus connus tel que le modèle de l'affaiblissement en espace libre qui représente un modèle de référence, le modèle log-distance, ainsi que le modèle log normal shadowing. Nous nous sommes intéressés aussi à la présentation de quelques modèles empiriques et semi- empiriques les plus couramment utilisés pour la prédiction de la propagation. Nous avons choisi à titre d'exemple le modèle Okumura-Hata dont l'optimisation est l'objet de notre travail et qui sera abordée dans le chapitre suivant.

Nous avons, aussi, présenté le modèle Walfisch-Bertoni, qui est un modèle que nous pouvons classer comme semi- empiriques et qui ne se base pas seulement sur la fréquence et la hauteur des antennes de transmission et réception, mais aussi il prend en considération la hauteur des bâtiments et la distance qui les sépare. Il est mieux adapté à un type d'urbanisme bien organisé. A noter que ce modèle n'est pas adapté à notre urbanisme puisque que le nôtre n'est pas uniforme.

Chapitre IV

Optimisation du modèle Okumura Hata par la régression linéaire

IV-1-Introduction

La communication sans fils entre objets requiert une bonne connaissance du canal de propagation radioélectrique. Il est en effet nécessaire d'évaluer au préalable le comportement des ondes dans l'environnement considéré pour pouvoir ensuite paramétrer la puissance d'émission, la polarisation, ..., choisir les antennes, la modulation, le protocole de transmission, ...etc.

D'après les études menées dans les chapitres précédents, notamment le développement des modèles et les mécanismes de propagation ainsi que les modèle de prédiction, certaines améliorations peuvent être introduites afin d'avoir une approche plus efficace vis-à-vis à la propagation dans nos villes.

Dans ce chapitre une approche pour le développement d'un modèle plus approprié et plus proche de la réalité de nos villes sera présentée. Elle consiste en l'optimisation du modèle Okumura-Hata qui est le plus souvent utilisé dans les logiciels de simulation notamment le logiciel Atoll, basé sur des mesures faites sur le terrain pour différents types d'environnements (urbain, suburbain, rural) de la ville d'Annaba.

Ce chapitre sera articulé comme suit. Dans une première partie, on donnera un aperçu sur la qualité de service. La deuxième partie est dédiée à une présentation détaillée sur les activités expérimentales menées. La partie suivante offre une description de la méthodologie adoptée et présente les résultats sur l'implémentation de l'Optimisation par la régression linéaire du modèle d'Okumura Hata appliqué à la ville d'Annaba. L'algorithme suivi pour atteindre les objectifs sera présenté dans la quatrième partie. La validation des résultats et les commentaires seront fournis dans la cinquième partie. A la fin une conclusion sera présentée.

IV-2-Problématique et état de l'art

Nous avons constaté que l'étape de prédiction de l'affaiblissement de parcours est une étape inévitable et elle doit précéder toute procédure de déploiement d'un réseau cellulaire. Cette étape permet aux opérateurs de la téléphonie mobile de résoudre une partie de leurs problèmes importants qui est la minimisation voire l'élimination au maximum des zones de

silence, de quantifier les performances de leur système, et d'estimer la qualité de service offert. Cette étape permet aussi à l'opérateur d'évaluer le volume de l'investissement à faire pour attirer le maximum d'abonnés.

Donc un modèle de prédiction de la propagation des ondes radioélectriques adapté à un environnement donné est un élément essentiel pour la planification, le déploiement, et l'optimisation des performances d'un réseau mobile.

Les points clés de la planification radio sont : la couverture, la capacité et la qualité de service. Afin de permettre aux utilisateurs du réseau, d'accéder aux différents services mobiles, un accent particulier doit être mis sur le dimensionnement de la couverture radio. Les modèles de prédiction de la propagation des ondes radioélectriques sont largement utilisés dans la planification réseau à travers différents outils en particulier pour la réalisation d'études de faisabilité et de déploiement du réseau. Les modèles de prédiction sont également nécessaires lors des extensions du réseau.

Cette planification est une tâche difficile et continue dont le résultat conditionne la réussite de l'opérateur. Celui-ci doit répondre aux besoins des utilisateurs en garantissant une qualité de service acceptable tout en minimisant les coûts d'investissement. En plus, l'opérateur doit être toujours à l'écoute des différents changements et événements qui se déroulent sur son réseau afin de s'adapter aux besoins de ses abonnés. Ainsi, l'opérateur doit déterminer un calendrier de modification de son réseau permettant de supporter les évolutions futures du trafic et des technologies en garantissant la qualité attendue des communications et en induisant le coût le plus faible possible.

Pour maîtriser le problème de planification, l'opérateur doit évaluer en premier lieu les caractéristiques de l'environnement à couvrir, à savoir les caractéristiques radios de l'environnement de propagation, puis les caractéristiques des abonnés à desservir qui se résument dans leurs densités, mobilités, et leurs besoins en trafic. Ainsi, en possédant en main des modèles de propagation appropriés et des prévisions en trafic sur le court et le long terme et en réalisant des mesures sur le réseau existant, l'opérateur doit aboutir à un ensemble de décisions en installant :

- Un plan de stations de bases qui détermine leurs emplacements, leurs capacités et les puissances mises en jeu.
- Un plan de fréquences affectant à chaque station de base les fréquences de travail.
- Un plan des équipements du réseau fixe.
- Un réseau de connexion entre les différentes entités du réseau.

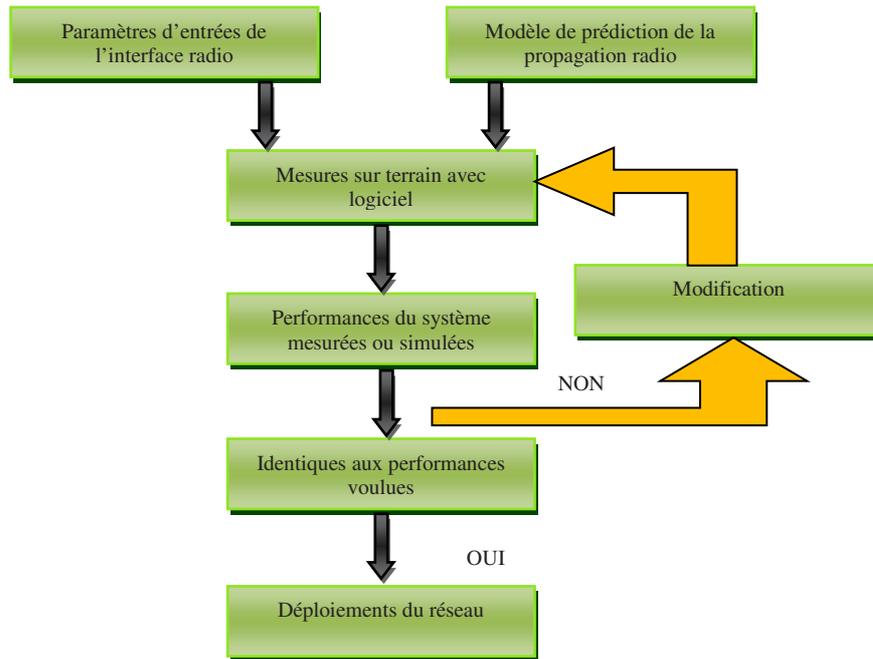


Figure IV.1 : Le processus général pour la planification cellulaire.

Le processus de planification se déroule suivant les étapes suivantes :

- Dimensionnement des équipements du réseau en déterminant le volume des équipements et les logiciels à acquérir et à déployer pour la fourniture des services de télécommunication mobiles.
- Planification du sous-système radio qui doit mener à la détermination des positions et capacités des stations de base et aussi à spécifier un plan de fréquences.
- Planification du sous-système réseau en spécifiant les emplacements et capacités des équipements du réseau fixe et les interconnexions entre eux.

La figure IV.1 illustre le processus général pour la planification cellulaire. Pour déterminer les caractéristiques du canal de propagation radio, les tests des modèles de propagation réels et la calibration des modèles existants sont nécessaires pour obtenir un modèle de propagation qui reflète exactement les caractéristiques de propagation radioélectrique dans un environnement donné.

Plusieurs types de logiciels de planification incluant la calibration de modèles existent sur le marché à savoir : ASSET de l'entreprise AIRCOM en Angleterre, PLANET de l'entreprise MARCONI, ATTOL de l'entreprise française FORK utilisé par Algérie Télécom pour Mobilis.

Plusieurs travaux dans ce contexte ont été fait par plusieurs auteurs qui se sont intéressés à la calibration des modèles de propagation, tels que [75, 78]

Certains auteurs se sont particulièrement intéressés à l'utilisation de la méthode des moindres carrés pour calibrer ou déterminer les modèles de propagation. On peut citer les travaux de [79-82]. En particulier, les auteurs de [83] ont travaillé sur l'influence des fréquences sur la prédiction dans des zones suburbaines avec différents modèles. Aussi, les auteurs de [84] ont traité une nouvelle approche pour la détermination d'un modèle de propagation adapté à un environnement basé sur des algorithmes génétiques pour la ville de Yaoundé, Cameroun. Ces mêmes auteurs ont traité cette fois-ci une nouvelle approche d'optimisation du modèle Okumura-Hata de propagation basée sur l'algorithme de l'essaim de particules [85].

Dans notre travail, nous avons utilisé des données expérimentales collectées en se déplaçant à travers le réseau de l'opérateur de la téléphonie mobile Mobilis et ceci dans la ville d'Annaba. Pour ce faire, nous avons utilisé 6 BTS réparties de part et d'autre dans la ville et nous avons utilisé un algorithme basé sur la régression linéaire pour déterminer un modèle de propagation adapté pour cette ville.

IV-3-Qualité de Service : principe et caractéristiques

Le terme QoS (quality of service) a une signification très importante dans le domaine des télécommunications. Il se rapporte à la rentabilité et à la fiabilité du réseau et de ses services. En effet, l'évaluation de l'état du système et la détection des dysfonctionnements sont des tâches fondamentales pour qu'un opérateur puisse avoir une maîtrise du réseau et mener à bien ses opérations et interventions de maintenance. Les réseaux mobiles d'une manière générale ont une particularité, par rapport aux réseaux fixes, surtout lorsqu'il s'agit d'évaluer les performances.

IV-3-1-Principes de la QoS dans les réseaux mobiles

La recommandation E-800 de l'UIT a défini la qualité de service par "un effet global produit par la qualité de fonctionnement d'un service qui détermine le degré de satisfaction de l'utilisateur d'un service".

La qualité de service est devenue un facteur déterminant pour les opérateurs de télécommunications qui se sont donc aperçus que la qualité de leurs services et de leurs prestations doit être constamment contrôlée et suivie, d'une part pour connaître l'état de fonctionnement de leurs infrastructures, et d'une autre part pour pouvoir améliorer leurs compétitivités.

Pour une mise en place simple de la compréhension de la qualité de service, les principes suivants sont définis :

- La qualité de service ne concerne que l'ensemble des propriétés, caractéristiques et paramètres pouvant être choisis, mesurés et comparés à des valeurs seuils.
- L'évaluation de la qualité de service peut réduire quelques caractéristiques essentielles de qualité. Il n'est pas nécessaire de définir et mesurer chaque propriété des dispositifs de service.

Il est important de définir un ensemble commun d'outils pour fournir des résultats comparables, non seulement pour faire face à la concurrence, mais aussi pour fidéliser la clientèle.

IV-3-2-Critères d'évaluation de la qualité de service

Les critères qui rentrent dans la détermination de la qualité d'un réseau peuvent globalement être classés en deux grandes catégories selon le point de vue adopté : opérateur ou utilisateur.

a) Critères de performance chez l'opérateur

Il s'agit des aspects techniques en rapport avec des diverses technologies et composants du réseau. Ils font leur origine au coût approuvé par l'opérateur pour :

- Déployer le réseau,
- Assurer son évolution,
- Maintenir son fonctionnement.

L'opérateur cherche alors à minimiser ses coûts tout en garantissant une bonne qualité de service ainsi que de très bonnes performances.

b) Critères de performance chez l'utilisateur

Les critères décrivent la performance du réseau telle qu'elle est perçue par les utilisateurs. Ces critères sont directement mis en rapport avec les attentes des abonnés et affectent profondément le degré de satisfaction de service.

Ces attentes sont principalement liées à :

- La disponibilité du réseau (probabilité d'obtention d'un nouvel appel),
- Le maintien de la communication (probabilité de coupure d'une communication),
- La qualité auditive de la voix (puissance du signal, brouillage).

Ces aspects sont dépendant des mécanismes de fonctionnement du réseau (radio) tel que :

- Couverture du réseau (RxLev puissance du signal reçu en tout point de la couverture)
- Taux d'appel réussis (Taux de blocage)

- Qualité des communications ou qualité vocale (taux d’erreurs binaires, microcoupures et interférence) et maintien de la communication (Taux de coupure)
- Les interférences (qualité de la communication), interruption de communication ou coupure d’appel (perte totale de communication en cours, Taux de coupure).

Les opérateurs se fixent des objectifs sur la qualité de prestation de leur service. Ils cherchent à minimiser leurs coûts tout en garantissant une bonne qualité de services QoS qui est évaluée par les moyens déclarés dans le tableau IV.1, car ils conditionnent la situation concurrentielle de l’opérateur.

Tableau IV.1 : Principaux indicateurs de qualité de service.

Indicateurs de qualité de service	Mode d’évaluation
Couverture	Mesure radio et plaintes des abonnés
Taux d’appel réussis	Mesures systèmes
Qualité de la communication pendant l’appel	Mesures radio, mesure système et analyseurs de qualité vocale
Taux de coupure d’appels	Mesures système

IV-3-3-Qualité de service dans le réseau cellulaire

La qualité de service dans le réseau cellulaire s’intéresse à deux aspects principaux séparés :

- Disponibilité des ressources en termes de taux de congestion qui se traduit par un taux de blocage.
- Qualité du signal radio selon la qualité de couverture (possibilité d’établissement du lien radio).

IV-3-4-Paramètres de performance

a) Indicateurs de qualité de service

Un indicateur est une valeur basée sur un ou plusieurs compteurs et qui représente les performances du réseau. Les indicateurs de qualité de service ont pour objectifs de :

- Identifier les défauts dans les éléments du sous-système radio et d’établir les actions correctives pour gérer la qualité de service ;

- Détecter et identifier les problèmes radio d'une cellule et aider les équipes d'optimisation radio à analyser la situation et à définir les actions correctives (changement de fréquence, ajustement d'un paramètre ...);
- Suivre des changements du sous-système radio :
 - Modèle de trafic
 - Charge du trafic
 - Rendement du réseau
 - Gains obtenus en changeant de version software.
- Prévoir le comportement du réseau selon l'évolution du trafic.

Les indicateurs radio sont établis à partir des compteurs de performance fournis par le centre d'opération et d'entretien du sous-système radio. Il possède différents types de compteurs qui sont organisés sur 3 classes :

- Compteurs cumulatifs : le compteur est incrémenté à chaque fois où l'évènement compté aura lieu. Il est réinitialisé quand une nouvelle période est commencée. Il indique juste le nombre d'évènements qui ont eu lieu dans une période de temps.
- Compteurs statiques : ce sont des données statiques collectées relativement à l'état d'une ressource spécifique.
- Evénements d'observations : ce sont des observations sur un événement système. Par exemple, l'évènement SDCCH est un compteur d'observation qui indique le temps et la date quand le SDCCH est mesuré.

b) Indicateurs clés de performance

La QoS dans les réseaux mobiles est évaluée par des indicateurs de paramètre de performance (Key Performance Indicator, KPI). Les indicateurs clés de performance correspondent aux mesures donnant une information sur les performances du réseau ou d'un processus). Les KPI sont obtenus à l'aide de formules et par la compilation des différentes données. Les KPI évaluent essentiellement le maintien de l'appel, le volume de trafic, la qualité du service sur l'ensemble du réseau. Ils permettent, ainsi, de détecter les cellules en faille et les heures de pointe. Un seuil limite est déterminé pour chaque KPI, s'il est dépassé une alarme est envoyée à la supervision pour indiquer la présence d'un problème sur la fonction que la KPI mesure.

Il s'agit aussi de la classe de QoS évaluée par ces derniers : il existe plusieurs classes de KPI comme l'indique la figure suivante :

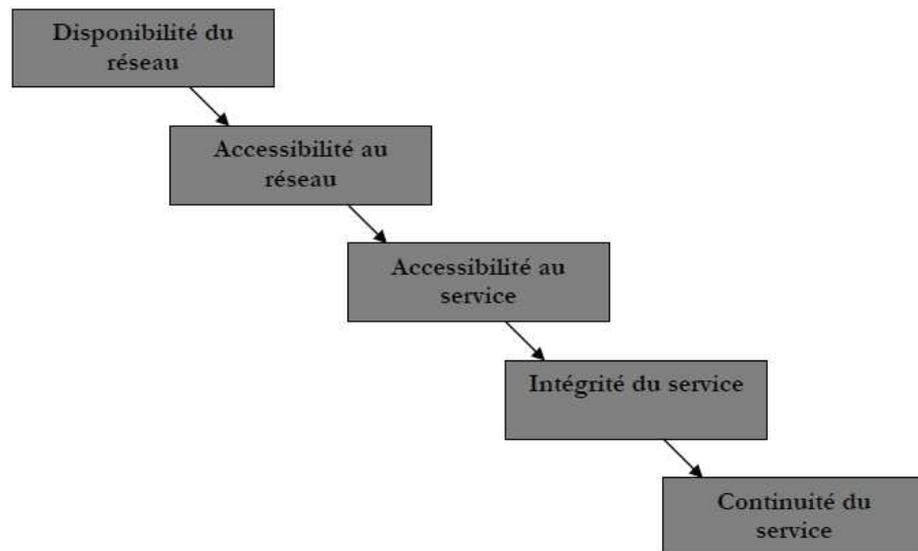


Figure IV.2: Classe des KPI

IV-3-5-Mesures de performance

Les mesures des performances actuelles du réseau combinent trois approches :

- Indicateurs clés de performances KPI (Key Performance Identification) via l'OMC-R,
- Mesures Drive test,
- Trace de signalisation sur les interfaces A/Abis.

Les mesures de performances peuvent être classées sur la base des informations qu'elles apportent en cinq grandes classes [20] :

- ❖ **Mesures relatives à la correction et la détection des erreurs** : Pendant la phase de planification, les sources d'erreurs, comme par exemple les phénomènes d'interférences, sont multiples mais aussi pas évident à prévoir. Les mesures de performances permettent la détection de ces erreurs.
- ❖ **Mesures relatives à la charge de trafic** : Les mesures de la charge de trafic établies dans une cellule ou dans tout le réseau offrent des données indispensables pour améliorer l'exploitation des canaux et des ressources radio.
- ❖ **Mesures relatives à la disponibilité des ressources** : Grâce à cette catégorie de mesures, il est possible de gérer et de connaître la disponibilité des ressources radio et de connaître à tout moment si des ressources sont actives ou inactives. Les indicateurs relatifs aux entités suivantes sont d'une grande utilité dans ce contexte : TCH, SDCCH, BSC, BTS, TRX, SS7Links, PCM connections.

- ❖ **Mesures relatives à la qualité de service:** Connaître la qualité de service permet de fournir aux abonnés de façon instantanée une bonne qualité de communication. Les mesures de performances permettent donc de trancher sur la qualité des services fournis par l'opérateur. Les différentes mesures et combinaisons de mesures mises en œuvre dans l'appréciation de la QoS seront traitées plus loin.
- ❖ **Mesures à usage statistique :** Les mesures de performances peuvent être très utiles pour le service marketing de l'opérateur. Ainsi, sur la base des données fournies par les mesures, l'opérateur peut modéliser le comportement de ses abonnés ; à titre d'exemple, si les mesures présentent des périodes à bas trafic téléphonique, il sera intéressant de lancer des promotions incitant les clients à communiquer pendant ces mêmes périodes. La même procédure peut s'appliquer si on raisonne sur les zones de couvertures au lieu des périodes.

IV-3-6- Présentation de quelques outils de mesures

On présentera dans ce qui suit quelques outils de mesures utilisés par les ingénieurs des opérateurs.

a) RNO d'Alcatel

L'outil RNO (Radio Network Optimisation) est un logiciel de gestion des équipements ALCATEL qui permet le management en temps réel de tout le réseau. Outre les fonctionnalités classiques, à savoir la gestion des alarmes, le suivi et la configuration des composants physiques et logiques du réseau, ce logiciel permet :

- Une analyse totalement informatisée des mesures de performance.
- La visualisation et l'export des données sur la configuration software et hardware du réseau.
- La détection des problèmes liés à la qualité de service du réseau et la localisation des questions les plus urgentes.
- Le choix des actions correctives à entreprendre pour améliorer la QoS.
- L'optimisation de la recherche des ressources radio.

Cependant le RNO présente un ensemble de limitations qui se résument dans les points suivants :

- Une limite au niveau du nombre de licence.
- Il est opérationnel que pour un seul constructeur à savoir Alcatel.
- Il présente un retard au niveau de l'import des données, ce qui oblige parfois les ingénieurs à utiliser d'autres outils.

b) SPOTS de SIEMENS

L'outil SPOTS de SIEMENS permet de :

- Traiter les données par famille de compteurs NSS, BSS, BTS.
- Fournir des rapports de QoS.
- Détecter les problèmes du réseau par la configuration d'alerteur de QoS à temps réel.

Les principaux problèmes du SPOTS se résument dans les points suivants :

- Une manipulation difficile de l'interface et des outputs.
- Un outil opérationnel que pour un seul constructeur à savoir SIEMENS.
- Pas de traitement par "heure de pointe".
- Pas d'édition de zones.

c) Mesures Drive-Test

Les mesures Drive-Test sont des campagnes de mesure effectuées par les techniciens et ingénieurs de l'opérateur. Elles constituent le meilleur moyen de vérifier les performances du réseau et de les ajuster aux attentes des abonnés car elles décrivent l'état de la qualité du réseau telle qu'elle est perçue par les abonnés.

Durant les campagnes de mesure, le technicien teste :

- L'établissement de l'appel (absence d'échec)
- Le maintien de la communication pendant une certaine période (absence de coupure)
- La qualité de la communication

Le Drive-Test est sans doute une partie essentielle pour optimiser de façon continue les performances du réseau mobile afin de maintenir la satisfaction des abonnés. Pour réaliser un Drive-Test, une équipe se déplace dans une voiture munie d'une chaîne de mesure numérique de type Drive-Test. Voir figure IV.3.

- Le Mobile Station (MS) dans la chaîne de mesure est appelé *mobile à trace* ; il est directement rattaché au Laptop par câble afin de communiquer les mesures effectuées. Ce MS contient plusieurs fonctionnalités. Le mobile renseigne sur la couverture (**RxLev**) sur le mode Idle ou actif.
- Le Global Positioning System (GPS) : le GPS est un outil indispensable dans la chaîne de mesure car il renseigne sur la position géographique de chaque point de mesure afin de localiser exactement le défaut sur le réseau. Une précision du GPS est demandée. Elle est de l'ordre de quelques mètres.

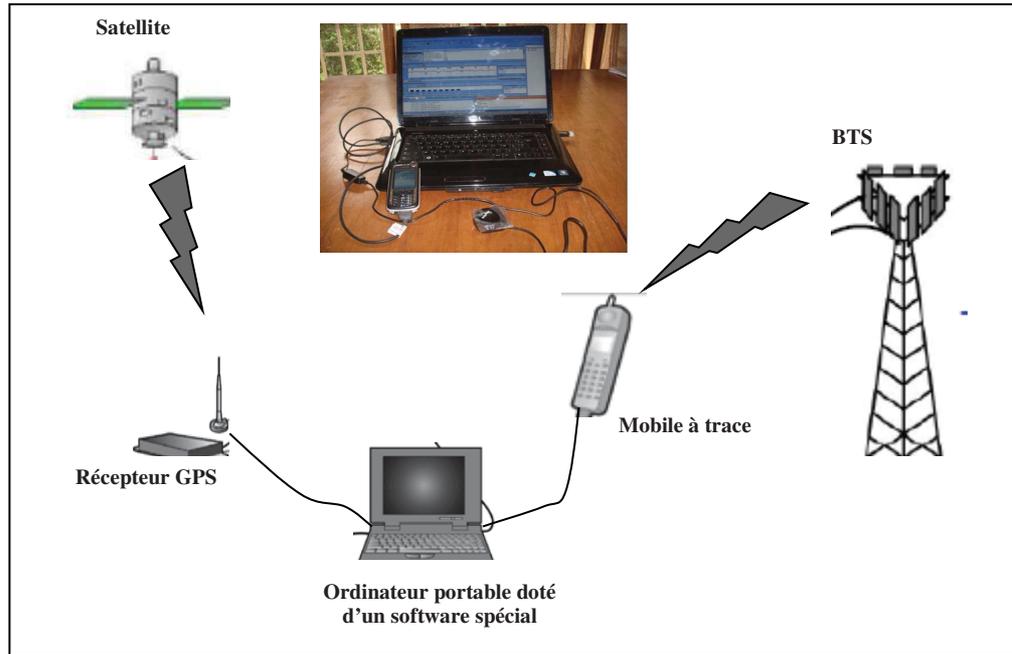


Figure IV.3: Chaîne de mesure Drive-Test.

- L'ordinateur portable + Software (Tems investigation) : ils permettent l'acquisition et le traitement des données récupérées des mobiles à trace et des récepteurs GPS. Une fois les mesures obtenues, cet ensemble permet de constater l'état du réseau en place
C'est l'outil que nous avons utilisé pour réaliser le travail de cette thèse.

IV-4-Paramètres de mesure

Le Drive-Test est basé essentiellement sur une chaîne de mesure d'accessibilité (SDCCH) et d'établissement de la communication (TCH).

IV-4-1-Mesures pour accéder au réseau

Pour accéder au réseau, des mesures doivent être faites. Ces dernières consistent à réaliser de vrais appels et à tester l'obtention du retour. Call Setup Succès Rate est un indicateur qui exprime le pourcentage des appels. Tout appel établi qui aboutit soit à un signal d'appel, soit à une annonce parlée ou à une tonalité d'occupation est considéré comme étant un appel sans échec.

La norme GSM définit que tout appel doit pouvoir être établi en 10s maximum. De plus, le taux de blocage à l'heure chargée doit être inférieur à (< 2%). Au-delà de 10s, même si l'appel est établi, il est considéré comme échec en termes de performance du système.

Les différentes causes qui peuvent dégrader le Call Setup sont les suivantes :

- Mauvaise couverture radio,

- Congestion radio,
- Disfonctionnement d'équipement.

IV-4-2-Mesures de niveau de champ (RxLev)

Elles consistent à mesurer la voie balise (BCCH). Le numéro de champ RxLev reçu par le mobile affiche le nombre de barrettes indiquant la puissance du signal reçu. Un faible niveau de champ ou l'absence du champ se traduit par la présence d'une ou deux barrettes sur l'écran du terminal ou par l'indication d'absence du signal. L'indicateur de présence du réseau ou RxLev renseigne en tout point de couverture la probabilité d'établir une communication. Ces mesures se font au même rythme que les mesures d'accessibilité au réseau. Il existe deux unités de mesure RxLev (allant de 0 à 63 unit) et le RxLev (dBm).

La relation liant les deux unités de mesure est la suivante :

$$\text{RxLev [dBm]} = -110 + \text{RxLev [unit]}$$

- Si RxLev [unit]=0, RxLev [dBm]= -110dBm
- Si RxLev[unit]=63, RxLev [dBm]= -47dBm

Le Tableau ci-dessous illustre la couverture en fonction du RxLev

Tableau IV.2: Les différentes valeurs de RxLev pour une couverture réseau.

Rx Lev (dBm)	Niveau de couverture
-110 à -95	Pas de couverture
-95 à -85	Mauvaise couverture
-85 à -75	Assez bonne couverture
-75 à -65	Bonne couverture
-65 à -46	Très bonne couverture

Le RxLev se mesure toujours lorsque le mobile est en mode veille ou "idle". Les principales causes susceptibles d'affecter la qualité de la couverture radio sont :

- Nombre insuffisant de BTS,
- Mauvais paramétrage physique et logique des BTS, types d'antennes et qualité d'installation ou défaut de maintenance,
- Qualité du terminal de l'utilisateur (sensibilité) ou détérioration de la partie émission /réception RF.

On voit qu'entre les causes principales susceptibles d'affecter la qualité de la couverture radio, on note le nombre insuffisant de BTS (dû à la mauvaise planification du système radio mobile).

IV-4-3- Mesure de qualité de communication (RxQual)

Cette mesure consiste à évaluer la valeur RxQual. Elle indique la qualité de communication ou encore elle définit l'audibilité. Elle est enregistrée par le mobile et elle indique la netteté et la clarté observées dans une communication. C'est un indicateur très important pour l'abonné. Elle est souvent indiquée par le taux d'erreurs binaires BER (Bits Errors Rate) et le taux de trames erronées FER (Frames Erasures Rate) chez l'opérateur.

Le RxQual est mesuré uniquement à l'état dédié et sur la cellule serveuse qui est codée sur 3 bits et prend les mesures de 0 jusqu'à 7. Le tableau ci-dessous illustre l'appréciation de la qualité.

Tableau IV.3: Relation entre la qualité de communication et le BER

RxQual	Bit Error Rate (BER)	Qualité de communication
0	BER < 0.2%	Excellente
1	BER= [0.2% à 0.4%]	Bonne
2	BER= [0.4% à 0.8%]	
3	BER= [0.8% à 1.6%]	Assez bonne
4	BER= [1.6% à 3.2%]	
5	BER= [3.2% à 6.4%]	Mauvaise
6	BER= [6.4% à 12.8%]	
7	BER > 12.8%	Très mauvaise

Les facteurs de dégradation de la qualité vocale sont :

- Niveau d'interférences externes trop élevées (interférences dues à des émissions par des équipements autres que ceux du réseau),
- Interférence co-canal ou sur canal adjacent trop élevée (mauvais plan de fréquences),
- Mauvaise installation des équipements radio,
- Problème de transmission (annuleurs d'écho ou mauvaise synchronisation se traduisant par des pertes d'informations, du grésillement dans les communications vocales et des "communications blanches"),
- Paramétrage inadéquat du handover.

On voit, là-aussi, que parmi les facteurs de dégradation du RxQual, que la mauvaise installation des équipements radio est un paramètre de dégradation à prendre sérieusement en compte car il engendre un mauvais dimensionnement de notre système radio mobile.

IV-4-4-Outil TEMS Investigation

TEMS Investigation est un excellent outil pour la vérification, l'optimisation et la maintenance des réseaux sans fil. Offrant la collecte de données, une analyse en temps réel et un post-traitement tout en un, TEMS Investigation est une solution complète pour l'ensemble des tâches quotidiennes d'optimisation du réseau d'un opérateur. Cette solution élimine le besoin d'outils multiples, offre une réduction des coûts et permet un gain de temps et d'efforts pour le personnel d'exploitation. Il supporte les principales technologies GSM/GPRS, EDGE, WCDMA, HSPA/HSPA+, LTE (y compris TD-LTE), CDMA, EVDO, WiMAX et TD-SCDMA. Il constitue en fait une bonne solution à la fois pour l'installation de matériel sur de nouveaux réseaux et pour veiller à une intégration transparente avec les réseaux existants. Avec TEMS, les opérateurs peuvent atteindre une qualité de voix améliorée, une plus grande accessibilité et une meilleure performance de service. Il offre un large éventail de puissantes fonctions faciles à utiliser et font du TEMS un outil essentiel tout au long du cycle de vie d'un réseau. Le TEMS est utilisé pour [31] :

- Régler et optimiser les réseaux,
- Détecter les pannes et faire le dépannage des réseaux sans fil,
- Vérifier le comportement véritable d'un terminal avec des mesures fondées sur le téléphone,
- Vérifier la couverture et la capacité de la cellule ainsi que son accessibilité.

IV-5-Détails expérimentaux

IV-5-1-Environnement de propagation

La ville sur laquelle s'est basée notre étude est celle d'Annaba (voir figure IV.4). Nous nous sommes appuyés sur le réseau GSM existant pour effectuer des mesures radio dans cette ville. Pour ce faire, nous avons subdivisé la ville en 3 zones comme indiqué par le tableau IV.4 : Le centre-ville, la zone centre-ville vers la périphérie et enfin la périphérie de la ville. Pour chaque type de zone, nous avons utilisé 2 types de secteur (sauf pour la zone rurale).



Figure IV.4: Carte de la région d'Annaba par satellite avec les zones étudiées.

Tableau IV.4 : Type de zone.

Zone	Z1	Z2	Z3
Type de la zone	Urbaine	Suburbaine	Rurale
BTS plantée	Annaba centre et Poste Avant Port	Sidi Ammar et Sidi Ammar centre	Aéroport

IV-5-2-Descriptions des autres équipements

Afin d'effectuer nos mesures radio, nous avons utilisé un véhicule Kongoo de la marque Renault, un ordinateur portable de type hp, un logiciel de mesure radio qui est le Drive-Test, un Dongle de communication, un terminal mobile Sony Ericsson de type CDMA et un terminal GPS. La figure IV.5 nous montre le kit de collecte des données installé sur le véhicule.



Figure IV.5: Kit des équipements utilisés pour les mesures.

Les mesures radio sont faites dans les zones Z1, Z2, et Z3 :

- Z1 : désigne la zone urbaine comportant un site au centre ville d'Annaba et le deuxième site va de la poste jusqu'à la région avant le port,
- Z2 : désigne la zone suburbaine comportant le centre de Sidi Amar et l'université Baji Moukhtar à Sidi Amar,
- Z3 : désigne la zone rurale comportant le cite d'Aéroport Rabeh BITTATE de Annaba.

Toutes ces mesures ont donné les graphiques ci-dessous :

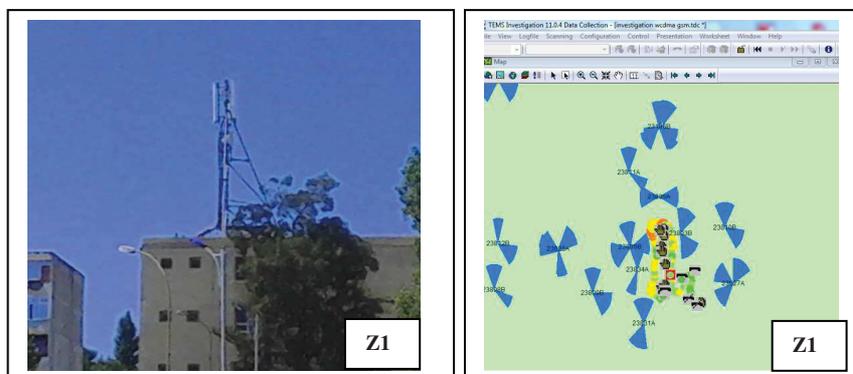


Figure IV.6 : Centre ville Annaba (image de gauche) et mesures radio TEMS Investigation 11.0.4 (image de droite).

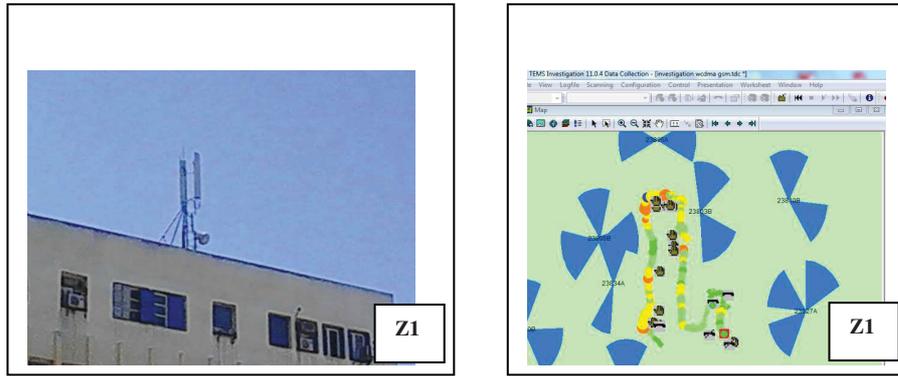


Figure IV.7 : La poste Avant Port (image de gauche) et mesures radio TEMS Investigation 11.0.4 (image de droite).

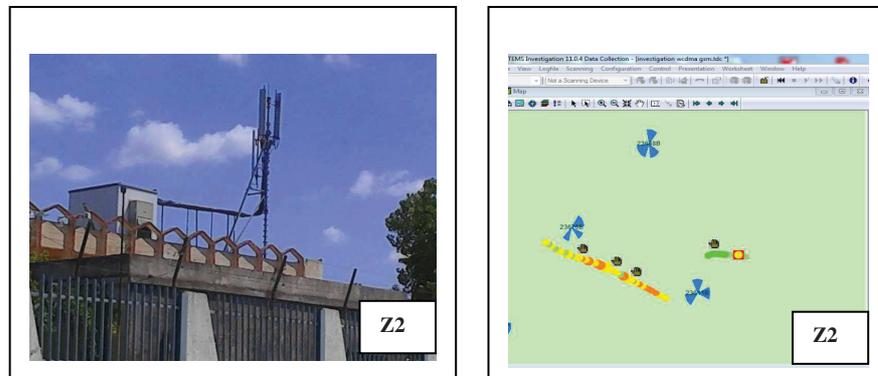


Figure IV.8 : Université de Sidi Ammar (image de gauche) et mesures radio TEMS Investigation 11.0.4 (image de droite).

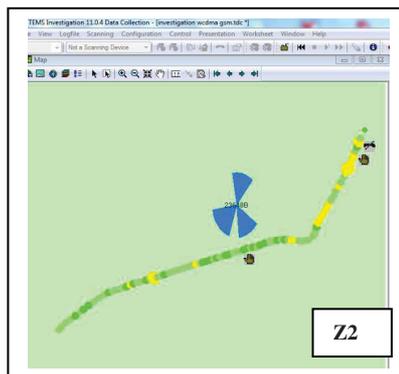


Figure IV.9 : Sidi Ammar centre (image de gauche) et mesures radio TEMS Investigation 11.0.4 (image de droite)

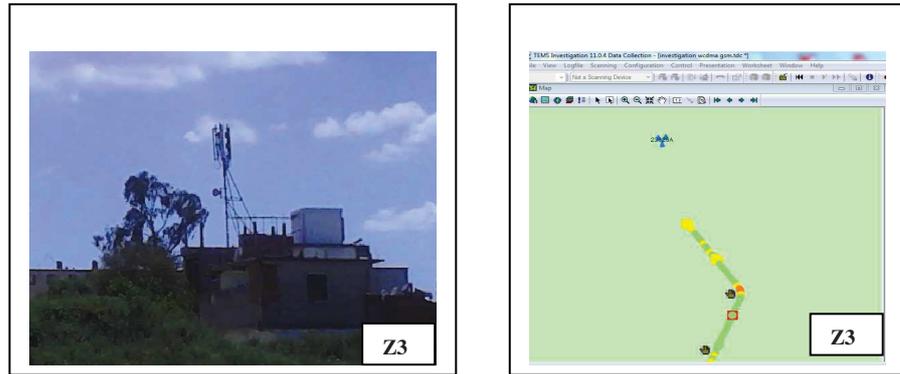


Figure IV.10 : Aéroport Rabeh BITATE Annaba (image de gauche) et mesures radio TEMS Investigation 11.0.4 (image de droite).

IV-5-3- Description simplifié des BTS utilisées

Les BTS que nous avons utilisés pour nos mesures radio sont celles de l’opérateur étatique Mobils. Nous avons utilisé 2 types de BTS à savoir les BTS de type 3900 et 2206. Les paramètres des BTS et radio utilisées sont présentés dans les tableaux IV.5 et IV.6 respectivement :

Tableau IV.5 : Caractéristiques des BTS utilisées.

Type BTS	BTS3900 Outdoor Distribuée	BTS2206 Outdoor Distribuée
Nombre de secteur	3	3
Bande de fréquence	806–960MHz	806–960MHz
Fréquence descendante	880 – 960 MHz	880 – 960 MHz
Fréquence montante	806 – 880 MHz	806 – 880 MHz
Puissance totale de la BTS	600 Watt (à 50 °C)	600 Watt (à 50 °C)
Impédance	50Ω	50Ω

IV-5-4-Méthodologie

Nous nous sommes appuyés dans le présent travail uniquement sur le modèle K facteurs. Sachant que plusieurs modèles de propagations existent dans la littérature scientifique sur la propagation.

La forme générale du modèle K facteur est donnée par la relation ci-dessous [85] :

$$L_P = K_1 + K_2 \log_{10}(d) + K_3(h_r) + K_4 \log_{10}(h_r) + K_5 \log_{10}(h_b) + K_6 \log_{10}(h_b) \log_{10}(d) + K_{7diff} + K_{clutter} \quad (IV.1)$$

K_1 : est une constante liée à la fréquence,

K_2 : est une constante d'atténuation de la distance ou de l'exposant de propagation,

Tableau IV.6 : Paramètres radio des BTS utilisées de l'opérateur Mobilis.

Type de BTS	Code du Site	Nom du Site	Wilaya	Région	Longitude	Latitude	Antenne	HBA Toit (m)	HBA Sol (m)	Feed Len (m)	Feed Type
3900	23626	Aéroport	Annaba	Annaba	7,8135	36,82081	739623		18	22	7/8"
3900	23611	Sidi Ammar	Annaba	Annaba	7,72140	36,81419	739623	7	16	18	7/8"
2206	23648	Sidi Ammar centre	Annaba	Annaba	7,71843	36,82214	739623	10	22	12	7/8"
3900	23106	Annaba centre	Annaba	Annaba	7,75967	36,90239	ATR 451703	10m	22m	2*70	7/8"
2206	23627	Poste Avant Port	Annaba	Annaba	7,76256	36,89777	739634	4	29	26	7/8"
2206	36694	Ben Ammar	El Taref	Annaba	7,81509	36,79176	ADU454801	10	19	15	7/8"

K_3 et K_4 : sont des facteurs de correction de la hauteur de la station mobile ;

K_5 et K_6 sont des facteurs de correction de la hauteur de BTS,

K_{7diff} : est le facteur de diffraction,

$K_{clutter}$: est un facteur de correction dû au type d'embrouillement.

Les valeurs des paramètres K . changent en fonction de la nature de la zone et des caractéristiques de l'environnement de propagation des villes. La table ci-dessous donne des valeurs de K et de celui du facteur d'atténuation dû à l'encombrement pour une ville moyenne.

Tableau IV.7 : Valeurs des paramètres K du modèle K facteur.

Nom du paramètre K	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_{7diff}	$K_{clutter}$
Valeur	149	44.9	-2.49	0.00	-13.82	-6.55	-0.8	0

On peut écrire le modèle d'Okumura-Hata sous la forme du modèle K facteur. Ainsi, la formule qui donne l'affaiblissement selon Okumura-Hata est la suivante :

$$PL_{OH} = 146,56 + 44,9 \log_{10}(d) - 13,82 \log_{10}(h_b) - 6,55 \log_{10}(h_b) \log(d) \quad (IV.2)$$

L'équation (IV.1) peut être réécrite sous la forme suivante :

$$L_p = (K_1 + K_{7diff} + K_{clutter}) + K_2 \log_{10}(d) + K_3(h_r) + K_4 \log_{10}(h_r) + K_5 \log_{10}(h_b) + K_6 \log_{10}(h_b) \log_{10}(d) \quad (IV.3)$$

On pose :

$$K_1' = (K_1 + K_{7diff} + K_{clutter})$$

L'équation (IV.1) devient :

$$L_p = K_1' + K_2 \log_{10}(d) + K_3(h_r) + K_4 \log_{10}(h_r) + K_5 \log_{10}(h_b) + K_6 \log_{10}(h_b) \log_{10}(d) \quad (IV.4)$$

Cette dernière équation peut également s'écrire :

$$L_p = (K_1' + K_3(h_r) + K_4 \log_{10}(h_r) + K_5 \log_{10}(h_b)) + (K_6 \log_{10}(h_b) + K_2) \log_{10}(d) \quad (IV.5)$$

Posons :

$$A = K_1' + K_3(h_r) + K_4 \log_{10}(h)_r + K_5 \log_{10}(h_b) \tag{IV.6}$$

$$B = K_6 \log_{10}(h_b) + K_2$$

L'équation (IV.5) devient alors de la forme :

$$L_p = A + B * \log_{10}(d) \tag{IV.7}$$

Comme on peut aussi mettre l'équation (IV.7) sous une forme vectorielle comme suite :

$$L_p = [1 \quad \log_{10} d] * \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \tag{IV.8}$$

C'est cette forme vectorielle (IV.8) qui sera utilisée dans la suite.

IV-5-5-Organigramme de détermination des nouveaux facteurs K

Le nouveau modèle de propagation utilisant la régression linéaire est généré par l'organigramme de la figure IV.11. Dans cet organigramme, le filtrage des données s'est fait en respectant les critères du tableau IV.8 pour la distance et la puissance de signal reçue.

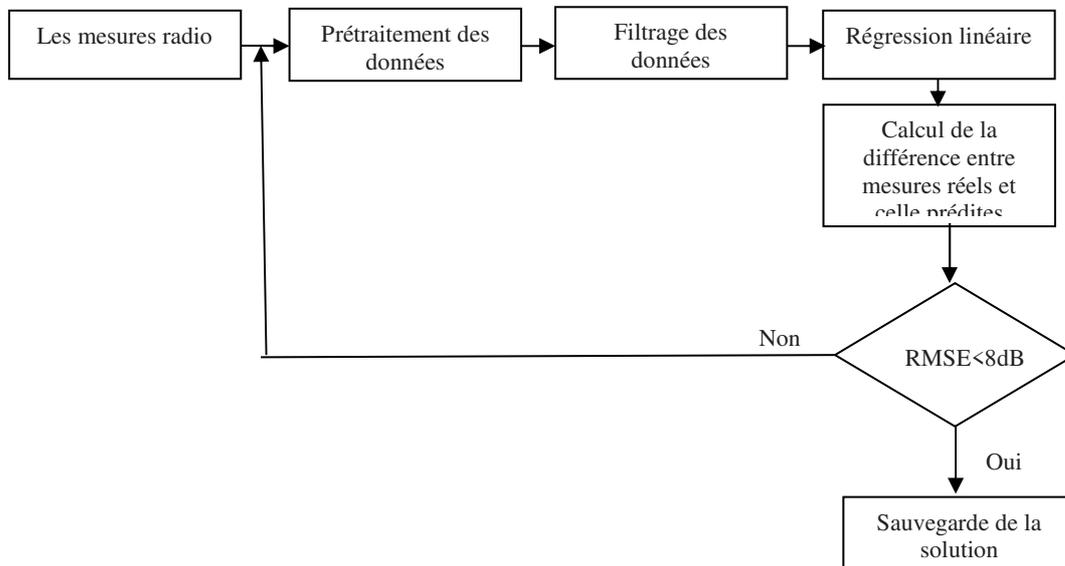


Figure IV.11 : Organigramme de l'algorithme d'optimisation.

Tableau IV.8 : Critères de filtrage.

Distance minimale (m)	100
Distance maximale (m)	10.000
Puissance reçue minimale (dBm)	-110
Puissance reçue minimale (dBm)	-40

IV-6-Méthode de l'optimisation par la régression linéaire

Cette méthode se base sur l'équation (IV.4) présentée précédemment. Au début, nous allons classer les paramètres de l'équation (IV.3) en 2 grands groupes [86] :

- Les paramètres d'ajustement globaux.
- Les paramètres de micro ajustement.

Les paramètres d'ajustements globaux sont ici K_1 et K_2 , tandis que les autres coefficients sont des paramètres de micro ajustement et de ce fait leurs valeurs par défaut dans le modèle standard peuvent être considérés comme constantes.

Partant de l'équation (IV.7) déjà présentée pour N points de mesures radio pour différentes distances quelconques d , nous obtiendrons des valeurs des pertes L_i , pour $i = 1: N$ et (IV.7) deviendra:

$$L_i = A + B * \log_{10}(d_i) \quad (\text{IV.9})$$

Nous pouvons aussi écrire l'équation (IV.9) sous la forme suivante :

$$L_i = [1 \quad \log_{10} d_i] * \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \quad (\text{IV.10})$$

Pour plusieurs mesures, nous aurons la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \log_{10} d_1 \\ 1 & \log_{10} d_2 \\ \vdots & \\ 1 & \log_{10} d_N \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \quad (\text{IV.11})$$

Posant :

$$M = \begin{bmatrix} 1 & \log_{10} d_1 \\ 1 & \log_{10} d_2 \\ \vdots & \\ 1 & \log_{10} d_N \end{bmatrix} ; K = \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \quad (IV.12)$$

D'où, on peut obtenir :

$$L = M * K \quad (IV.13)$$

Rappelons que le but de notre travail est de contribuer à l'étude des performances des systèmes radio mobiles, et dans tout cela nous voulons avoir un modèle de prédiction le plus proche possible de la réalité, ce qui permet ainsi de minimiser l'affaiblissement du signal qui se propage dans un environnement donné. Donc, d'après les équations précédentes, nous visons dans notre travail à minimiser la distance euclidienne entre les valeurs du vecteurs L_p qui représente les valeurs de l'affaiblissement prédit et les valeurs du vecteur L_M qui représentent les valeurs de l'affaiblissement du signal mesuré réellement.

Soit [87] :

$$E = \|L_M - M.K\|^2 \quad (IV.14)$$

Où : E est la fonction d'erreur élevée au carrée.

Pour avoir la distance recherchée minimale il faut que :

$$\frac{dE}{dK} = 0$$

D'où :

$$E = \|M.K\|^2 - 2(M.K)L_M + \|L_M\|^2 \quad (IV.15)$$

Où le $(.)$ représente le produit scalaire.

$$E = K^T M^T M K - 2K^T M^T L_M + L_M^T L_M \quad (IV.16)$$

Avec :

K^T : est la transposée de K .

M^T : est la transposée de M

L_M^T : est la transposé de L_M .

$$\frac{dE}{dK} = 0 \Rightarrow \frac{d(K^T M^T M K - 2K^T M^T L_M + L_M^T L_M)}{dK} = 0$$

Soit :

$$2M^T M K - 2M^T L_M^T = 0 \Rightarrow M^T M K = M^T L_M^T$$

De cela, on tire la solution K^* :

$$K^* = (M^T M)^{-1} M^T L_M^T = \begin{bmatrix} A^* \\ B^* \end{bmatrix} \quad (IV.17)$$

Cette équation (IV.17) traduit l'existence d'un vecteur K^* qui minimiserait la distance euclidienne entre les valeurs prédites et celle mesurées.

De cela, il en découle que pour K_3, K_4, K_5, K_6 constants du modèle Okumura-Hata, on obtient :

$$K_1^* = A^* - (K_3(h_r) + K_4 \log_{10}(h_r) + K_5 \log_{10}(h_b)) \quad (IV.18)$$

$$K_2^* = B^* - (K_6 \log_{10}(h_b)) \quad (IV.19)$$

Donc le modèle optimisé avec la minimisation de la distance euclidienne entre les valeurs prédites et celle mesurées est sous la forme :

$$L_{opr} = K_1^* + K_2^* \log_{10}(d) + K_3(h_r) + K_4 \log_{10}(h_r) + K_5 \log_{10}(h_b) + K_6 \log_{10}(h_b) \log_{10}(d) \quad (IV.20)$$

IV-7- Résultats et discussions

Après application du modèle de régression linéaire sur les données collectées au niveau de la ville d'Annaba, nous avons procédé à la simulation et nous avons obtenu les résultats que nous discuterons par la suite.

IV-7-1- Carré de l'erreur quadratique moyenne RMSE

Pour juger de la précision et de l'efficacité du modèle optimisé par la régression linéaire par rapport au modèle d'Okumura-Hata et le modèle K facteur, nous avons choisi un paramètre statique qui est le carré de l'erreur quadratique moyenne (Root Mean Square Error RMSE). Ce paramètre doit être le plus faible possible (6 à 7 dB pour les systèmes radio mobiles) [87].

Le RMSE est également appelé écart quadratique moyen. RMSE est la différence entre les valeurs réellement observées à partir de l'environnement qui est en cours de modélisation

et les valeurs prédites par un modèle. Ces différences individuelles sont aussi appelées résiduelles, et le RMSE sert à les agréger en une seule mesure de puissance prédictive.

Le RMSE est un modèle de prédiction en ce qui concerne la variable estimée X_{model} . Il est défini comme la racine carrée de la moyenne de l'erreur carrée :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{model,i})^2}{n}}$$

Où :

X_{obs} : est la valeur mesurée.

X_{model} : est la valeur prédite.

n : est le nombre des échantillons.

IV-7-2-Résultats par zone

a) Environnement Urbain

❖ Zone Z1 : Centre-ville d'Annaba

Nous avons obtenu les courbes ci-dessous représentant les mesures réelles, le modèle d'Okumura Hata, le modèle K facteur et le résultat obtenu en implémentant la régression linéaire en vert.

Le modèle sera vu comme précis si le RMSE entre les valeurs de prédiction et mesurées est inférieur à 8 dB (RMSE < 8dB) [86].

A travers la figure IV.12, on peut voir clairement que l'affaiblissement de parcours approché grâce à l'optimisation des modèles K facteurs et Okumura-Hata par la régression est plus proche des mesures faites dans la zone qui couvre le centre-ville d'Annaba. L'affaiblissement est un peu élevé mais il est plus réaliste. On peut voir qu'il décroît avec la distance qui est dû à notre éloignement de la BTS cible et notre prise en charge par une autre BTS grâce au handover. Tandis que les deux autres modèles nous donnés une prédiction d'affaiblissement petite en divergeant avec la réalité.

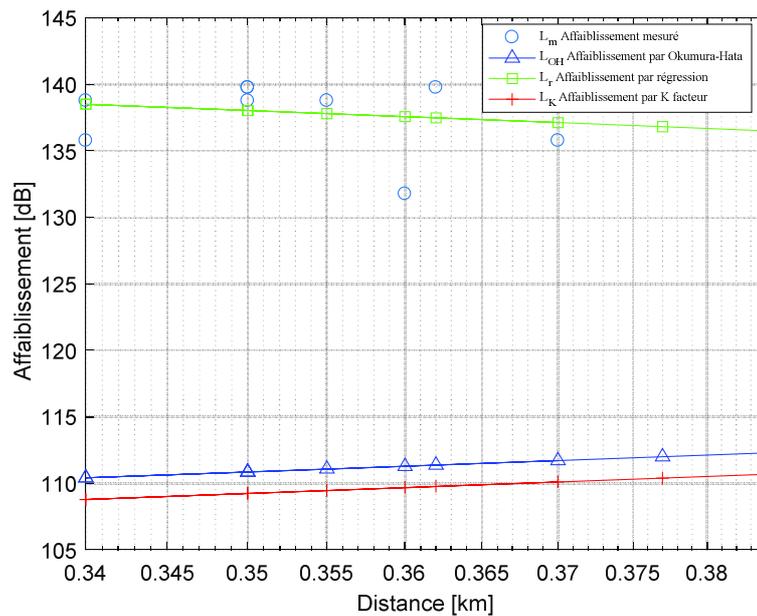


Figure IV.12 : Affaiblissement des trois modèles pour la zone Z1 au centre-ville Annaba.

Tableau IV.9 : Valeurs des coefficients K et RMSE obtenus dans le centre ville d'Annaba.

Zone	Résultats	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	RMSE
Z1	K facteurs	149	44,9	-2,49	0	-13,82	-6,55	28.0960
	Okumura Hata	146,56	44,9	0	0	-13,82	-6,55	26.4858
	Régression	144.19	-28.80	-2,49	0	-13,82	-6,55	1.677

Le tableau ci-dessus résume les résultats obtenus par la régression linéaire, ainsi que les différentes valeurs des coefficients K pour les trois modèles ; il nous informe aussi sur les valeurs du RSME pour les trois modèles.

On se référant au tableau IV.9, on voit clairement que nous avons un RMSE < 8 dB pour le modèle issu de la régression ce qui confirme la crédibilité du résultat, contrairement au modèle K facteur et Okumura-Hata.

Pour l'erreur de prédiction du modèles K facteur, du modèle Okumura-Hata, et du modèle de régression, on constate selon la figure IV.13 que l'erreur de prédiction du modèle de régression est la plus faible de tous, ce qui renforce davantage notre évaluation des performances de ce modèle.

On voit aussi l'écart important entre l'erreur de prédiction des deux modèles K facteur et Okumura-Hata avec le modèle issu de l'optimisation. Cet état de fait nous informe de la non validité du modèle Okumura-Hata pour le type de cette zone.

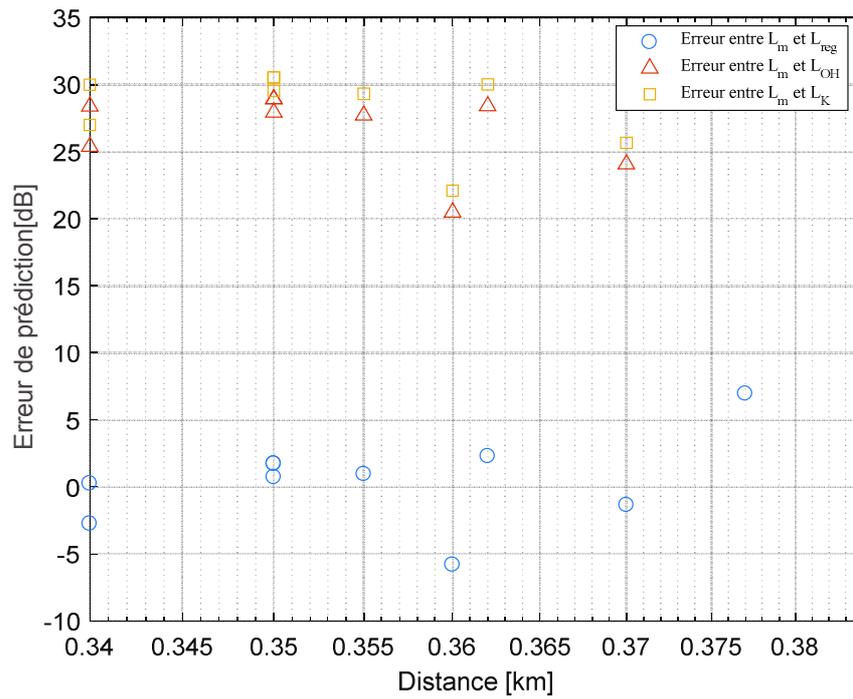


Figure IV.13 : Erreur de prédiction pour la zone Z1 du centre ville d'Annaba.

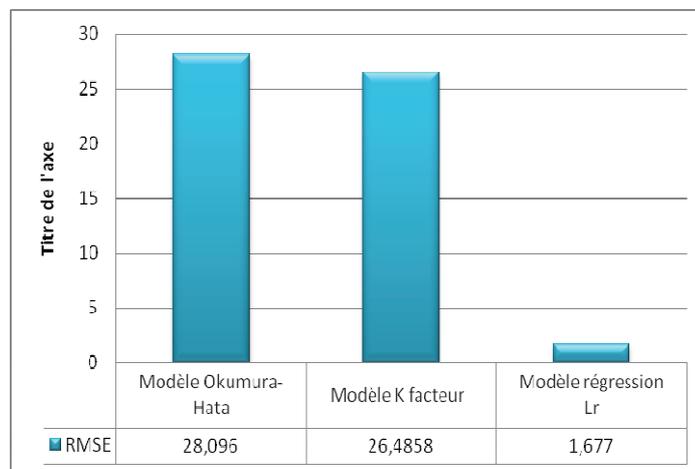


Figure IV.14 : L'évolution du RMSE avec les trois modèles pour la zone Z1 du centre-ville d'Annaba.

La figure IV.14 nous indique l'évolution des valeurs du RMSE d'un modèle à un autre où on voit la décroissance rapide de sa valeur pour le modèle K facteur, et Okumura-Hata vers sa valeur pour le modèle de la régression.

❖ **Zone Z1 : La poste avant-port**

Dans cette partie de la zone de l'environnement de type urbain de la ville d'Annaba, les mesures faites dans cette zone nous ont permis d'avoir le résultat de la régression illustré par la figure IV.15. Nous pouvons voir nettement le tracé du modèle de la régression en vert qui, une autre fois, est le plus proche de la réalité de l'affaiblissement du signal au niveau de cette zone où il y a un urbanisme dense. On remarque aussi que la valeur de l'affaiblissement dû au modèle de régression est élevée par rapport à celles dues aux modèles K facteur et Okumura-Hata.

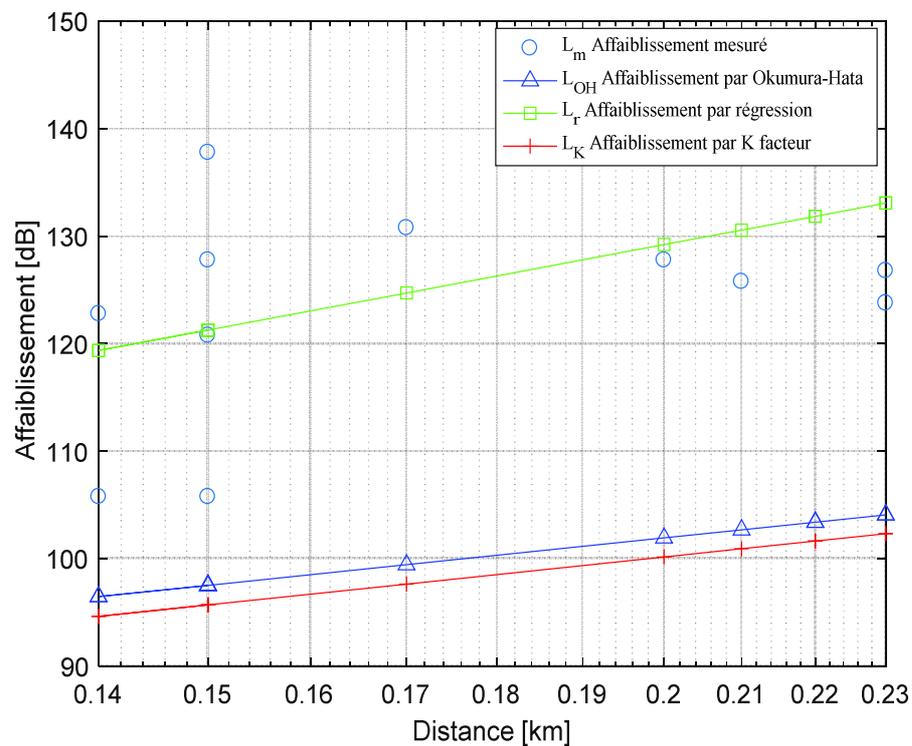


Figure IV.15 : Affaiblissement des trois modèles pour la zone Z1 : la poste avant port.

Le tableau ci-dessous nous donne les résultats obtenus par la régression linéaire pour différentes valeurs des coefficients K ainsi que le RSME.

Tableau IV.10 : Valeurs des coefficients K et RMSE obtenus dans zone de la poste avant-port.

Zone	Résultats	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	RMSE
Z1	K facteurs	149	44,9	-2,49	0	-13,82	-6,55	27.64
	Okumura Hata	146,56	44,9	0	0	-13,82	-6,55	25.8455
	Régression	197.52	72.77	-2,49	0	-13,82	-6,55	4.4491

Cette fois aussi, on voit clairement que nous avons un RMSE $< 8\text{dB}$ pour le modèle issu de la régression pour la zone Z1 dans un environnement urbain dense. Cette zone est le port et la placette appelée cours d'Annaba ; ce qui confirme la crédibilité du résultat, contrairement aux modèles K facteur et Okumura-Hata.

La figure IV.16, nous donne l'erreur de prédiction des deux modèles de prédiction, ainsi que le modèle issu de la régression, où nous enregistrons que l'erreur de prédiction du modèle issu de la régression est la plus modérée comparativement à celles des modèles K facteur et Okumura-Hata. De cela, on peut dire que les deux modèles K facteur et Okumura-Hata ne correspondent pas aux paramètres spécifiques de l'environnement de cette zone.

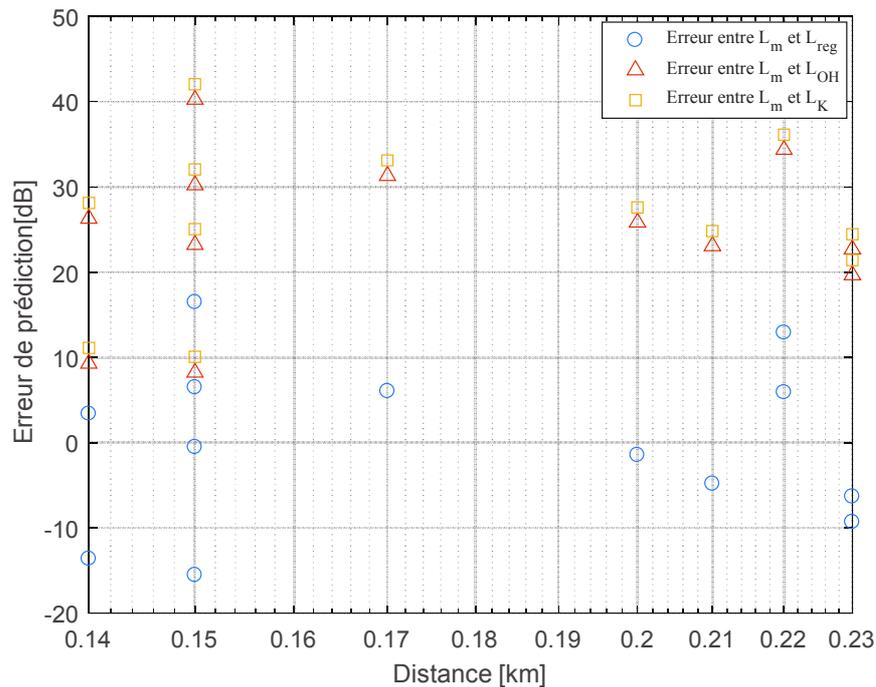


Figure IV.16 : Erreur de prédiction des trois modèles pour la zone Z1 : la poste avant port.

La figure IV.17 nous permet de voir l'évolution des valeurs du RMSE d'un modèle à un autre. On voit la tendance rapide de la valeur du RMSE du modèle de la régression et l'écart important de celui-ci par rapport aux modèles K facteur et Okumura-Hata. Ces derniers engendrent des valeurs importantes du RMSE qui ne sont pas admises pour les systèmes radio mobiles.

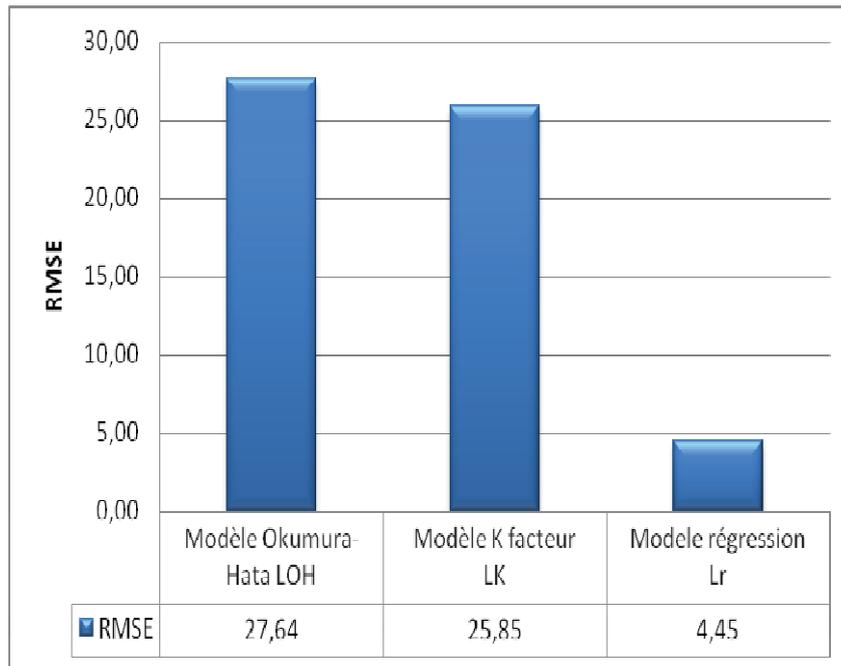


Figure IV.17 : L'évolution du RMSE pour les trois modèles pour la zone Z1 : La poste Avant Port.

b) Environnement Suburbain

❖ Zone Z2 : Université Sidi Ammar

Nous nous sommes déplacés vers une zone suburbaine et nous avons choisi la commune de Sidi Amar et plus particulièrement l'université de Badji Mohkhtar et le centre-ville de Sidi Amar pour effectuer nos mesures.

Après traitement des mesures prélevées avec la TEMS Investigation, nous avons eu les résultats représentés dans les différentes courbes de cette partie.

Les mesures réelles et celles relatives aux modèles de prédiction d'Okumura-Hata et K facteur sont présentés dans la figure IV.18. Le modèle de régression sera vu comme précis si le RMSE entre les valeurs de prédiction et mesurées est inférieur à 8 dB [86].

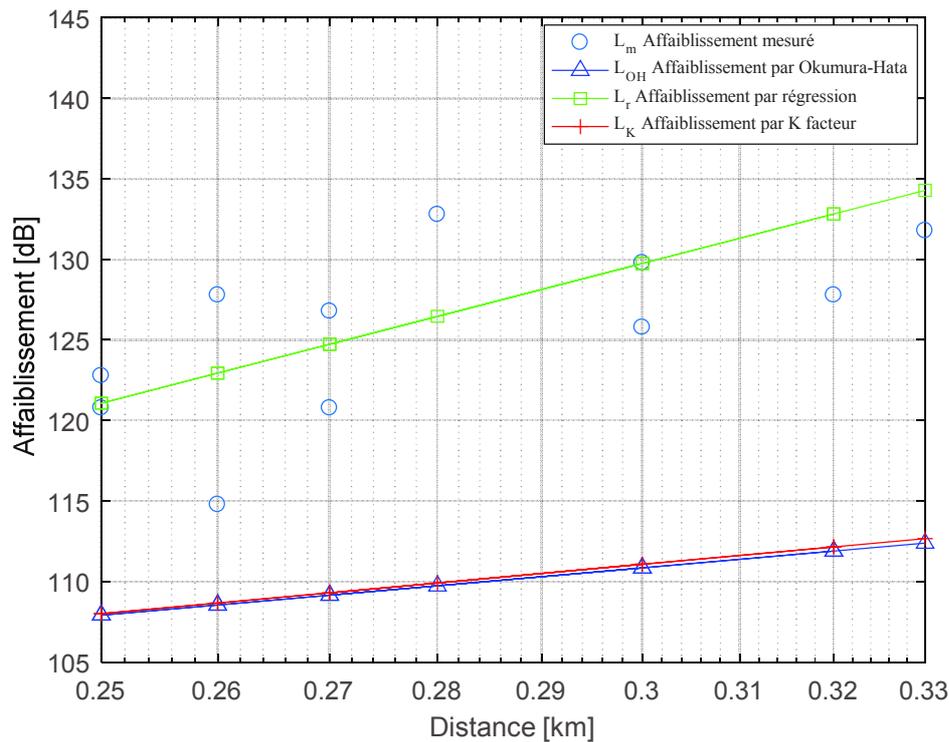


Figure IV.18 : Affaiblissement des trois modèles pour la zone Z2 : Université Sidi Amar.

La figure IV.18 permet de voir formellement que l'affaiblissement issu de la régression des modèles K facteur et Okumura-Hata est plus proche des mesures faites dans la zone Z2 au site de l'université de Sidi Amar. On voit que l'affaiblissement augmente avec la distance en s'éloignant de la BTS ; et on voit aussi que les affaiblissements de parcours des deux modèles K facteur et Okumura-Hata sont presque semblables pour ce cas d'environnement. De cela, on peut dire que le modèle de régression est le plus réaliste et que les deux autres modèles. Ces derniers nous ont donné une prédiction d'affaiblissement petite et qui diverge avec la réalité.

Les résultats obtenus par la régression linéaire sont résumés dans le tableau ci-dessous. Les différentes valeurs des coefficients K ainsi que les valeurs du RMSE pour les trois modèles sont clairement reportés.

 Tableau IV.11 : Valeurs des coefficients K et RMSE obtenus dans la zone Z1 de Sidi Ammar université.

Zone	Résultats	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	RMSE
Z1	K facteurs	149	44,9	-2,49	0	-13,82	-6,55	16.8562
	Okumura-Hata	146,56	44,9	0	0	-13,82	-6,55	17.0430
	Régression	204.7	115.73	-2,49	0	-13,82	-6,55	3.9707

On voit clairement que nous avons un RMSE $< 8\text{dB}$ pour le modèle issu de la régression ; Ce résultat est presque cinq fois plus pour les deux autres modèles ; ce qui confirme la crédibilité du modèle optimisé.

Parmi les étapes pour pouvoir évaluer les performances d'un modèle, on doit disposer de paramètres statistiques qui permettent d'estimer sa précision. On définit donc pour chaque point de mesure l'erreur de prédiction en tant que différence entre l'affaiblissement mesuré sur le terrain et l'affaiblissement prédit par le modèle de propagation (figure IV.19). Nous remarquons que l'erreur de prédiction du modèle issu de la régression est la plus modérée comparativement à celles des modèles K facteur et Okumura-Hata. On peut conclure d'après la valeur du RMSE, que le modèle de régression est plus performant par rapport aux deux autres modèles et il est plus proche de la réalité pour l'environnement de cette zone.

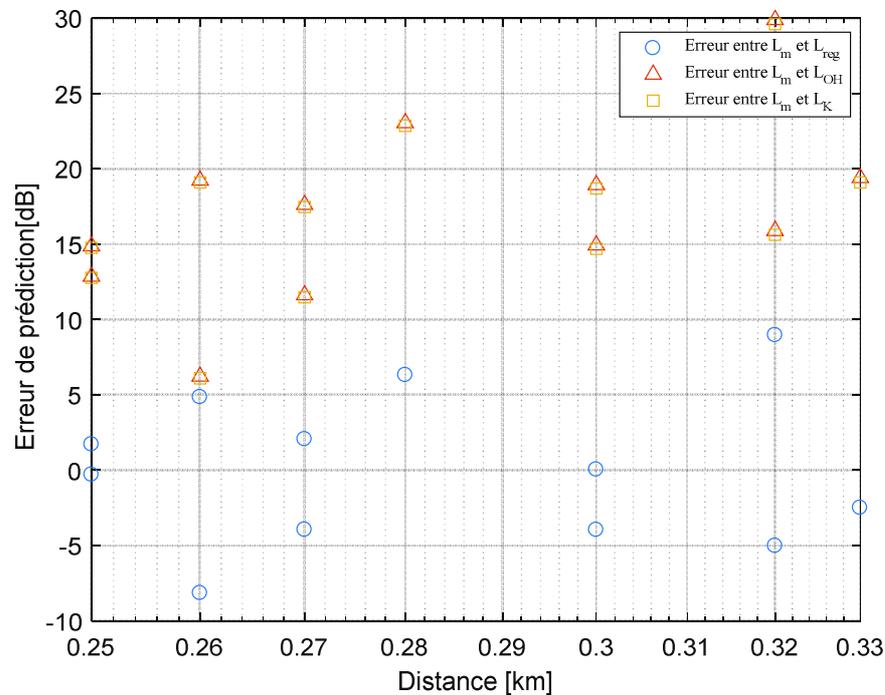


Figure IV.19 : Erreur de prédiction des trois modèles pour la zone Z2 : Université Sidi Amar.

Grâce à la figure IV.20, on remarque du premier coup d'œil que les valeurs du RMSE des deux modèles K facteur et Okumura-Hata sont presque les mêmes où nous enregistrons la tendance rapide de la valeur du RMSE vers le modèle de la régression et l'écart important de celui-ci par rapport aux modèles K facteur et Okumura-Hata qui n'est pas admis pour les systèmes radio mobile.

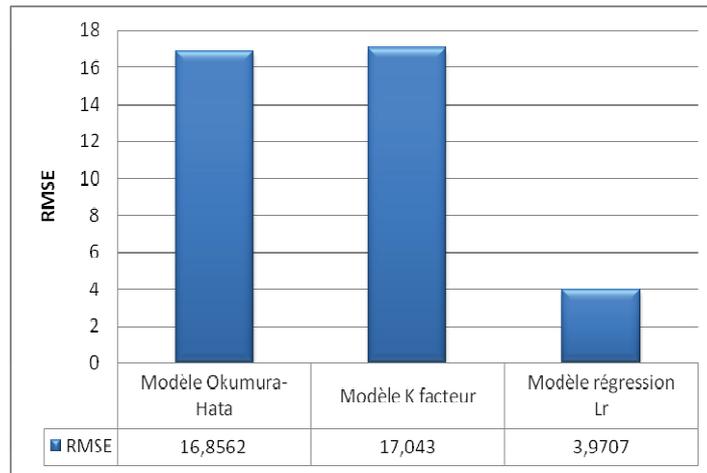


Figure IV.20 : L'évolution du RMSE pour les trois modèles pour la zone Z2 : Sidi Ammar Université.

❖ **Zone Z2 : Sidi Ammar centre**

Après traitement des mesures prélevées sur cette zone avec la TEMS Investigation, nous avons eu les résultats représentés par la figure 4.20. Cette dernière représente les mesures réelles, le modèle de prédiction d'Okumura Hata, le modèle K facteur, ainsi que le modèle de régression tracé en vert. Le modèle sera vu comme précis si le RMSE entre les valeurs de prédiction et mesurées est inférieur à 8 dB (RMSE < 8dB) [86].

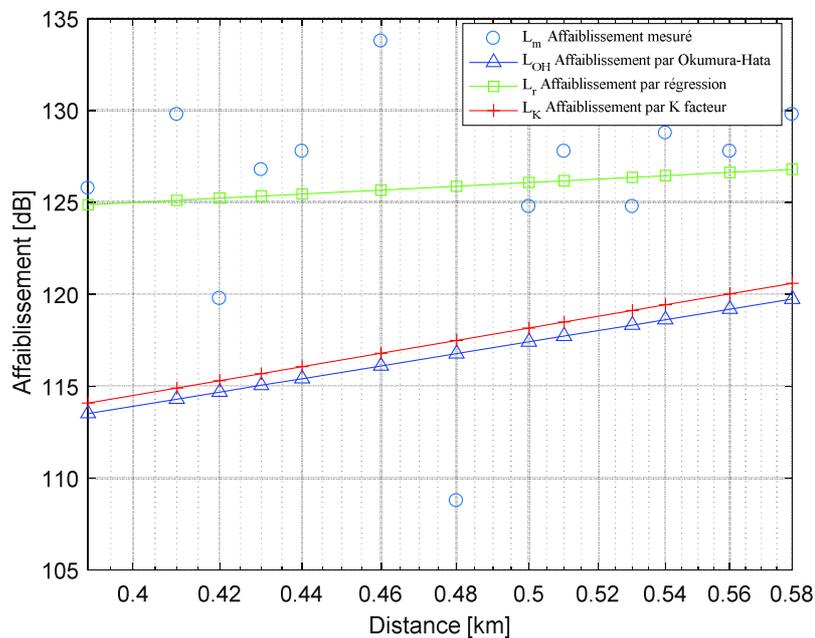


Figure IV.21: Affaiblissement des trois modèles pour la zone Z2 : centre-ville Sidi Ammar.

Les résultats représentés par la figure IV.21 nous permettent de voir nettement que l'affaiblissement de parcours du modèle issu de la régression côtoie étroitement les mesures prises sur le terrain. Donc, le modèle de régression est plus de la réalité par rapport au deux

autres modèles K facteurs et Okumura-Hata. Cependant, il présente un affaiblissement qui augmente légèrement avec la distance en s'éloignant de la BTS. On voit aussi que les affaiblissements de parcours des deux modèles K facteur et Okumura-Hata sont très proches pour ce cas d'environnement. De cela, on peut dire que le modèle de régression est le plus réaliste.

Le tableau ci-dessous résume les résultats obtenus par la régression linéaire pour différentes valeurs des coefficients K et RSME.

Tableau IV.12 : Valeurs des coefficients K et RMSE obtenus dans zone Z2 : centre ville Sidi.

Zone	Résultats	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	RMSE
Z2	K facteurs	149	44,9	-2,49	0	-13,82	-6,55	8.4522
	Okumura Hata	146,56	44,9	0	0	-13,82	-6,55	9.1672
	Régression	148.9	18.29	-2,49	0	-13,82	-6,55	8.8107

On constate que les valeurs du RMSE obtenues à travers les trois modèles sont proches et que nous avons un RMSE >8 dB pour le modèle issu de la régression ; ce qui explique l'influence de la non-conformité de l'urbanisme de Sidi Ammar (zone où les mesures ont été prises). Par ailleurs, on note que le RMSE du modèle Okumura-Hata est légèrement plus faible par rapport au modèle issu de la régression.

Toujours pour pouvoir évaluer les performances d'un modèle, on doit disposer de paramètres statistiques tels que le RMSE qui permet d'estimer sa précision.

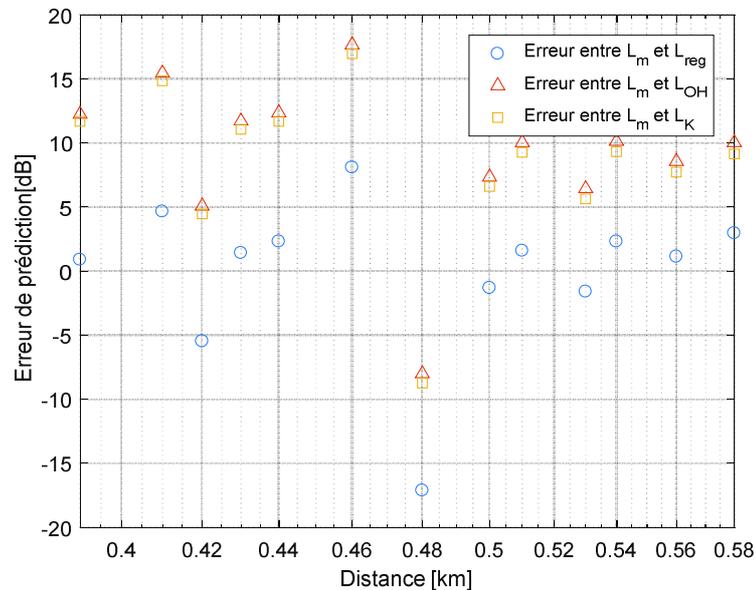


Figure IV.22 : Erreurs de prédiction des trois modèles pour la zone Z2 : Centre ville Sidi Amar

On définit donc pour chaque point de mesure l'erreur de prédiction en tant que différence entre l'affaiblissement mesuré sur le terrain et l'affaiblissement prédit par le modèle de propagation (figure IV.22).

La figure IV.22 nous informe sur l'évolution de l'erreur de prédiction des modèles considérés à savoir K facteur et Okumura-Hata, ainsi que le modèle issu de la régression. Nous remarquons cette fois-ci que les erreurs de prédiction des trois modèles sont très proches et presque identiques sauf pour le point 0,48.

La figure IV.23 nous permet de voir l'évolution des valeurs du RMSE d'un modèle à un autre. On voit que la valeur de RMSE est plus importante pour le modèle K facteur comparativement à celles des modèles Okumura-Hata et de la régression linéaire. On peut conclure que notre modèle ne présente pas une performance intéressante pour cette zone par rapport aux autres modèles K facteur et Okumura-Hata.

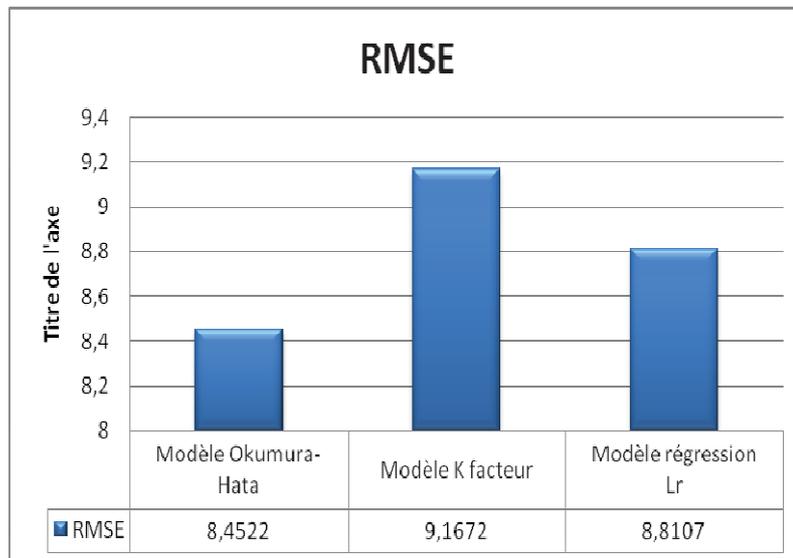


Figure IV.23 : L'évolution du RMSE pour les trois modèles pour la zone Z2 : Centre-ville de Sidi Ammar.

c) Environnement Rural

❖ Zone Z3 : Aéroport Rabeh BITATE Annaba

Après traitement des mesures prélevées sur cette zone avec la TEMS Investigation, nous avons eu les résultats représentés par la figure IV.24.

On peut voir nettement que l'affaiblissement de parcours approché grâce à la régression des modèles K facteur et Okumura-Hata est plus proche des mesures faites dans cette zone (environnement rural). Cet affaiblissement est moins élevé et reste plus réaliste ; il augmente avec l'éloignement de la BTS cible.

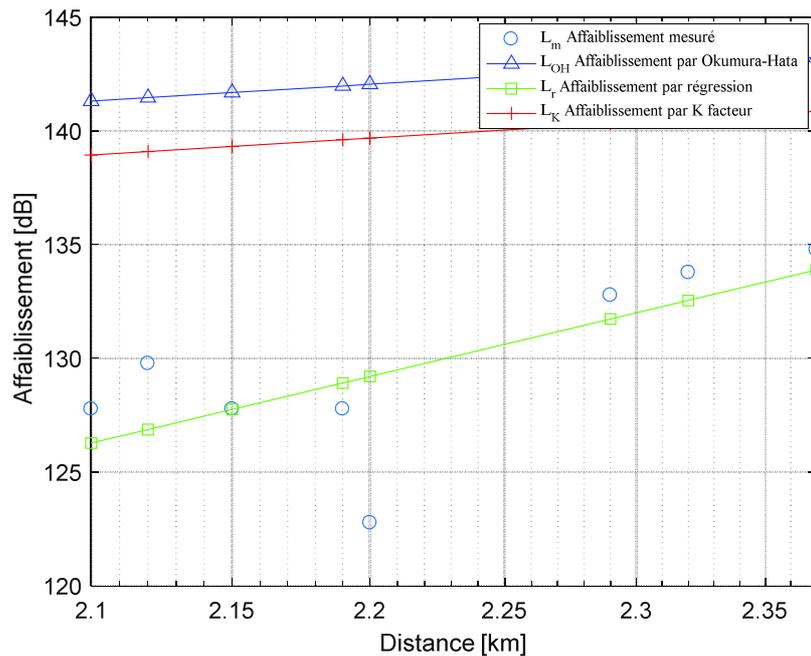


Figure IV.24: Affaiblissement des trois modèles pour la zone Z3 : de l'aéroport Rabeh BETATE Annaba.

Tandis que les deux autres modèles nous ont donné une prédiction d'affaiblissement très élevée dans cette zone ; sachant que c'est une zone ouverte mais malgré ça l'affaiblissement issu des deux modèles K facteur et Okumura-Hata est élevé. Ces résultats confirment surtout que le modèle Okumura-Hata est un modèle dédié plus précisément pour les villes denses et moyennement denses.

Le tableau ci-dessous résume les différentes valeurs des coefficients K et RMSE pour les trois modèles.

Tableau IV.13 : Valeurs des coefficients K et RMSE obtenus dans zone de l'aéroport Rabeh BETATE Annaba.

Zone	Résultats	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	RMSE
Z3	K facteurs	149	44,9	-2,49	0	-13,82	-6,55	10.1441
	Okumura Hata	146,56	44,9	0	0	-13,82	-6,55	12.5130
	Régression	101.42	153.26	-2,49	0	-13,82	-6,55	6.5139

Cette fois aussi, on voit clairement que nous avons un RMSE nettement inférieur à 8dB pour le modèle issu de la régression ; ce qui confirme la crédibilité du modèle développé contrairement aux modèles K facteur et Okumura-Hata.

On définit pour chaque point de mesure l'erreur de prédiction en tant que différence entre l'affaiblissement mesuré sur le terrain et l'affaiblissement prédit par le modèle de propagation (figure IV.25). Nous remarquons que l'erreur de prédiction du modèle issu de la régression est modérée. Dans cette zone ouverte, l'erreur de prédiction des deux modèles K facteur et Okumura-Hata est plus basse que celle du modèle de régression. Mais malgré ça, l'erreur du

modèle reste acceptable et on peut dire d'après la valeur du RMSE que le modèle de régression est plus performant par rapport aux deux autres modèles et reste plus proche de la réalité pour l'environnement de cette zone.

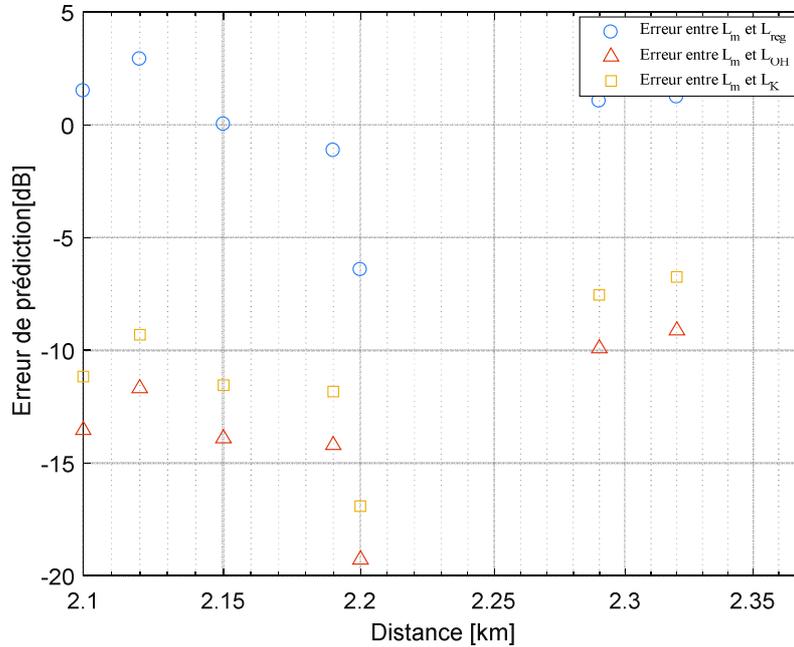


Figure IV.25 : Erreurs de prédiction des trois modèles pour la zone Z3 : Aéroport Rabeh BETATE Annaba.

La figure IV.26 nous permet de voir l'évolution des valeurs du RMSE d'un modèle à un autre. On voit la croissance de cette valeur de RMSE du modèle Okumura-Hata vers celle du modèle K facteur puis la décroissance vers celle du modèle issu par la régression. Notre modèle présente une performance intéressante pour les systèmes radio mobiles par rapport aux autres modèles K facteur et Okumura-Hata.

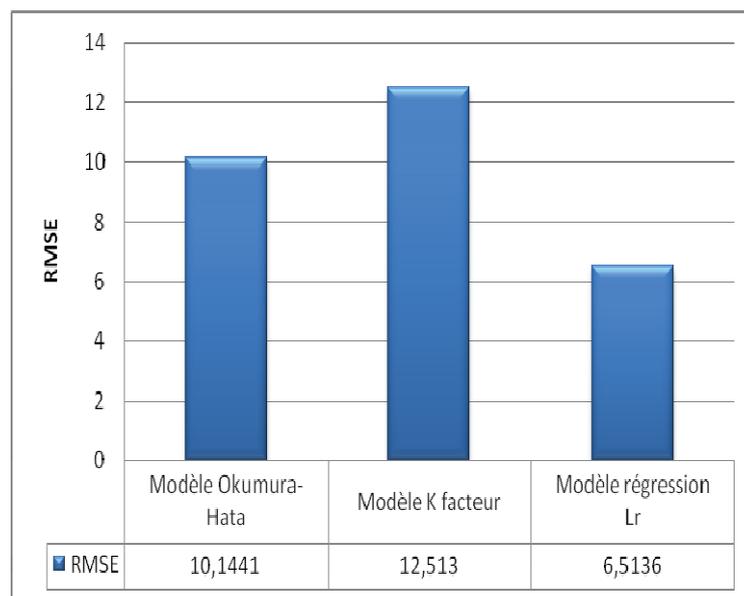


Figure IV.26 : L'évolution du RMSE pour les trois modèles pour la zone Z3 : Aéroport Rabeh BETATE Annaba

IV-8- Récapitulatifs des résultats

En faisant un récapitulatif des résultats obtenus, on peut voir l'évolution des différentes valeurs du RMSE par zone (voir tableau IV.14).

Tableau IV.14 : Évolution du RMSE pour les différentes zones

Zone	Z1		Z2		Z3
	Centre ville Annaba	La poste Avant Port	Sidi Ammar Université	Sidi Ammar centre	Aéroport Rabeh BETATE Annaba
RMSE	1.677	4.4491	3.9707	8.8107	6.514

Dans cette partie, on n'a retenu que les résultats ayant donné un RMSE<8dB, à savoir les résultats des zones Z1 (Centre-ville Annaba, La poste Avant-Port), Z2 (Sidi Ammar Université), Z3 (Aéroport Rabeh BITATE). Nous avons obtenu les coefficients *K* du modèle issu de la régression dont le vecteur moyen est consigné dans le tableau IV.15 ci-dessous.

Tableau IV.15 : Évaluation du modèle résultant de la régression.

Zone	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	K ₆
Ville Annaba	571.77	78.24	-2,49	0	-13,82	-6,55

L'expression finale résultante de notre modèle de propagation sera donc :

$$L = 571.77 + 78.24 \log d - 2.49h_m - 13.82 \log h_{eff} - 6.55 \log h_{eff} \log d \tag{IV.20}$$

La figure (IV.27) nous donne un récapitulatif des valeurs du RMSE pour les trois modèles étudiés dans toute les zones de la ville d'Annaba, où il apparait clairement que les valeurs du RMSE de notre modèle sont plus admise que les valeurs du RMSE dû aux deux autres modèles.

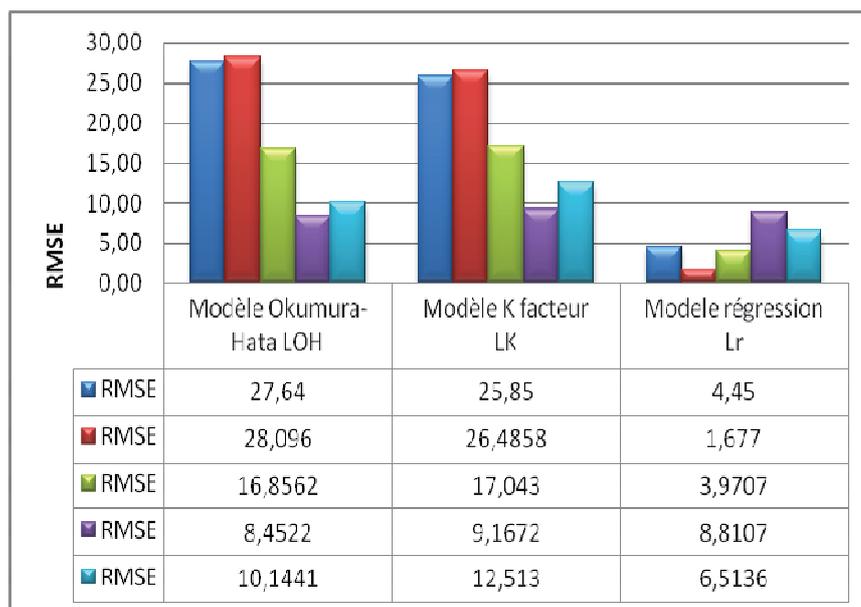


Figure IV.27 : Récapitulative de l'évolution du RMSE des trois modèles.

IV-9-Conclusion

Pour conclure ce chapitre, nous pouvons dire qu'il est marqué par les principes et les caractéristiques de qualité de service dans lesquelles sont énumérées les mesures de performance, les critères pour une meilleure performance du réseau, les outils qui permettent de mesurer les performances à savoir les différents logiciels tels que RNO, SPOTS, et les mesures Drive-Test.

Nous avons reporté les résultats obtenus par l'implémentation de la méthode de régression linéaire à partir des mesures radio faites dans diverses zones de la ville d'Annaba. Il en découle que les modèles de propagation standard telle que Okumura Hata et K facteur ne sont pas adaptés à notre urbanisme, vu la non homogénéité de l'urbanisme de nos villes. Il est donc essentiel d'optimiser lesdits modèles pour obtenir des modèles adaptés à notre réalité et à notre environnement de propagation.

La méthode de régression linéaire utilisée nous a permis d'obtenir un modèle de propagation de la ville d'Annaba avec une valeur de RMSE comprise entre 1,677dB à 6,514dB tandis que celle du modèle de OKUMURA HATA varie de 9,167dB à 25,845dB et celle du modèle K facteur de 8,452 dB et 27,64 dB.

Nous retenons que le nouveau modèle proposé est plus précis et représente mieux la propagation dans la ville d'Annaba que les modèles standardisés d'Okumura-Hata et K facteur.

Conclusion générale

Pour que les opérateurs de la téléphonie mobile puissent assurer un service de de bonne qualité à leurs abonnés, ils doivent réaliser des études techniques pour optimiser leurs système radio mobiles (couverture du territoire, implantation des antennes sur le terrain, ...etc.).

Afin d'accomplir cette mission, ils doivent disposer de services techniques qui réalisent des mesures du signal radio sur le terrain et qui mettent au point les outils d'ingénierie informatique permettant de visualiser et de prévoir la couverture radioélectrique pour une zone géographique donnée. Pour exécuter cette tâche importante, les opérateurs utilisent et mettent au point des modèles de propagation des ondes radioélectriques utilisées par le réseau de télécommunication radio mobile. Ces modèles vont les aider à planifier et dimensionner leurs systèmes radio mobiles et assurer la qualité (couverture, transmission, ...etc.) du réseau de télécommunication.

En guise de conclusion, nous pouvons dire que l'objectif de base de ce travail qui était la contribution à l'étude des performances des systèmes radio mobile a été mené avec succès. Ce travail a nécessité une exploration de toutes les connaissances nécessaires et une finesse dans nos recherches en matière des systèmes radio mobiles.

D'abord, dans la première partie nous avons eu à parler des différentes générations qu'ont connues les systèmes radio mobiles de la première génération à la cinquième génération, de leurs divers éléments de leurs architectures, de leurs limites, leurs différents sous-systèmes, des interfaces par lesquelles ces sous-systèmes sont liés et des canaux utilisés lors pour la mise en communication dans le réseau, et ainsi que certains problèmes qu'il ont rencontrés.

Ensuite nous avons abordé le développement de modèles ainsi que l'analyse des différentes manières de modéliser les phénomènes de propagation d'ondes radio, où nous avons fait un tour d'horizon sur les différents éléments que comporte un modèle. Les types de modélisation dans les systèmes de téléphonie radio mobile ont été abordés où nous avons souligné l'existence de trois grandes catégories de modèles pour la téléphonie radio mobile. Ceux-ci se différencient essentiellement par leur environnement d'application ; et ainsi nous les avons classés suivant ce critère en partant des modèles pour les grandes cellules en milieu rural (modèles macro cellulaires) pour aller jusqu'aux modèles pour l'intérieur des bâtiments (modèles pico cellulaires) en passant par les modèles pour les milieux urbanisés (modèles micro

cellulaire) et ainsi que les critères d'évaluation d'un modèle qui nous permet d'avoir la possibilité d'évaluer les performances d'un modèle.

Par ailleurs, à travers le troisième chapitre, on a pu voir que pour apporter des améliorations aux performances des systèmes radio mobiles, il est nécessaire de prendre en compte les phénomènes électromagnétiques survenant dans l'environnement ainsi que les différents mécanismes subis par l'onde lors de sa propagation à savoir la réflexion, la réfraction, la diffraction, la transmission et la diffusion. Ces phénomènes dépendent notamment de la fréquence utilisée et du type d'environnement (urbain, suburbain, rural, indoor...). Ensuite, nous avons vu les différents modèles empiriques utilisés pour la prédiction de propagation en milieu Outdoor.

En ce qui concerne le travail réalisé, ce dernier est présenté dans le dernier chapitre. Il nous a permis d'avoir une vue réaliste de la propagation des ondes radioélectriques à travers les modèles de prédiction utilisés tel que le modèle K facteur, et le modèle Okumura-Hata. Ces modèles nous ont donné un aperçu sur l'affaiblissement du signal entre l'émetteur et le récepteur dans la ville d'Annaba et ceci pour différents environnements. Comme notre objectif était d'apporter une contribution à l'étude des performances des systèmes radio mobile, nous avons adopté une optimisation du modèle d'Okumura-Hata. Ainsi, le modèle élaboré est très proche des mesures prises avec Drive-Test et l'outil TEMS Investigation. Ce dernier est l'un des outils appropriés pour la détection des anomalies dans un réseau favorisant ainsi les dispositions à prendre par les opérateurs afin de permettre une amélioration et une optimisation des services offerts aux usagers pour les différents environnements étudiés.

A la fin, nous pouvons conclure que le modèle issu de l'optimisation du modèle d'Okumura-Hata est un modèle de propagation d'ondes radioélectriques qui comporte à la base un algorithme qui permet de simuler le canal de propagation entre un émetteur et un récepteur. Il permet ainsi de prédire le niveau moyen du signal que l'on reçoit en n'importe quel point à partir d'un certain nombre de paramètres dans les différents environnements de la ville d'Annaba. Ce modèle a été validé par des mesures réelles et permet donc de modéliser les variations du signal reçu dues aux obstacles du canal radio mobile (effets de masque) auxquelles il faudra rajouter ensuite un algorithme pour tenir compte des variations rapides du signal reçu (fading).

Comme perspective, nous proposons l'implémentation de ce modèle dans un logiciel d'ingénierie radio mobile pour qu'il puisse apporter une aide à la planification et au dimensionnement du réseau dans cette ville ainsi que dans tout le territoire national en utilisant d'autres méthodes d'optimisation et éventuellement d'autres modèles.

Bibliographie

- [1] D. PRINIMA, J. PRUTHI, "Evolution of Mobile Communication Network: from 1G to 5G", International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering (An ISO 3297: 2007 Certified Organization) Vol. 4, Special Issue 4, August 2016.
- [2] Y. PARK, F. ADACHI, "Enhanced Radio Access Technologies for Next Generation Mobile Communication", Springer, Yeung Nam University, Korea, Yeung Nam University, Korea, 2007.
- [3] S. SAPANA, P. SINGH, "Key Concepts and Network Architecture for 5G Mobile Technology." International Journal of Scientific Research Engineering & Technology, pp 165-170, 2012.
- [4] S. HOSSAIN, "5G Wireless Communication Systems", American Journal of Engineering Research (AJER)., Volume-02, Issue-10, pp- 344-353, 2013.
- [5] P. VASCO, S. TIAGO. "Evolution of Mobile Communications: from 1G to 4G", Department of Informatics Engineering of the University of Coimbra, Portugal, 2004.
- [6] H.GUNNAR, "GSM networks : protocols, terminology, and implementation", Artech House mobile communications library, 1998.
- [7] Y. ZAKI, "Future Mobile Communications", Advanced Studies Mobile Research Center Bremen, DOI 10.1007/978-3-658-00808-6_3, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.
- [8] H. HOLMA and A. TOSKALA, "WCDMA FOR UMTS Radio Access for Third Generation Mobile Communications", 3rd Edition, Edited by Both of Nokia, Finland, 2004.
- [9] M. BALA, H. ALOYS, "Analyse, conception, spécification et développement d'un système multi-agents pour le soutien des activités en formation à distance", thèse doctorat, université de Franche-Comté, France, 2003.
- [10] I. DAYA, "Planification radio d'une solution de couverture indoor", Rapport de projet de fin d'étude, GSM 2004/2005.
- [11] S.GIRODON, "Réseaux GSM, GPRS et UMTS ", rapport de stage, 2001.
- [12] Z. REGAI, "Egalisation aveugle multiutilisateurs pour les systems DS-CDMA dans les réseaux des téléphone mobiles", mémoire magister, département génie électrique, université Biskra, 2010.
- [13] K. KUMARAVEL, "Comparative study of 3G & 4G ", journal of computer science ,Vol. 8, Issue 5, No 3, September 2011.
- [14] E. MEURISSE, "L'UMTS et le haut-débit mobile ", rapport, école Ingénieurs 2000 de l'université de Marne-la-Vallée, France, 2007.
- [15] A. BOUROUIS, " Intelligent mobile health monitoring systems ", thèse doctorat, département de Génie Electrique et électronique, faculté de technologie université de Tlemcen, Décembre 2013.
- [16] Y. BOUGUEN, E. HARDOUIN, F-X. WOLFF, "LTE et les réseaux 4G", livrer édition EYROLLES, 2012.
- [17] M. C. MEZIOUD, "Recherche sur la Résolution des Problèmes Complexes d'Affectation de Fréquences Basses Bandes pour les Opérateurs de la Téléphonie Mobile ", thèse de doctorat

- d'université Mentouri de Constantine -Faculté des sciences de l'ingénieur département d'Informatique, 2011.
- [18] C. TURCK, "Prédiction de couverture de champ radioélectrique pour les réseaux radiomobiles : L'apport des Systèmes d'Information Géographique. Application en milieu urbain ", Thèse doctorat de l'Université Louis Pasteur Strasbourg I Discipline : Géographie, 2005.
- [19] H. MABED, "Modèles et techniques d'optimisation dynamique pour les réseaux radiomobiles ", thèse de doctorat, 2003.
- [20] H. BAMBY, "Etude de la qualité de service dans les réseaux mobiles GSM ", mémoire , institut supérieur d'informatique, 2012.
- [21] R. VAUGHAN and J. ANDERSEN, "Channels Propagation and Antennas for Mobile Communications", United Kingdom: IEE Electromagnetic Waves Series 50, 2003.
- [22] P. GUEGUEN, "Techniques multi-antennes émission-réception. Applications aux réseaux domestiques sans fil", Ph.D. dissertation, Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, 2003.
- [23] P. MARY, "Etude analytique des performances des systèmes radiomobiles en présence d'évanouissements et d'effet de masque", thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2008.
- [24] L. SANDERS, "Modèles en analyse spatiale ", Editions Hermes Science, Traité IGAT, pp. 61 à 103, pp. 187 à 217, pp. 253 à 282. Paris, 2001.
- [25] H. SIZUN, "La propagation des ondes radioélectriques ", collection technique et scientifique des télécommunications, Springer-Verlag France et France Télécom, Paris, 2003.
- [26] W.C.Y. LEE, "Mobile communications engineering", McGraw-Hill, New york, 1986.
- [27] S. JENVEY, "Rays optics modelling for indoor propagation at 1.8 GHz", Proceeding of the IEEE 44th Vehicle technology conference, Stockholm Sweden, June 1994.
- [28] R. KATTENBACH, H. FRUCHTING, "Calculation of system and correlation function for WSSUS channels from widband measurements", Frenquenz 49, pp. 3-4, pp. 42-47, 1995.
- [29] D. PARASONS, "The mobile radio propagation canal", Pentch Press, London, 1992.
- [30] J.P. BARBOT, A.J. Levy, J.C. Bic, "Estimation of fast fading distribution functions", Com.URSI Commission of Open Symposium, 1992.
- [31] H. HASHEMI, "The Indoor Radio Propagation Channel", Proceedings of the IEEE, Vol.81, N°7, p.943-968, 1993.
- [32] T. KURNER, D. J. Cichon, W. Wiesbeck, "Concepts and Results for 3D Digital Terrain Based Wave Propagation Models: an overview", IEEE Trans. Selected Areas in Com, Vol.SAC 11,N°7, Sept. 93, p. 1002-1012, 1993.
- [33] L.E. Volger, "An attenuation function for multiple knif-edge diffraction", radio-science, vol17, N°6, pp. 1541-1546, 1982.
- [34] J.WALFISH, H. L. Bertoni, "A theoretical model of UHF propagation in urban environments", IEEE Antennas and Propagation, vol 36, n°12, p. 1788-1796, 1988.
- [35] H. H.Xia, H.L.BERTONI, "Diffraction of cylindrical and plane waves by an array of absorbing half-screens", IEEE Antennas and Propagation, vol. 40, p. 170-177, n°2, 1992.

- [36] L.R.MACIEL, H.L.BERTONI, H.H.XIA, "Unified approach to prediction of propagation over buildings for all ranges of base station antenna height", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 42, n°1, 1993.
- [37] F.IKEGAMI, S.YOSHIDA, T. TAKEUCHI, M.UMEHIRA, "Propagation factors controlling mean field strength on urban streets", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 32, n°8, p. 822-829, 1984.
- [38] J.B. KELLER, "Geometrical theory of diffraction", JOSA vol. 52, p. 116-130, 1962.
- [39] R.G. KOUYOUMJAN, P.H. PATHAK, "A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface", Proc IEEE vol. 62, n°11, p. 1448-1461, Nov. 1974.
- [40] H.L.BERTONI, W. HONCHARENKO, L.R. MACIEL, H.H.XIA, "UHF propagation prediction for wireless personal communications", Proceeding of the IEEE, Vol. 82, n° 9, pp.1333-1359, 1994.
- [41] J-E.BERG, "A recursive method for street microcell path loss calculations", PIMRC'95, Toronto, Canada, pp.140-143, 1995.
- [42] R.AKOBY, U.LIEBENOW, "Modelling of radiowave propagation in microcells", Proc. Intern. Conference on Antennas and propagation , ICAP, Eindhoven, The Netherlands, pp. 377-380, 1995.
- [43] J.WIART, A. MARQUIS, M.JUY, "Analytical Microcell path loss model at 2.2 GHz", PIMRC'93, Yokohama, 1993.
- [44] T.S. RAPPAPORT, S.SANDHU, "Radio Wave Propagation for Emerging Wireless Personal Communication Systems", IEEE Antennas and Propagation Magazine Vol. 36, No. 5, pp.14-23, 1994.
- [45] R. GAHLEITNER, E. BONEK, " Radio waves penetration into urban buildings in small cell and microcells ", Technische universität Wien, Vienna, Austria, Preceedings Vehicular Technology Conference, Stockholm, pp. 887-891, 1994.
- [46] E.H. WALKER, "Penetration of Radio Signals into Buildings in the Cellular Radio Environment", The Bell System Technical Journal, v. 62, n. 9, pp.2719-2730, 1993.
- [47] COST 231, "Evolution of land mobile radio communications", Final report, Information, Technologies and Sciences, European Commission, 1999.
- [48] B. FOULONNEAU, F. GAUDAIRE, Y. GABILLET, "Measurement method of electromagnetic transmission loss of building components uses two reverberation chambers", Elect. Letters 7, Vol. 32, N°23, p.2130-2131, 1996.
- [49] A. J. MOTLEY, J.M. KEENAN, " Personnel communication radio coverage in building at 900 MHz and 1700 MHz ", Electronics Letters, Vol. 24, N°12, 1988.
- [50] X. LAGRANGE, "Les réseaux mobiles"; Chapitre 2 : Propagation radioélectrique (SIZUN H., BIC J.C.), Réseaux et Télécoms, Information-Commande-Communication, HERMES, 2000.
- [51] A NESKOVIC and G. PAUNIVIC, "Modern Approaches in Modeling of Mobile Radio System Propagation Environments", IEEE communication surveys, third quarter 2000.
- [52] J. LAVERGNAT, M.SYLVAIN, "Propagation des ondes radioélectrique", collection Pédagogique de télécommunication, MASSON, 1997.

- [53] L. BOITHIAS, "Propagation des ondes radioélectriques dans l'environnement terrestre", Dunod, 1983.
- [54] H. KHEDHER, S. TABBANE, "Mécanismes Pour La Planification Et L'ingénierie Des Réseaux Cellulaires", thèse de doctorat ENIT, LS Telecom, 2005.
- [55] T. RAPPAPORT, "Wireless Communications: Principles and Practice", Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 1996.
- [56] B. SKLAR, "Digital Communications: Fundamentals and Applications", 2/E, Prentice Hall, 2002
- [57] W. JAKES, "Microwave Mobile Communications", Massachussets, USA : Wiley-IEEE Press, 1994.
- [58] A. WAUTER, "Le Canal Radio Mobile ", rapport interne, Sup'Elec, 24 février 1997.
- [59] T.S RAPPAPORT, "Wireless Communications: Principles and Practice", 2/E, Prentice Hall, 2001.
- [60] C.WEBER, "Propagation par diffraction", Rec.UIT-R, pp 7-527, Images satellitaires et milieu urbain, Editions Hermès, Collection Géomatique, pp 185, Paris 2002.
- [61] International Telecommunication Union Study Groups, " Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000/FPLMTS ", FPLMTS.REVAL, Question ITU-R, document 8/29-E, 1996.
- [62] Mc D.A NAMARA, C.W.I PISTORIUS, J.A.G MALHERBE, "The Uniform Geometrical Theory of diffraction", Artech, House, London, 1990.
- [63] D. GRENIER, "Antennes et Propagation radio", D'département de génie électrique et de génie informatique, Université Laval Québec, Canada 2012.
- [64] M. O AL-NNUAMI, A.H HAMMOUDEH, "Measurements and predictions of attenuation and scatter of microwave signals by trees", IEE Proc.Microw. Antennas Propagation, Vol. 114, n°2, 1994.
- [65] C. TURK, D. THOMAS, C. WEBER, "Prédiction de couverture de champ radioélectrique pour les réseaux radiomobiles : L'apport de l'analyse spatial et des systèmes d'Information géographique. application en milieu urbain", 4ième journées d'études : propagation électromagnétique dans l'atmosphère terrestre du décamétrique à l'angstôm, rennes, 13-15 mars 2002.
- [66] GRINDROP.EA, " propagation des ondes radioélectrique introduction ", Masson, Paris 1997.
- [67] W.C.Y. LEE, "Mobile Communications Engineering", McGraw Hill, New York 1985.
- [68] M. AYADI, "Vers un outil d'évaluation De La Qualité De Couverture Du Réseau GSM Tunisien", PFE, ENIT, LS Telecom, juillet 1999.
- [69] T.S RAPPAPORT, "Wireless Communications: Principles and Practice", 2n ed. New delhi: Prentice Hall, pp. 151-152, New delhi 2005.
- [70] Y. OKUMURA, "Field strength variability in VHF and UHF land mobile services" Rev. Elec. Comm. Lab. Vol. 16, pp. 825-873, Sept-Oct 1968.
- [71] T.S. RAPPAPORT, "Wireless Communications: Principles and Practice", Prentice Hall PTR, New Jersey 1996.

- [72] C.AKKAŞLI, "Methods for Path loss Prediction", Reports from MSI, School of Mathematics and Systems Engineering, University Vaxjo, pp. 53, October 2009.
- [73] M. HATA, "Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services", IEEE Trans. Veh. Technol, 317–325, 1980.
- [74] H.L. BERTONI, "Radio Propagation for Modern Wireless Systems", Prentice-Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, 2000.
- [75] D. CHHAYA, M.V.S.N. PRASAD, P K DALELA "Tuning of Cost231 Hata model for radio wave propagation prediction", Academy & Industry Research Collaboration Center. May 2012.
- [76] MEDEISIS et KAJACKAS, "The tuned Okumura Hata model in urban and rural zones at Lituania at 160, 450, 900 and 1800 MHz bands", Vehicular Technology Conference Proceedings, VTC 2000-Spring Tokyo. IEEE 51st Vol. 3, pp. 1815 – 1818, 2000.
- [77] A. BHUVANESHWARI, R. HEMALATHA, T. SATYASAVITHRI, "Statistical Tuning of the Best suited Prediction Model for Measurements made in Hyderabad City of Southern India", Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2013 Vol. II, WCECS 2013, , San Francisco, USA 23-25 October, 2013.
- [78] MARDENI &PRIYA et ALL, "Optimized COST-231 Hata model to predict path loss for suburban and open urban environments in the 2360-2390MHz", Progress In Electromagnetics Research C, Vol. 13, pp 91-106, 2010.
- [79] Y. MINGJINGANG, "A Linear Least Square Method of Propagation Model Tuning for 3G Radio Network Planning", ICNC '08. Fourth International Conference on Vol. 5, pp 150—154, 2008.
- [80] Y.H. CHEN and K.L HSIEH, "A Dual Least-Square Approach of Tuning Optimal Propagation Model for existing 3G Radio Network", Vehicular Technology Conference, VTC 2006-Spring. IEEE 63rd Vol. 6, pages 2942 – 2946, 2006.
- [81] E.DEUSSOM and E.Tonye "New Approach for Determination of Propagation Model Adapted To an Environment Based On Genetic Algorithms: Application to the City Of Yaoundé, Cameroon", IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering, Vol. 10, pp. 48-49, 2015.
- [82] M. ALLAM, Y. DAMA, "Optimizing Outdoor Propagation Model based on Measurements for Multiple RF Cell". Proceeding of the 9th Telecommunications Forum (TELFOR 2001), Belgrade, Nov.2001.
- [83] A. CHARIYEV, L. TAN JUNG, M. NAUFAL, B. M. SAAD, "Path Loss Simulation in Different Radio Propagation Models with 1.8GHz and 2.6GHz Bands", Département du génie électrique et des technologies de l'informatique de Université Technologique de PETRONAS Bandar Seri Iskandar, IEEE, Malaysia 2014.
- [84] A D. D. E. MICHEL, T. Emmanuel, "New Approach for Determination of Propagation Model Adapted To an Environment Based On Genetic Algorithms: Application to the City Of Yaoundé, Cameroon" , Department of Electrical and Telecommunications Engineering; Polytechnic National Advanced School of Engineering of Yaoundé ; University of Yaoundé I, CAMEROON, IOSR , Volume 10, Issue 1, pp. 48-59, 2015.

- [85] A. D. D. E. MICHEL, T. EMMANUEL, "New Propagation Model Optimization Approach based on Particles Swarm Optimization Algorithm", Department of Electrical and Telecommunications Engineering; Polytechnic National Advanced School of Engineering of Yaoundé ; University of Yaoundé I, CAMEROON, International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Vol. 118, N°. 10, 2015.
- [86] D.D E. MICHEL, T. EMMANUEL, "Optimisation du modèle d'Okumura Hata par la régression linéaire. Application à la Ville de Yaoundé au Cameroun", IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering, Vol. 10, Issue 6, pp 63-72, 2015.
- [87] R. MARDENI and K. F. KWAN, "Optimization of Hata propagation prediction model in suburban area in Malaysia", Faculty of Engineering Multimedia University Jalan Multimedia, Selangor, Malaysia Progress In Electromagnetics Research C, Vol. 13, pp. 91-106, 2010.
- [88] R.H , CLARK, « A statistical theory of mobile radio reception », B.S.T.J, pp 957-1000, Août 1968.
- [89] W.R. BRAUN, U. DERSCH; "A physical mobile radio channel", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 40, n°2, pp.472-482, 1991.
- [90] BARBOT J.P., LEVY A.J., BIC J.C.; "Estimation of fast fading distribution functions", Com. URSI Commission F Open Symposium, 1992.
- [91] LEE Y.E., "Site precise radio wave propagation simulations by time domain finite difference methods ", Proceedings of the 43th Vehicular Technology Conference, Meadowlands, USA, May 1993.
- [92] R. KATTENBACH, H. FRUCHTING, "Calculation of system and correlation functions for WSSUS channels from wideband measurements ", Frequenz 49, 3-4, p. 42-47, 1995.
- [93] M. FAILLY, "Final Report of COST 207, Digital Land Mobile Radio Communications ", CEE Luxembourg, 1989.
- [94] J. LAVERGNAT, M. Sylvain, " Propagation des ondes radioélectriques ", Collection Pédagogique de Télécommunication, MASSON, 1997.
- [95] CCIR, "Evaluation des facteurs de propagation liés aux problèmes de brouillage entre stations situées à la surface de la terre aux fréquences supérieures à 0.5GHz", Rec.569-4, 1990.

Annexe 1

Les modèles petites cellules

1-Modèle COST-CENT

Dans ce modèle, les pertes totales (L) obtenues se décomposent en 4 termes principaux représentant les pertes liées à la distance entre l'émetteur et le récepteur, les pertes liées à diffraction multiple sur les arêtes, les pertes liées à la dernière diffraction et à la réflexion respectivement sur les immeubles et derrière le mobile et les pertes liées à la diffraction sur arête principale comme indiqué au chapitre II page 56.

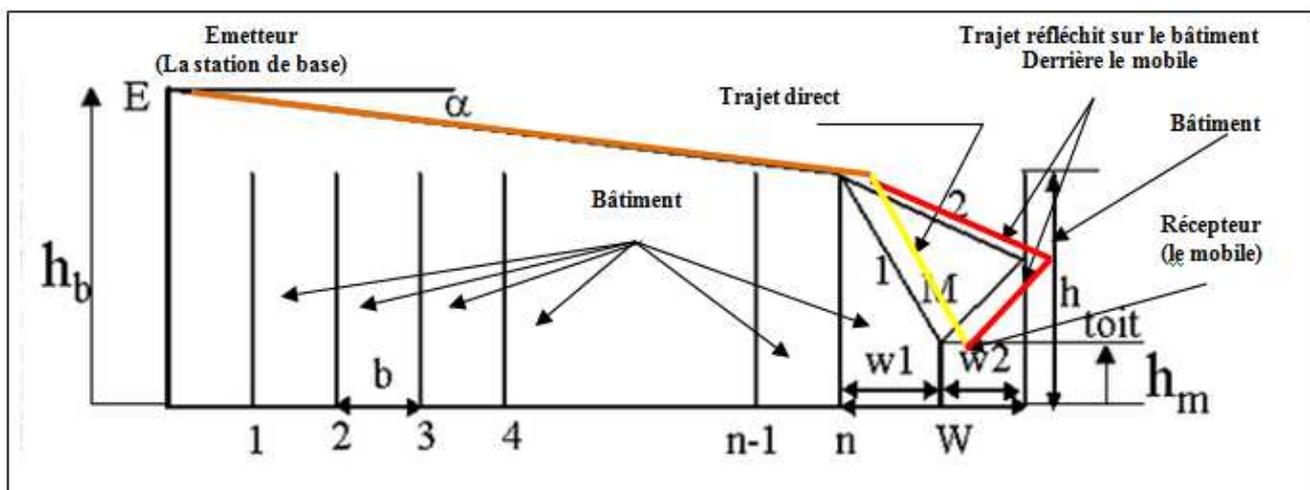


Figure 1 : Profile synthétique du modèle COST 231.

1-1-Pertes liées à la distance entre l'émetteur et le récepteur (L_0)

Soit A_0 l'atténuation due à la propagation en espace libre entre deux antennes séparées par une distance d . Son expression par[88]:

$$A_0 = \left(\frac{4}{d} \right)^2$$

Il en résulte que :

$$L_0 = -10 \text{Log}_{10}(A_0)$$

1-2 - Pertes liées à la diffraction multiple sur les arêtes

Elles sont estimées selon la méthode de Walfish et Bertoni révisé par COST-231 ou par FTR&D(L_{msd})

1-2-1-Modèle COST-231

Ce modèle est donné par :

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log_{10}(d) + k_f \log_{10}(f) - 9 \log_{10}(b)$$

où :

$$L_{bsh} = -18 \log_{10} \left(1 + (h_b - h_{toit}) \right) \quad \text{pour } h_b > h_{toit}$$

$$L_{bsh} = 0 \quad \text{pour } h_b \leq h_{toit}$$

$$k_a = 54 - 0,8 \left(h_b - h_{toit} \right) \frac{d}{0,5} \quad \text{si } h_b > h_{toit} \text{ et } d < 0,5 \text{ Km}$$

$$k_a = 54 - 0,8 \left(h_b - h_{toit} \right) \quad \text{si } h_b > h_{toit} \text{ et } d \geq 0,5 \text{ Km}$$

$$k_a = 54 \quad \text{si } h_b \leq h_{toit}$$

$$k_d = 18 - 15 \frac{h_b - h_{toit}}{h_{toit}} \quad \text{si } h_b > h_{toit}$$

$$k_d = 18 \quad \text{si } h_b \leq h_{toit}$$

$$k_f = -4 + 0,7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \quad \text{Pour les villes moyennes et les zones urbaines}$$

$$k_f = -4 + 1,5 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \quad \text{Pour les villes urbaines denses}$$

Le terme k_a représente l'accroissement d'affaiblissement lorsque l'antenne de la station de base est située au-dessous du niveau des toits des bâtiments adjacents.

Les termes k_d et k_f contrôlent la dépendance des affaiblissements dus à la diffraction multiple en fonction respectivement de la distance et à la fréquence.

1-2-2 - Modèle FTR&D

Le champ est calculé de manière récurrente sur chacun des écrans de diffraction à partir de l'intégrale de Kirchhoff-Huygens de façon à obtenir l'amplitude du champ H_n au sommet de l'arête n [89]. La résolution numérique s'effectue en approximant linéairement l'amplitude et la phase de cette intégrale sur un intervalle discret convenablement choisi. WALFISH et BERTONI ont montré que H_n tend à devenir constant pour des valeurs de α (angle d'incidence) et de n suffisamment grandes. Par interpolation, ils en ont déduit l'expression de Q :

$$Q = \left(\frac{\left(\frac{b}{d} \right)^{\frac{1}{2}}}{0,03} \right)^{0,9}$$

Remarquons que :

$$\frac{h_b}{d}$$

Δh_b : étant la hauteur de l'émetteur sur les toits.

Il s'ensuit que :

$$L_{msd} = -20 \log_{10}(Q)$$

1-3- Pertes liées à la dernière diffraction et à la réflexion respectivement sur les immeubles et derrière le mobile (L_{rts})

Elles décrivent le couplage de l'onde qui se propage au-dessus des multiples bâtiments vers le mobile à l'intérieur de la rue.

1-3-1 - Modèle COST 231

Ce modèle est représenté par l'équation :

$$L_{rts} = -16,9 - 10 \log_{10} w + 10 \log_{10} f + 20 \log_{10} (h_{toit} - h_m) + L_{ori}$$

Avec :

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0,35 & \text{Pour } \begin{matrix} 0^0 & 35^0 \\ 35^0 & 55^0 \\ 55^0 & 90^0 \end{matrix} \\ 2,5 + 0,075 \begin{pmatrix} -35^0 \\ -55^0 \end{pmatrix} \\ 4,0 - 0,114 \begin{pmatrix} -35^0 \\ -55^0 \end{pmatrix} \end{cases}$$

Où :

w : est la largeur de la rue en mètre,

f : est la fréquence en MHz,

φ : est l'angle entre l'axe de la rue et la direction d'incidence de l'onde.

1-3-2 - Modèle FTR&D

Au niveau du mobile, le champ résulte de la superposition du rayon diffracté par l'immeuble situé avant le mobile (trajet 1) et du rayon réfléchi par l'immeuble situé après le mobile (trajet 2). Tous les autres rayons sont négligés. Soit E_1 le champ dû au rayon du trajet

1 et soit E_2 le champ dû au rayon du trajet 2, le champ E résultant s'exprime alors par la suivante :

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$$

Comme E_1 et E_2 sont en fait issus de la diffraction sur la dernière arête n , nous les calculons à l'aide des formules de Fresnel en admettant que toutes les conditions nécessaires réunies. Les trajets respectivement considérés sont w_1 pour E_1 et $2W - w_1$ pour E_2 . Par rapport à l'espace libre E_0 , nous avons alors :

$$E_1 = \left(\frac{0,225}{\sqrt{2}} \right) * E_0 * \frac{\sqrt{w_1}}{H_m}$$

$$E_2 = \left(\frac{0,225}{\sqrt{2}} \right) * E_0 * \frac{\sqrt{(2W - w_1)}}{L_r * H_m}$$

ΔH_m est la différence entre la hauteur du mobile et la hauteur du dernier immeuble, et est l'inverse du coefficient de réflexion pour le trajet 2. Nous prendrons $L_r = 2$. Nous déduisons la valeur du champ total et les pertes L_{rts} en dB :

$$E_2 = \left(\frac{0,225}{\sqrt{2}} \right) E_0 \frac{\sqrt{\left(w_1 + \frac{2W - w_1}{2} \right)}}{L_r H_m}$$

$$L_{rst} = -20 \log_{10} \left(\frac{E}{E_0} \right)$$

Remarque :

L'expression du modèle tel qu'il a été défini dans le cadre du groupe européen COST 231[47] revient à considérer que :

$$w_1 = \frac{W}{2}$$

Donc le mobile est au centre de la rue :

$$L = L_0 + L_{msd} + L_{rts}$$

1-4- Pertes liées à la diffraction sur une arête principale (L_{deg})

Comme nous ne considérons que le cas d'une arête unique, l'affaiblissement de diffraction peut être obtenu par les formules approximatives de Deygout issues des formules théoriques rigoureuses de Fresnel [90]. Le paramètre h représente la hauteur de l'arête par rapport à l'axe E-R ($h > 0$ dès que l'arête coupe l'axe E-R et $h < 0$ sinon) et r représente le rayon de l'ellipsoïde de Fresnel. L'affaiblissement L_{deg} en dB est alors donné par :

$$\begin{aligned}
 L_{deg} &= 0 & \text{si} & \frac{h}{r} < -0,5 \\
 L_{deg} &= 6 + \frac{12h}{r} & \text{si} & -0,5 < \frac{h}{r} < 0,5 \\
 L_{deg} &= 8 + \frac{8h}{r} & \text{si} & 0,5 < \frac{h}{r} < 1 \\
 L_{deg} &= 16 + 20 \log_{10} \left(\frac{h}{r} \right) & \text{si} & \frac{h}{r} > 1
 \end{aligned}$$

La détermination du profil est une étape particulièrement importante. Il s'agit, à partir d'un profil réel issu des données obtenues sur le terrain contenues dans les fichiers contours de bases, d'extraire les paramètres nécessaires pour le calcul des affaiblissements. De ce profil sont alors extraites les variables géométriques (largeur moyenne des rues, largeur de la rue où se trouve le mobile, hauteur moyenne des immeubles, orientation de la rue où se trouve le mobile...) mais aussi des variables qualitatives (récepteur en visibilité ou non de l'émetteur, présence de végétation, zone pavillonnaire...) caractéristiques de l'environnement. Afin d'adapter le modèle à des configurations réelles et d'améliorer ses performances, il est en fait utile de construire de manière semi-statistique l'affaiblissement total du modèle s'exprimant donc sous la forme :

$$A_{ff} = L_0 + L_{msd} + L_{rts} + L_{deg} + \sum_i c_i P_i$$

Où

Les P_i désignent les différentes variables géométriques utilisées et où les coefficients $\alpha, \beta, \gamma, c_i$ sont les coefficients obtenus par simple régression linéaire sur un ensemble donné de mesures.

Annexe 2

Le modèle Micro G-CNET

1- Modèle Micro G-CNET

C'est un modèle analytique qui effectue un calcul d'affaiblissement pour le cas où la propagation le long des rues est le phénomène prépondérant [91-92] et un calcul sur profil dans le plan vertical contenant l'émetteur et le récepteur pour les cas de visibilité ou de non-visibilité mais où la propagation par-dessus les toits devient prépondérante (longues distances, présence de bois ou encore, environnements pavillonnaires où la hauteur moyenne des bâtiments est élevée par rapport à la hauteur de l'émetteur...). On a ainsi deux catégories de calcul, le long des rues et sur le profil.

1-2 - Calcul le long des rues

Une analyse de la propagation à 900 MHz et 1800 MHz au passage d'un coin de rue par des simulation effectuées à l'aide des méthodes d'électromagnétisme a conduit à des expressions analytiques simplifiées des mécanismes de propagation en visibilité, de réflexion et de diffraction en fonction des largeurs de rues origine et destination (respectivement W_1 et W_2), de la distance de l'émetteur au coin (D), de la distance du coin au récepteur (X), de l'angle α fait par les deux rues et de la fréquence d'émission. L'affaiblissement (A_{ff}) au niveau du récepteur après le passage du coin se décompose de la façon suivante [93]:

$$A_{ff} = A_{ffVis} + MAX(A_{ffRef}, A_{ffDif})$$

Où

A_{ffVis} : est l'affaiblissement de visibilité sur la distance D entre l'émetteur et le premier coin de rue

$$A_{ffvis} = 32,4 + \log_{10}(f) + 20 \log_{10}(D)$$

A_{ffRef} : est l'affaiblissement dû à la réflexion [93]

$$A_{ffRef} = 32,4 + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}(D + X) + SX$$

$$S = \frac{D}{W_1 W_2} f(\)$$

Avec :

- S représente la pente de la décroissance de la puissance au passage de la rue,
- W_1 et W_2 sont les largeurs de rue en visibilité et en non visibilité,

- X est la distance du récepteur au coin de rue,
- $f(\alpha)$: est une fonction de l'angle α de la rue.
- A_{ffDif} : est l'affaiblissement dû à la diffraction [93].

$$A_{ffDif} = 32.4 + 20 \log_{10}(f) + 10 \log_{10}(X(X + D)D) + 2D_a$$

Où :

$$D_a = \left(\frac{45}{2}\right) a \tan\left(\frac{X}{W_2}\right) - \frac{23}{2}$$

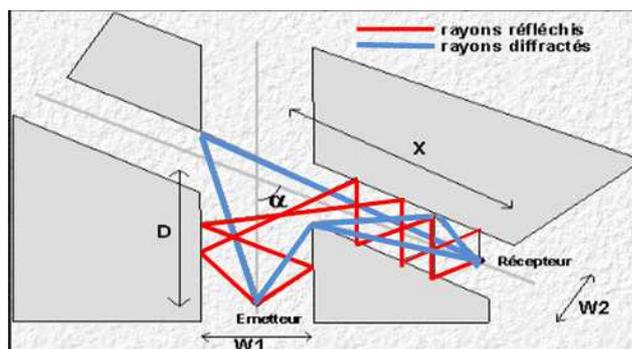


Figure 1 : Propagation dans une zone macro cellulaire.

Cette démarche peut s'étendre de manière répétitive lors du passage de plusieurs coins successifs $n-1$ jouant le rôle de l'émetteur et le coin $n+1$ celui du récepteur. Pour déterminer l'affaiblissement entre un émetteur et un récepteur, le modèle Micro G-CNET recherche tous les chemins possibles entre le point d'émission et le point de réception. Les contributions apportées par les différents chemins sont sommées en Watts, et la résultante est convertie en décibels.

1-2 Calcul sur le profil

Lorsqu'il s'agit de prédire un affaiblissement dans un environnement spécifique non typiquement micro cellulaire (grandes distances en LOS ou NLOS, grandes places, squares, présence de bois...), un calcul le long des rues devient trop irréaliste et erroné. Il est nécessaire d'introduire un calcul selon un profil. Le principe repose sur le fait que l'onde qui se propage par-dessus les toits ou à travers les arbres est prépondérante devant celle qui se propage le long des rues. Le modèle consiste en [94-95]:

- L'interprétation d'un profil réel pour se ramener à un calcul de diffraction multiple au-dessus des toits, de diffraction et réflexion au niveau du mobile et de l'émetteur de type Walfisch-Bertoni-Ikegami.
- L'adaptation des formules théoriques habituellement utilisées en petites cellules dans un environnement micro cellulaire.

Le principe repose sur le fait que l'onde qui se propage par-dessus les toits ou à travers les arbres est ou devient prépondérante à celle qui se propage le long des rues.

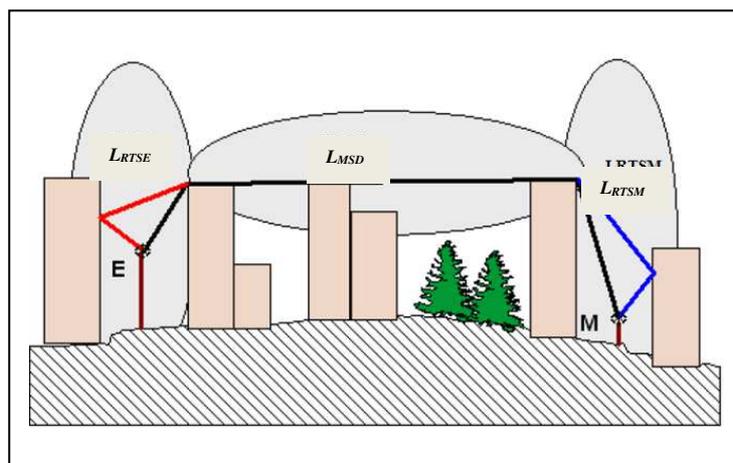


Figure 2 : Profil micro cellulaire

Afin d'adapter le modèle à des configurations réelles et pour améliorer les performances, il est en fait construit de manière semi-statistique et l'affaiblissement total L_0 s'exprime sous la forme :

$$L_0 = L_d + L_{MSD} + L_{RTSE} + L_{RTSM} + \delta_{Adeg} + \sum_{i=0}^n P_i$$

Le calcul de l'affaiblissement du modèle fait intervenir :

- un affaiblissement lié à la distance (L_d)
- un affaiblissement de diffraction (L_{MSD})
- un affaiblissement de diffraction et de réflexion au niveau de l'émetteur (L_{RTSE})
- un affaiblissement de diffraction et de réflexion au niveau du récepteur (L_{RTSM})
- un affaiblissement de diffraction sur le MNT de type Deygout (δ_{Adeg})

- un ensemble de variables géométriques notamment liées à la distance d de e végétation traversée (P_i)
- Les coefficients α , β , γ , δ et α_i obtenus par simple régression linéaire sur un ensemble de mesures données.

Annexe 3

Les relations de Fresnel

1- Introduction

Considérons une onde plane incidente (E_i, H_i, k_i) sur une surface plane séparant deux milieux (1) et (2) dont les permittivités et les perméabilités sont respectivement ϵ_1, μ_1 et ϵ_2, μ_2 , les deux milieux sont considérés purement diélectriques c'est à dire sans perte (la conductivité σ_1 et σ_2 sont nulles). Les dimensions de cette surface (plan (O_x, O_y)) sont très grandes et les irrégularités très petites par rapport à la longueur d'onde. Le plan (O_x, O_z) est le plan d'incidence, il contient le vecteur k_i . L'angle d'incidence (angle du vecteur k_i par rapport à la normale à la surface de séparation) est égal à θ_i . La continuité des composantes tangentielles des champs électrique et magnétique et la continuité des composantes normales inductions électrique et magnétique à la surface de séparation (résolution des équations Maxwell) conduit à la génération d'une onde réfléchie (E_r, H_r, k_r) et d'une onde transmise (E_t, H_t, k_t) (figure 1) [94].

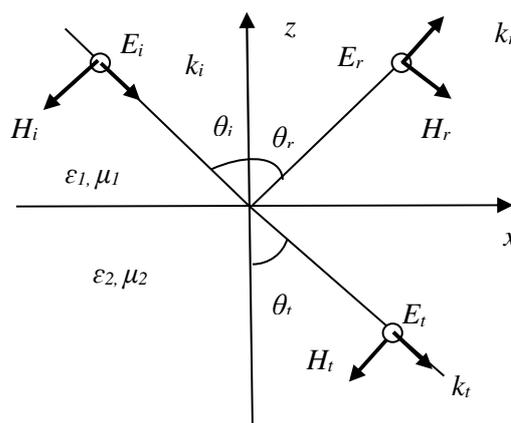


Figure 1 : Représentation schématique de la réflexion et de la transmission d'une onde électromagnétique en polarisation parallèle.

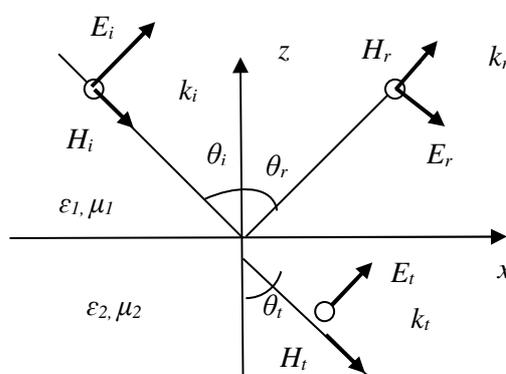


Figure 2 : Représentation schématique de la réflexion et de la transmission d'une on électromagnétique en polarisation perpendiculaire.

Des conditions de continuité il en résulte :

$$E_i = E_r \quad (\text{loi de la réflexion})$$

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad (\text{loi de la réfraction ou de Descartes-Snell})$$

Les coefficients de réflexion et de transmission se déduisent des relations suivantes :

$$R = \frac{E_r}{E_i} \quad \text{et} \quad T = \frac{E_t}{E_i}$$

Les amplitudes relatives des différentes ondes (incidente, réfléchie, transmise) résultent des conditions de continuité mais dépendent de la polarisation. On distingue généralement deux cas, la polarisation dite horizontale et la polarisation dite verticale, le plan de séparation étant considéré comme horizontal. Le cas général peut être considéré comme une combinaison linéaire des deux cas cités.

2 - Polarisation horizontale

Le champ électrique est horizontal c'est-à-dire parallèle au plan de séparation. Les équations de continuité conduisent aux relations suivantes [94]:

$$E_i + E_r = E_t$$

$$(H_i - H_r) \cos \theta_i = H_t \cos \theta_t$$

$$(H_i + H_r) \sin \theta_i = H_t \sin \theta_t$$

Il en résulte que les coefficients (R_H) de réflexion et de transmission (T_H) dépendent des impédances Z_1 et Z_2 des différents milieux et des différents angles (angle d'incidence et angle de réfraction).

$$R_H = \frac{E_{rH}}{E_{iH}} = \frac{Z_2 \cos \theta_t - Z_1 \cos \theta_i}{Z_2 \cos \theta_t + Z_1 \cos \theta_i}$$

$$T_H = \frac{E_{tH}}{E_{iH}} = \frac{2Z_2 \cos \theta_t}{Z_2 \cos \theta_t + Z_1 \cos \theta_i}$$

3 - Polarisation verticale

Le champ magnétique est horizontal c'est à dire parallèle au plan de séparation. Le champ électrique n'est pas vertical contrairement au terme utilisé. Les équations de continuité conduisent aux relations suivantes [94]:

$$(E_i - E_r) \cos \theta_i = E_t \cos \theta_t$$

$$(H_i + H_r) = H_t$$

$$(E + E_r) \sin \theta_i = 2 E_t \cos \theta_t$$

Il en résulte que les coefficients (R_V) de réflexion et de transmission (T_V) dépendent des impédances des différents milieux et des différents angles (angle d'incidence et angle de réfraction) :

$$R_V = \frac{E_{rV}}{E_{iV}} = \frac{Z_2 \cos \theta_i - Z_1 \cos \theta_t}{Z_2 \cos \theta_i + Z_1 \cos \theta_t}$$

$$T_V = \frac{E_{tV}}{E_{iV}} = \frac{2Z_2 \cos \theta_i}{Z_2 \cos \theta_i + Z_1 \cos \theta_t}$$

Annexe 4

Les propriétés du canal

1-L'affaiblissement de propagation en espace libre

Différents modèles d'affaiblissements sont définis dans la littérature [25]. On distingue généralement l'affaiblissement de propagation en espace libre et l'affaiblissement excès par rapport à ce dernier.

L'affaiblissement en espace libre est l'affaiblissement de transmission due à la dispersion de l'énergie de l'onde qui serait obtenu si les antennes étaient remplacées par des antennes isotropes placées dans un milieu diélectrique parfait, homogène et illimité, la distance entre antennes étant conservé. Il est donné par la relation suivante :

$$A_0 = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2$$

Soit sous forme logarithmique :

$$A_0 (dB) = 32,4 + 20 \log_{10} (f) + 20 \log_{10} (d)$$

où :

d : est la distance entre l'émetteur et le récepteur (km),

λ est la longueur d'onde (km),

f : est la fréquence (MHz).

Ceci suppose que l'on a qu'un seul trajet radioélectrique dont le 1^{er} ellipsoïde de FRESNEL est dégagé.

L'affaiblissement en excès par rapport à l'espace libre est la différence entre l'affaiblissement de propagation et l'affaiblissement en espace libre (absorption par les gaz, hydrométéores, les murs, la végétation, affaiblissement par diffraction,... etc.

2-Variabilité

L'environnement de propagation est indéterminé : le passage de véhicules et de personnes, le vent dans les arbres, l'ouverture de portes provoquent des fluctuations des trajets radioélectriques et génèrent les variations rapides du signal observé. Combinés avec le mouvement des véhicules, ces phénomènes créent une variabilité du canal de propagation dans l'espace et dans le temps.

Les variations du signal sont de nature aléatoire. Une analyse statistique permettra d'évaluer l'impact des trajets multiples sur la transmission des systèmes radiomobiles. La loi du champ reçu et le temps moyen des évanouissements par exemple sont des données indispensables pour dimensionner les équipements de transmission et leur dispositif de lutte contre le fading (évanouissement).

Une modélisation des variations rapides a été proposée [88]. En supposant que le mobile se déplace dans une figure d'interférence générée par la superposition d'un grand nombre d'ondes planes d'amplitudes, de phases et de directions aléatoires indépendantes, le champ reçu est, par l'application du théorème de la limite centrale, une variable gaussienne. L'enveloppe du signal à bande étroite suit alors une loi de Rayleigh. On parlera de fading de Rayleigh.

La densité de probabilité d'une variable aléatoire R suivant une loi de Rayleigh est donnée par la relation suivante [31] :

$$\begin{cases} f_R(x) = \frac{x}{2} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right), & x > 0 \\ f_R(x) = 0, & x \leq 0 \end{cases}$$

Elle est caractérisée par le paramètre σ où σ^2 représente la puissance moyenne du signal. Elle est observée en présence de trajets multiples dans une configuration de liaison obstruée où la contribution de chacun des trajets est équivalente.

Dans le cas d'un trajet prédominant (visibilité, environnement ouverts tels que banlieue, rural, ... etc.), l'enveloppe du signal à bande étroite de la puissance reçue suit alors une loi de Rice dont la densité de probabilité est donnée par :

$$f_R(x) = \frac{x}{2} \exp\left(-\frac{x^2 + r^2}{2}\right) I_0\left(\frac{xr}{2}\right), \quad x \geq 0$$

$$f_R(x) = 0 \quad x < 0$$

où I_0 est la fonction de Bessel modifiée de 1^{ère} espèce et d'ordre 0. Il est observé lorsqu'un des trajets est prédominant. La loi de Rice correspond à une loi de Rayleigh lorsque $r = 0$ (absence de trajet direct) et permet d'identifier un trajet direct et sa prépondérance. Elle est également caractérisée par le coefficient K (paramètre de Rice) défini par la relation :

$$K = 10 \log_{10} \left(\frac{r^2}{2} \right)$$

Le paramètre K représente le rapport entre la puissance du trajet direct et la contribution en puissance des trajets secondaires obéissant à une loi de Rayleigh.

Plus le paramètre K est grand, plus le trajet direct a une puissance importante par rapport aux trajets multiples et plus la liaison est dégagée. À l'inverse si le trajet prédominant est faible ($K = -5$ dB), on considère que la loi de Rice s'identifie à une loi de Rayleigh [96]. La valeur de K dépend de l'environnement (urbain dense, suburbain, rural, etc.).

D'autres lois, telles que celles de Weibull et Nakagami [89] permettent également de caractériser l'enveloppe du signal radio mobile.

Afin de déterminer la loi de variation suivie par le signal on applique des tests statistiques par exemple le test de Kolmogorov-Smirnov [90] sur ses variations rapides résultant des interférences des ondes reçues.

Connaissant les caractéristiques statistiques du signal (densité de probabilité, fonction de répartition), il est possible de déterminer les paramètres pertinents au fonctionnement d'un système radioélectrique parmi lesquels :

- la probabilité de descendre au-dessous d'un certain niveau. Quand la puissance du signal est inférieure au seuil de bruit toléré par le récepteur (bruit thermique,

brouillage, parasites industriels, etc.), le signal est masqué par le bruit. Le récepteur est alors incapable d'interpréter correctement l'information transmise.

- la durée statistique d'un évanouissement. Durant l'évanouissement, les paquets d'informations sont perdus. Les temps de coupure sont d'autant plus longs que le mobile se déplace lentement.

3 – Sélectivité

Lorsque les différences de temps de parcours des trajets multiples sont importantes, la fonction de transfert n'est plus constante sur toute la largeur du spectre : l'affaiblissement de propagation dépend de la fréquence à laquelle on se place. Le canal est dit sélectif en fréquence.

Une modélisation du canal en large bande est alors indispensable pour évaluer les performances d'une chaîne complète de transmission de concevoir les nouveaux systèmes et assurer la qualité de transmission de signaux numériques.

Le canal radioélectrique est représenté par sa réponse impulsionnelle variable dans le temps $h(t, \tau)$, τ étant le retard et t rappelant la dépendance en temps (et donc en espace puisque le véhicule se déplace). Fonction à deux variables, elle traduit les trois caractéristiques du canal : l'affaiblissement, la variabilité (τ) et la sélectivité (t).

Les variables duales, par transformée de Fourier sont respectivement la fréquence et la vitesse Doppler [91, 92].

Le signal de sortie $y(t)$ en fonction du signal d'entrée $x(t)$ est représenté sous la forme d'une équation de convolution dont le noyau de convolution est variable dans le temps :

$$y(t) = \int_0^t h(t, \tau) x(t - \tau) d\tau$$

où : $h(t, \tau)$ est la réponse à l'instant t à une impulsion radioélectrique $x(t)$ que l'on aurait émise à l'instant $t - \tau$. Elle définit totalement le canal de propagation. Elle permet de distinguer les différents échos en fonction de leurs retards de propagation.

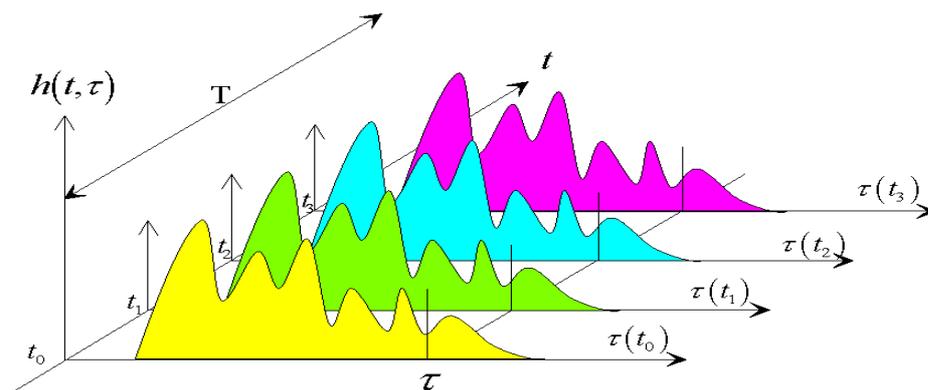


Figure 3 : Représentation schématique de l'évolution temporelle de la réponse impulsionnelle du canal de propagation [25].

3-1– Densité de puissance moyenne

On définit la densité de puissance moyenne $P(\tau)$ de la réponse impulsionnelle ("average delay profile") à partir de $h(t, \tau)$ par la relation :

$$P(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T |h(t, \tau)|^2 dt$$

Elle correspond à une moyenne sur une certaine durée τ choisie de telle sorte que les réponses impulsionnelles mesurées sont représentables par un processus aléatoire stationnaire et ergodique [94].

3-2– Le retard moyen

Le retard moyen est la moyenne des retards pondérés par leur puissance. Il est donné par le moment d'ordre un de la réponse impulsionnelle :

$$\tau_m(t) = \frac{1}{P_m} \int_{\tau_{LOS}}^{\tau_3} (\tau - \tau_{LOS}) P(\tau, t) d\tau$$

où :

τ_{LOS} est le temps de propagation en visibilité directe,

τ_3 est l'instant où $P(\tau)$ dépasse le seuil de coupure pour la dernière fois.

P_m est l'énergie totale de la réponse impulsionnelle, définie par la relation suivante :

$$P_m = \int_0^3 P(\tau) d\tau$$

où :

$P(\tau)$ est la densité de puissance de la réponse impulsionnelle,

τ_0 est le retard en excès,

τ_3 est l'instant où $P(\tau_3)$ dépasse le seuil de coupure pour la première fois

3-3– La dispersion des retards

La dispersion des retards ou écart-type des retards pondérés par leur puissance est donnée par le second moment de la réponse impulsionnelle :

$$Disp_retard(t) = \sqrt{\frac{1}{P_m} \int_0^3 \tau^2 P(\tau) d\tau - \left[\frac{1}{P_m} \int_0^3 \tau P(\tau) d\tau \right]^2}$$

La dispersion des retards illustre le risque d'apparition d'interférences inter-symboles et les effets perturbateurs que les échos lointains et puissants sont susceptibles d'engendrer.

3-4– L'intervalle des retards

L'intervalle des retards à X dB est défini comme l'intervalle de temps entre l'instant τ_0 où l'amplitude de la réponse impulsionnelle dépasse pour la première fois un seuil donné et l'instant τ_3 où cette amplitude devient pour la dernière fois inférieure à ce seuil.

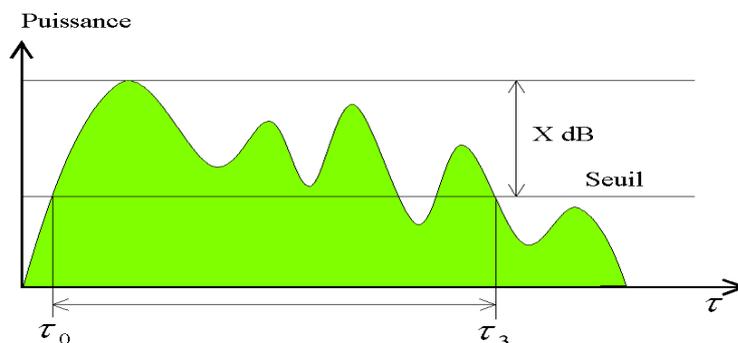


Figure 4 : Exemple de profil de retard de puissance ; mise en évidence de l'intervalle des retards à X dB [66].

3-5– La fenêtre des retards

La fenêtre des retards à $y\%$ est la durée de la portion centrale $\tau_1 - \tau_2$ de la réponse impulsionnelle qui contient $y\%$ de l'énergie totale. Les instants τ_1 et τ_2 sont définis par la relation :

$$\int_{\tau_1}^{\tau_2} P(\tau) d\tau = \frac{y}{100} \int_0^{\infty} P(\tau) d\tau = \frac{y}{100} P_m$$

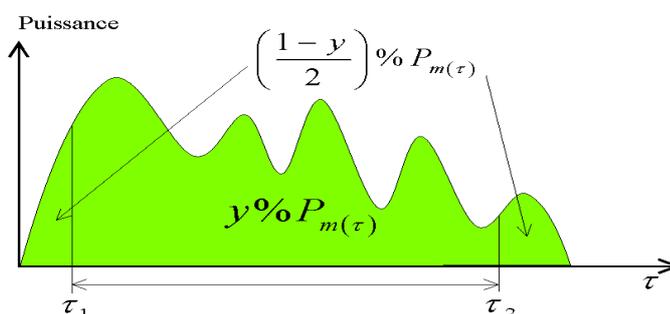


Figure 5 : Exemple de profil de retard de puissance ; mise en évidence de la fenêtre des retards à $y\%$ [66].

3-6– La bande de cohérence

La bande de cohérence (B-cohérence) du canal est définie de la façon suivante. Soit $C(t,f)$ l'autocorrélation de la fonction de transfert (Transformée de Fourier de la puissance de la réponse impulsionnelle).

$$C(t, f) = \int_0^{\infty} P(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau$$

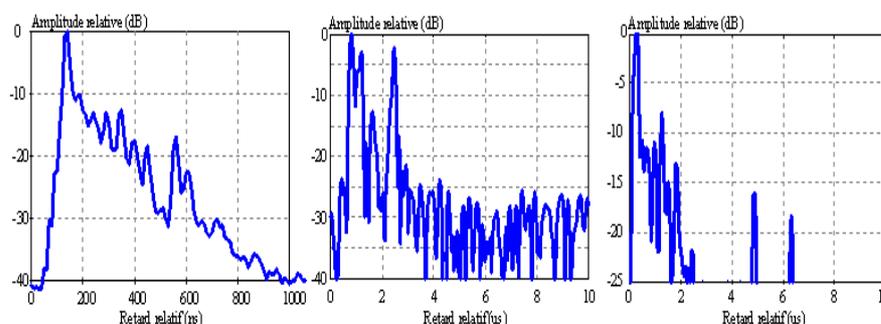
La largeur de bande de corrélation est définie comme la fréquence pour laquelle $|C(t,f)|$ est égale à $x\%$ de $C(t,f=0)$ [29]. Elle indique l'amplitude de l'affaiblissement sélectif en fonction de la séparation en fréquence. La bande de corrélation est donc la fréquence à partir de laquelle la fonction d'autocorrélation de la fonction de transfert franchit un seuil donné.

Pour l'analyse des données expérimentales, l'UIT-R recommande d'utiliser des intervalles des retards pour des seuils de 9, 12 et 15 dB en dessous de la valeur crête, des fenêtres des retards pour 50%, 75% et 90% de l'énergie et une largeur de bande de corrélation pour 50% et 90% de corrélation.

La bande de corrélation est reliée à la dispersion des retards par la relation suivante [95] :

$$B_{\text{cohérence}} \cdot \text{Disp_retard} = \frac{1}{2}$$

Le canal de propagation est plus ou moins sélectif selon l'environnement dans lequel on se trouve. La forme de la réponse impulsionnelle est également différente selon l'environnement. Sur la réponse impulsionnelle en intérieur des bâtiments, la décroissance de la puissance en fonction des retards est exponentielle alors qu'en petite et micro cellule des trajets à des retards importants se distinguent très nettement. On notera, sur la figure 6, que les échelles de temps ne sont pas les mêmes pour l'environnement intérieur des bâtiments et pour les environnements micro et petite cellule.



De gauche à droite : en intérieur des bâtiments, petite-cellule et micro cellule.

Figure 6 : Exemples de réponses impulsionnelles mesurées dans différents environnements [25]