



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Republique Algerienne Democratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة العربي التبسي - تبسة
Université Larbi Tébessi – Tébessa –
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **Master Académique**

En : Réseaux et Télécommunications

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Par : ABDELLATIF Belgacem.

MERZOUGUI Issam.

Sujet

OPTIMISATION DE MODELE DE PROPAGATION DE LA COUVERTURE DU RESEAU LTE

Présenté et soutenu publiquement, le 14 / 06 / 2021, devant le jury composé de :

M. MEROUMIA Abdellah	MCA	Président
Mme. BOUCHEMHA Amel	MCA	Rapporteur
M. BENTAHAR Tarek	MCB	Examineur

Promotion : 2020/2021

Remerciements

Notre mémoire était une expérience bien plus importante que tous les projets que nous avons réalisés jusqu'à présent. Le fait de voir ce projet se transformer en un accomplissement n'aurait jamais été possible sans le soutien de nombreuses personnes.

Tous les louanges sont dues Au Seigneur ALLAH le tout puissant pour nous avoir donné la patience et le courage de surmonter tous les obstacles auxquels nous avons fait face au cours de réaliser ce travail.

Nous tenons à exprimer notre sincère gratitude à notre encadreur et mentor, Madame **BOUCHEMHA Amel**, qui nous a guidé, encouragé, soutenus et qui a accepté rien de moins que nos meilleurs efforts. C'était un honneur pour nous d'avoir la chance de travailler avec vous.

Nous remercions profondément Madame **DJELLAB Hanane** pour avoir partagé ses connaissances et son expérience dans ce domaine avec nous, et pour avoir été d'un grand soutien dans l'élaboration de cette thèse.

Nous exprimons aussi notre reconnaissance à nos **enseignants** de l'université de Larbi Tébessa – Tébessa ont si bien mené leur noble métier d'enseignement et qui ont déployé leurs efforts pour assurer une formation aussi complète, pour aider et soutenir toute la promotion le long du cycle.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail qui est le fruit de plusieurs années d'étude:

A mon cher père, l'épaule solide, l'œil attentif, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger.

A ma mère, qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite,

Mes chers parents, tous ce que je peux vous offrir ne pourra exprimer l'amour et le respect que je vous porte. Aucune dédicace ne saurait exprimer mes sentiments, que dieu vous préserve et vous procure santé et longue vie.

En témoignage, je vous offre ce modeste travail pour vous remercier pour tes sacrifices, et pour l'affection dont vous m'avez toujours entourée.

A ma chère sœur Sarra, Aucun langage ne saurait exprimer mon respect et ma considération pour votre soutien et encouragements.

A mes chers, Taki et Sirine.

A mes grandes mères.

A mes oncles Salim et Noureddine.

A toute ma famille.

A mon binôme et chère ami ABDELLATIF Belgacem qui me participe pour faire un bon mémoire.

A mes très chers amis Khaled, Med Ali, Mouaad, Sid Ahmed et Amjed.

A toute la classe de master 2 Réseaux et Télécommunications.

Issam.

لم يتوقف تطوير الهواتف المحمولة أبدًا منذ ظهوره الأول للتشابه حتى الانتقال تدريجيًا إلى شبكات الجيل الرابع "Full-IP" (4G). تتم عملية انتشار التغطية وفقًا لنماذج تجريبية تسمح بدراسة أداء الشبكة من حيث فقدان الإشارة. تتمتع هذه الطرازات بالقدرة على أن تكون قابلة للترقية لجعلها مناسبة للاستخدام في جميع المناطق. يقدم هذا العمل دراسة مقارنة لطريقة تحسين عن طريق خوارزمية أسراب الطيور (PSO) لنماذج الانتشار، والأدوات الأساسية لتخطيط الراديو والتحسين في شبكات المحمول. الهدف الرئيسي هو تحسين نماذج الانتشار من أجل ضمان جودة الوصول للجميع، بغية الاستفادة من خدمات الراديو المحمول وهذا عبر شبكة G/LTE4، تم عرض نمذجة المشكلة ونتائج التنفيذ من خلال القياسات اللاسلكية التي أجريت في مدينة تبسة بالجزائر. وقد تم التحقق من أن نماذج الانتشار المدروسة التي تنبأ بها نهج PSO تسمح جميعها بالحصول على نماذج محسنة وموثوقة تسمح بالتنبؤ بدقة الانتشار في بيئة التردد اللاسلكي.

الكلمات المفتاحية:

تحسين، شبكة الجيل الرابع 4G/LTE، تغطية الشبكة، نماذج الانتشار، خوارزمية أسراب الطيور PSO.

Résumé

La téléphonie mobile n'a jamais arrêté de se développer depuis ses premières apparitions de l'analogie jusqu'à arriver progressivement à passer aux réseaux « tout-IP » de la quatrième génération (4G). L'opération de propagation de la couverture se réalise selon des modèles empiriques qui permettent l'étude de performance de réseaux en termes d'affaiblissement trajectoire. Ces modèles ont l'aptitude à être améliorable pour les rendre adéquats pour les utiliser dans toutes les milieux. Le présent travail présente une étude comparative de la méthode d'optimisation PSO (Particule Swarm Optimization : Essaim de particules), de modèles de propagation et les outils essentiels pour la planification et l'optimisation radio dans les réseaux mobiles. Le but essentiel est l'optimisation les modèles de propagation pour garantir une qualité d'accès pour tous aux services radio mobiles via le service 4G/LTE. La modélisation du problème et les résultats de l'implémentation au travers des mesures radio faites dans la ville de Tebessa, Algérie, ont été présentés. Il a été vérifié que les modèles de propagation étudiés prédits par l'approche de PSO permettent tous d'avoir des modèles optimisés fiables et permettant de prédire avec précision la propagation en environnement RF.

Les mots Clés :

Optimisation, 4G/LTE, Couverture réseau, Modèle de propagation, Affaiblissement, PSO

Abstract

The development of mobile telephony has never stopped since its first appearance of the analogy until gradually moving to fourth generation "all-IP" networks (4G). The coverage propagation operation is carried out according to empirical models which allow the study of network performance in terms of path loss. These models have the ability to be upgradeable to make them suitable for use in all settings. This work presents a comparative study of the PSO (Particle Swarm Optimization) optimization method of propagation models; essential tools for radio planning and optimization in mobile networks. The main goal is to optimize the propagation models to guarantee a quality of access for all to mobile radio services via the 4G / LTE service. The modeling of the problem and the results of the implementation through radio measurements made in the city of Tebessa, Algeria, were presented. It has been verified that the studied propagation models predicted by the PSO approach all allow having reliable optimized models allowing to accurately predict the propagation in RF environment.

Key-Words:

Optimization, 4G/LTE, Network coverage, Propagation model, PathLoss, PSO

Table des matières

Remerciements

Dédicaces

Résumé.....	I
Liste des figures.....	VI
Liste des Tableaux.....	VIII
Liste des Abréviations.....	IX
Introduction générale.....	1

I. Généralité et Etat de l'art de	1
I.1 Introduction	3
I.2 Objectif de la 4G/LTE [1]	4
I.3 Les caractéristiques de la norme 4G/LTE [3]	4
I.4 Architecture du système LTE [4].....	5
I.4.1 Equipement Utilisateur (UE) : Éléments du réseau LTE	6
I.4.2 Réseau d'accès E-UTRAN	7
I.4.2.1 eNodeB.....	7
I.4.2.2 Les interfaces	8
I.4.3 Le cœur de réseau l'EPC (Evolved Packet Core) tout IP	9
I.5 Principes de fonctionnement de l'interface radio LTE (Protocole et couche MAC).....	10
I.5.1 Les Canaux LTE [5].....	10
I.5.2 La couche MAC (Medium Access Control) [5].....	11
I.6 Allocation de bandes de Fréquences [6]	12
I.6.1 Attribution des bandes de duplex à répartition de fréquence (FDD)	12
I.6.2 Bandes TDD (Time Division Duplex).....	13
I.7 La modulation	13
I.7.1 La modulation 16-QAM.....	14
I.7.2 La modulation 64-QAM.....	15
I.7.3 La modulation QPSK.....	15
I.8 Les différentes techniques d'accès LTE	15
I.8.1 Time Division Multiple Access (TDMA)	16
I.8.2 Frequency Division Multiple Access (FDMA)	16
I.8.3 Code Division Multiple Access (CDMA).....	16
I.8.4 Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM)	17
I.8.5 Orthogonal Frequency-Division Multiplexing Access (OFDMA).....	18
I.8.6 Single Carrier – Frequency Division Multiple (SF-FDMA).....	18

I.9	LTE MIMO (Multiple Input Multiple Output).....	19
I.10	Le Handover dans LTE.....	19
I.11	Bilan de liaison	20
I.11.1	Paramètres du bilan de liaison	21
I.11.2	Calcul du bilan de liaison pour les liens montant et descendant	22
I.12	Modèles de propagation.....	24
I.12.1	Introduction et définition d'un modèle de propagation	24
I.12.2	Propagation en espace libre (Free Space)	25
I.12.3	Catégories des modèles de propagation	25
I.12.3.1	Modèle Macro-cellule	26
I.12.3.2	Modèle Micro-cellule	26
I.12.4	Différents types de Modèles de propagation RF	26
I.12.4.1	Les modèles empiriques.....	26
I.12.4.2	Les modèles déterministes	27
I.12.5	Les Modèles de propagation RF	27
I.12.5.1	Les modèles pour les grandes cellules (Macro-Cells).....	28
I.12.5.1.1	Modèle de Hata	28
I.12.5.1.2	Modèle Okumura-Hata.....	28
I.12.5.1.3	Modèle de COST231-Hata.....	29
I.12.5.1.4	Modèle d'Egli	29
I.12.5.1.5	Le Modèle SUI	29
I.12.5.1.6	Ericsson 9999	31
I.12.5.2	Les modèles pour les petites cellules (micro-cells)	31
I.12.5.2.1	Le modèle de LEE	31
I.12.5.2.2	Le modèle COST-CNET	32
I.12.	Conclusion	33
II.	Optimisation du modèle de propagation RF.....	35
II.1	Introduction.....	36
II.2	Principe de fonctionnement de l'optimisation d'Essaim de Particules (Particul Swarm Optimization : PSO)	37
II.2.1	Définition de l'optimisation et de la fonction objective	37
II.2.2	Motivation de l'utilisation de l'algorithme P.S.O	37
II.2.3	Les éléments de l'algorithme P.S.O [26]	39
II.2.4	Définition de la position et de la vitesse courante associée à une particule	39
II.3	Conception et déroulement de l'algorithme	42
II.3.1	Conception de l'algorithme	42
II.3.2	Déroulement de l'algorithme PSO	43
II.3.3	Inconvénient de l'algorithme PSO [26]	44

II.4	Application de l’algorithme PSO à l’optimisation des modèles empiriques de propagation	
	OKUMURRA-HATTA et SUI.....	45
II.4.1	Les données et l'analyse de l'affaiblissement.....	45
II.4.2	Algorithme PSO appliqué au modèle.....	46
II.5	Conclusion.	48
III.	RESULTATS.....	49
III.1	Introduction.....	50
III.2	Résultats et Interprétations.....	51
III.2.1	Résultat de Chapitre I : Résultats et interprétation de la simulation de Pathloss pour les différents modèles RF.....	51
III.2.1.1	Résultats de simulation pour le modèle empirique Okumura-Hata.....	51
III.2.1.2	Résultats de simulation des modèles empiriques SUI et Ericsson.....	53
III.2.2	Résultats de Chapitre II : Optimisation des paramètres des modèles empiriques avec PSO.....	58
III.2.2.1	Résultats d’optimisation de modèle Okumura-Hata avec PSO dans un milieu urbain.....	58
III.2.2.2	Résultats d’optimisation de modèle SUI avec l’algorithme PSO dans un milieu urbain.....	61
III.2.3	Optimisation de modèle empirique expérimentale de la région de Tébessa.....	62
III.2.3.1	Résultats et discussion de l’optimisation des modèles RF par PSO avec les mesures réelles.....	63
III.3	Conclusion.....	65
	Conclusion générale.....	65

Liste des figures

Figure I.1 : Architecture générale du réseau LTE [4]	6
Figure I.2 : Architecture de l'accès radio (e-UTRAN) d'un réseau LTE [4]	7
Figure I.3 : Vue d'ensemble de l'architecture de l'E-UTRAN	8
Figure I.4 : Architecture générale du LTE avec son cœur EPC [4].	10
Figure I.5 : Association entre les canaux logiques, de transport et physique, (a) : voie montante, (b) : voie descendante [5].....	11
Figure I.6 : Les canaux de l'interface radio LTE et leurs imbrications. [5]	12
Figure I.7 : Modulation Adaptative.	14
Figure I.8 : la modulation QPSK (2 bits / symbole) ; 16 QAM (4bits/symbole) et 64 QAM (6 bits / symbole) [11].	15
Figure I.9 : Schéma du principe du modulateur QPSK [13]	15
Figure I.10 : (a) Principe du TDMA ; (b) Principe du FDMA et (c). Principe du CDMA. [14].....	16
Figure I.11 : Modulation OFDM.	17
Figure I.12 : Préfixe Cyclique.....	17
Figure I.13 : La différence entre OFDMA et SC-FDMA [11]	18
Figure I.14 : (a) Principe de la technologie MIMO. [1-20], (b) Schéma représentatif des systèmes SISO, SIMO, MISO, et MIMO.....	19
Figure I.15 : Modèle de bilan de liaison montante. [11].....	23
Figure I.16 : Modèle de bilan de liaison descendante. [11].....	24
Figure I.17 : structure hiérarchique de cellules	25
Figure I.18 : Plan de travail des modèles empiriques.....	27
Figure I.19 : Détermination des différentes hauteurs équivalentes de l'antenne d'émission.	32
Figure I.20 : Profil E-R considéré par le modèle COST-CENT.	33
Figure II.1 : Essais des oiseaux en vol.....	36
Figure II.2 : PSO - schéma de principe du déplacement d'une particule	38
Figure II.3 : Différents topologies pour un essaim des particules	39
Figure II.4 : (a) schéma de principe du déplacement d'une particule, (b) schéma vectorielle du déplacement	42
Figure II.5 : Organigramme générale de l'algorithme PSO.....	43
Figure II.6 : Organigramme de processus d'optimisation	47
Figure III.1 : Simulation de l'affaiblissement pour le modèle Okumura-Hata à 2100	52
Figure III.2 : Simulation de l'affaiblissement pour le modèle Okumura-Hata à 1800	52
Figure III.3 : Influence de la variation de la plage de fréquence sur l'affaiblissement pour le modèle Okumura-Hata	53
Figure III.4 : Simulation de l'affaiblissement pour le modèle SUI à 2100.....	54
Figure III.5 : Simulation de l'affaiblissement pour le modèle SUI à 1800.....	54
Figure III.6 : Influence de la variation de la plage de fréquence sur l'affaiblissement pour le modèle SUI.....	55
Figure III.7 : Simulation de l'affaiblissement pour le modèle Ericsson à 1800 et 2100	55
Figure III.8 : Influence de la variation de la plage de fréquence sur l'affaiblissement pour le modèle Ericsson	56
Figure III.9 : comparaisons entre le modèle Okumura-Hata et les résultats d'optimisation avec 5 itérations	59
Figure III.10 : comparaisons entre le modèle Okumura-Hata et les résultats d'optimisation avec 100 itérations	60
Figure III.11 : Comparaison entre le modèle Okumura-Hata et les meilleures optimisations.....	61
Figure III.12 : comparaison entre le modèle SUI et le modèle SUI optimisé.....	62
Figure III.13 : La localisation de l'eNodeB N° 12668 - Google Earth	63
Figure III.14 : comparaison des modèles Okumura-Hata et sui avec les données réelles mesurées.....	64
Figure III.15 : comparaison des modèles okumura-hata et sui optimisées avec les données réelles mesurées.....	65

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Les bandes de fréquences du LTE [5].....	13
Tableau I.2 : Les bandes de fréquences allouées au LTE TDD [5].....	13
Tableau I.3 : Bilan de liaison montante [11].....	23
Tableau I.4 : Bilan de liaison descendante [11].....	24
Tableau I.5 : Différentes terrains et leurs paramètres.....	30
Tableau I.6 : les Valeurs de k_n en fonction des environnements.....	31
Tableau I.7 : Paramètres du modèle de Lee.....	31
Tableau III.1 : Analyse comparative de modèles de propagation RF (Environnement Urbain, Suburbain et Rural).....	57
Tableau III.2 : Résultats obtenus pour l'optimisation Okumura-Hata par PSO (Iter=5 et N variables).....	58
Tableau III.3 : Résultats obtenus pour l'optimisation Okumura-Hata par PSO (Iter=100 et N variables).....	59
Tableau III.4 : Etude comparative de l'optimisation du modèle de propagation avec PSO.....	60
Tableau III.5 : Résumé et comparaison des résultats d'optimisation des modèles Okumura-Hata et SUI.....	62
Tableau III.6 : Les spécifications de site étudié.....	63
Tableau III.7 : Erreur quadratique moyenne entre les modèles empiriques et les mesures réelles.....	64
Tableau III.8 : Résultats de l'optimisation par PSO des mesures réelles par rapport aux modèles empirique Okumura-Hata et SUI.....	64

Abréviation

3GGP : Third Generation Partnership Project

4G : Quatrième Génération

A

AAS : Adaptive Antenna Systems
Access

AES : Advanced Encryption Standard

AMC : adaptive modulation coding

B

BS : Base Station

BTS : Base transceiver station

C

CDMA : Code Division Multiple Access

CENT : Centre National d'Etude des
Télécommunications

CP : Clinical Prefix

CS : Circuit Switched

D

DECT : Digital enhanced cordless
telecommunications.

E

eNodeB : Evolved Node B

EPC : Evolved Packet Core

F

FDD : Frequency Division Duplexing

FDMA : Frequency Division Multiple Access

FTR&D : France Télécom R&D

G

GSM : Global System for Mobile

H

HARQ : Hybrid automatic repeat request

HLR : Home Local Register

HOR : Handover Request

HSPA : High Speed Packet Access

HSS : Home Subscriber Server

I

IEEE : Institute of Electrical and Electronics
Engineers

IMS : IP Multimedia Sub-system

IMSI : International Mobile Subscriber Identity

IP : Internet Protocol

L

LTE : Long Term Evolution

M

MAC : Medium Access Control

MAPL : Maximum Allowable Power Losses

MCC : mobile country code

ME : Mobile Equipment

MIMO : Multiple Input Multiple Output

MISN : Mobile Subscriber Identification Number

MISO : Multiple Input Single Output

MME : Mobility Management Entity

MNC : Mobile Network Code

MSE : Mean Square Error

N

NGN : Next Generation Network

NLOS : Non-Line Of Sight

O

OFDM : Orthogonal Frequency Division
Multiplexing.

OFDMA : Frequency Division Multiple

OSI : Open Radio Link Control

P

PCEF : Policy and Charging Enforcing Function

PCRF : Policy and Charging Rules Function

PDCCH : physical downlink control channel

PDN : Packet Data Network

PDN-GW : Packet Data Network Gateway

PDP : Packet Data Protocol

PDSCH : Physical Downlink Shared Channel

PIRE : Puissance isotrope rayonnée équivalente

PRACH : Physical Random-Access Channel

PS : Packet Switched

PSO : Particle Swarm Optimization

Q

QAM : Quadrature Amplitude Modulation

QPSK : Quadrature Phase Shift Keying

R

RAN : Radio access network

RF : Radio Frequency

RLC : Radio Link Control

RRC : Radio Resource Control

RRM : Radio Resource Management

RRU : Remote Radio Unit

S

SC-OFDMA : Single Carrier Frequency Division
Multiple Access

SGSN : Serving GPRS Support Node

S-GW : Serving Gateway

SIM : Subscriber Identity Module

SIMO : Single Input Multiple Output

SINR : Signal to Interference Ratio

SISO : Single Input Single output

SUI : Stanford University Interim

T

TDD : Time Division Duplexing

TDMA : Time Division Multiple Access

U

UE : User Equipment

UMTS : Universal Mobile Telecommunications
System

V

VHF : Very High Frequency

W

Wi-Fi : Wireless Fidelity

WiMAX : Worldwide Interoperability for
Microwave Access.

X

xDSL : Digital subscriber line

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction Générale

Le besoin de connectivité en tout lieu, ajouté à la croissance continue du nombre d'utilisateurs, a déclenché le déploiement et le développement successive de plusieurs générations de normes de communication mobile au cours des dernières décennies (1G, 2G, 3G, 4G, 5G) ; pour l'augmentation du débit afin d'atteindre la satisfaction des utilisateurs. Cela nécessite les opérateurs mobiles de faire une bonne planification et dimensionnement de la couverture de leur réseau l'aide des outils de planification, en intégrant notamment des modèles de propagation des ondes radio et des algorithmes d'optimisation du paramétrage. Afin de minimiser les coûts et améliorer la qualité du service au maximum. Pour cela on s'appuie sur les modèles de propagation pour le but d'améliorer la qualité (couverture, transmission) des réseaux mobiles. Ces modèles peuvent être classés en trois catégories : empirique, semi-empirique et déterministe. Le calcul de l'affaiblissement sur le trajet des modèles de propagation des radiofréquences (RF) pour le réseau 4G à évolution à long terme (LTE) permet de choisir le meilleur modèle de propagation des radiofréquences. Les modèles de propagation radio sont très importants lors de la planification de tout système de communication sans fil.

Dans notre travail, une analyse comparative entre les modèles de propagation radio, par ex. Modèle SUI, modèle Okumura-Hata et Ericsson 9999 qui sera utilisée pour la propagation en LTE. Le modèle de propagation radio décrit le comportement du signal lorsqu'il est transmis de l'émetteur vers le récepteur. Il donne une relation à la distance entre l'émetteur et le récepteur et l'affaiblissement sur le trajet. A partir de la relation mathématique, on peut se faire une idée de l'affaiblissement de trajet acceptable et de la portée maximale des cellules. L'affaiblissement dépend de différents terrains et environnements (urbain, rural, urbain dense, suburbain, ouvert, forêt, mer, etc.), de la situation atmosphérique et de la distance entre l'émetteur et le récepteur. Pour adapter un modèle de propagation à une région, il existe plusieurs méthodes d'optimisation et d'algorithmes méta-heuristiques qui permettent d'approximer le modèle en minimisant l'erreur quadratique moyenne entre le modèle estimé et les mesures expérimentales réelles.

L'objectif de notre travail est de décrire le développement d'un modèle optimisé le plus approprié à la zone de couverture urbaine dans le réseau d'évolution à long terme (LTE) dans la bande de fréquence 1800 MHz dans la région urbaine de la cité du 1er novembre de la wilaya de Tébessa, Algérie.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous allons présenter les généralités et l'état de l'art de réseau 4G/LTE, tout en précisant les différents modèles empiriques de propagation utilisés et leurs formules mathématiques.
- Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude du principe de fonctionnement de l'Optimisation d'Essaim de Particules, ainsi que la conception et le déroulement de l'algorithme PSO. Ensuite, l'algorithme d'optimisation des modèles de propagation empiriques OKUMURA-HATA et SUI sera basé sur les calculs évolutifs qui dépendent de l'intelligence de l'essaim.
- Le troisième sera consacré à l'implémentation et l'étude expérimentale et comparative des modèles empiriques optimisés en utilisant l'algorithme PSO.

Enfin, nous terminerons par une conclusion générale.

CHAPITRE

01

I. Généralité et Etat de l'art de

Réseau 4G/LTE

I.1 Introduction

Les réseaux mobiles sont en constante évolution, où ces dernières années ont vu l'émergence de plusieurs générations (1G, 2G, 3G, 4G et la 5G), les nouvelles générations à un débit exceptionnel qui ne cesse d'augmenter et une bande passante de plus en plus large ce qui augmente le nombre d'utilisateurs pouvant être supportés.

Le réseau sans fil de quatrième génération (4G) se caractérise par une mobilité plus élevée, des services diversifiés et des débits plus élevés. Il offre des débits théoriques de 100 Mbps pour une mobilité forte et jusqu'à 1 Gbps pour une faible mobilité.

Les principales normes 4G sont le LTE (Long Term Evolution) et le WiMAX. Le LTE a été développé par le groupe 3GPP (Third Generation Partnership Project) et constitue une extension du HSPA (High Speed Packet Access). Les réseaux mobiles 4G utilisent les technologies MIMO (Multiple Input Multiple Output), OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), AAS (Adaptive Antenna Systems), AMS (Adaptive Modulation Schemes), AES (Advanced Encryption Standard) et IP (Internet Protocol). Ces technologies leur permettent d'atteindre des débits de plusieurs dizaines de Mbps et introduisent les principales fonctionnalités nécessaires pour permettre la mobilité à de très grandes vitesses.

Dans ce chapitre, nous allons présenter une étude approfondie sur les réseaux LTE, ses spécifications techniques, ses concepts de base et les calculs mathématiques nécessaires à l'étude du réseau 4G sur le plan couverture tout en précisant les différents modèles empiriques de propagation utilisés.

I.2 Objectif de la 4G/LTE [1]

Les opérateurs se battent actuellement sur le déploiement de la « 4G », cette fameuse technologie qui devrait leur permettre de se différencier par la qualité de leur réseau. La 4G vise à améliorer l'efficacité spectrale et à augmenter la capacité de gestion du nombre de mobiles dans une même cellule. Elle tente aussi d'offrir de meilleurs débits aux usagers en établissant l'interopérabilité entre différentes technologies existantes [2]. Elle permet aussi de rendre le passage entre les réseaux transparent pour l'utilisateur, à éviter l'interruption des services durant le transfert intercellulaire, et à basculer l'utilisation vers le tout-IP.

La 4G vise à améliorer la capacité de gestion du nombre de mobiles dans une même cellule. Elle tente aussi d'offrir des débits élevés en situation de mobilité et à offrir une mobilité entre totale à l'utilisateur en établissant.

Les principaux objectifs visés par les réseaux de 4G sont les suivants :

- Réduire les délais et le trafic de signalisation.
- Fournir une meilleure qualité de service.
- Optimiser l'utilisation des ressources.
- Réduire le délai de relève, le délai de bout-en-bout, la perte de paquets.
- Minimiser le cout de signalisation.
- Assurer la continuité de la session en cours.

I.3 Les caractéristiques de la norme 4G/LTE [3]

Plusieurs raisons ont poussé le groupe 3GPP à élaborer la norme LTE (Long Term Evolution) parmi lesquelles on peut citer :

- La demande croissante de débit et de qualité de service.
- La nécessité d'assurer la continuité de la compétitivité du système 3G vis-à-vis des technologies concurrentes (WiMAX).
- L'optimisation des systèmes à commutation de paquets.
- La réduction de la complexité.

Les caractéristiques principales de la norme LTE sont :

- **Débit sur l'interface radio** : L'interface radio E-UTRAN doit pouvoir supporter un débit maximum descendant instantané (du réseau au terminal) de 100 Mbit/s toute en considérant une allocation de bande de fréquence de 20 MHz pour le sens descendant, et un débit maximum montant instantané (du terminal au réseau) de 50 Mbit/s en considérant aussi une allocation de bande de fréquence de 20 MHz.

- **Flexibilité de la bande passante** : Possible d'opérer avec une bande de taille différente avec les possibilités suivantes : 1.25, 2.5, 5, 10, 15 et 20 MHz, pour les sens descendants et montant. L'intention est de permettre un déploiement flexible en fonction des besoins des opérateurs et des services
- **Efficacité du spectre Méthode de duplexage** : LTE utilise une efficacité du spectre de 5bit/s/Hz pour le sens descendant, et 2,5 bit/s/Hz pour le sens montant.
- **Méthode de duplexage** : LTE utilise le Frequency Division duplexing (FDD) et le Time Division Duplexing (TDD).
- **Technologies d'accès** : Pour offrir des débits élevés le LTE utilise la technologie Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) pour le Sens descendant et Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA) et pour le Sens montant.
- **Orthogonalité du DownLink et UpLink** : La liaison montante et la liaison descendante des utilisateurs sont orthogonales entre elles (pas d'interférence intracellulaire).
- **Coexistence et Interfonctionnement avec la 3G** : Le handover entre E-UTRAN (LTE) et UTRAN (3G) doit être réalisé en moins de 300 ms pour les services temps-réel et 500 ms pour les services non temps-réel. Donc, Le LTE prend en charge l'interconnexion et l'interopérabilité avec les normes 2G et 3G, et les réseaux CDMA-2000. Contrairement à la 3G qui nécessite d'allouer une bande de fréquence de 5 MHz.
- **Mobilité** : La mobilité est assurée à des vitesses comprises entre 120et 350 km/h. Le handover pourra s'effectuer dans des conditions où l'utilisateur se déplace à grande vitesse.
- **Technologie d'antenne** : LTE utilise la technologie d'antenne Multiple Input Multiple Output (MIMO)
- **Support du multicast** : Notamment pour les applications multimédia

1.4 Architecture du système LTE [4]

L'architecture du système LTE est basée sur l'IP (Internet Protocol) et est donc conçue pour prendre en charge efficacement la transmission par paquets. L'infrastructure d'un réseau cellulaire LTE comprend l'interface radio E-UTRA / E-UTRAN et le réseau cœur : **Evolved Packet Core (EPC)**, qui comprend les passerelles, la gestion de la mobilité et les bases de données d'abonnés. L'interface radio et le réseau cœur permettent à l'utilisateur mobile LTE de se connecter à des réseaux de données externes tels que l'Internet. Contrairement aux réseaux 2G et 3G, qui séparent les réseaux voix et données, tous les médias sont transmis sous forme de paquets IP dans un réseau LTE. La station de base LTE (Evolved Node B) se connecte à l'EPC via le Serving Gateway (S-GW), et l'EPC se connecte au réseau de paquets via la passerelle de réseau de données par paquets (PDN-GW).

L'entité de gestion de la mobilité (MME) suit les mouvements de l'utilisateur, tandis que la base de données du serveur d'abonné domestique (HSS) fournit des informations sur les abonnés similaires au registre d'emplacement domestique (HLR) dans les réseaux 3G / UMTS.

La (Erreur ! Source du renvoi introuvable. représente l'architecture générale du réseau LTE :

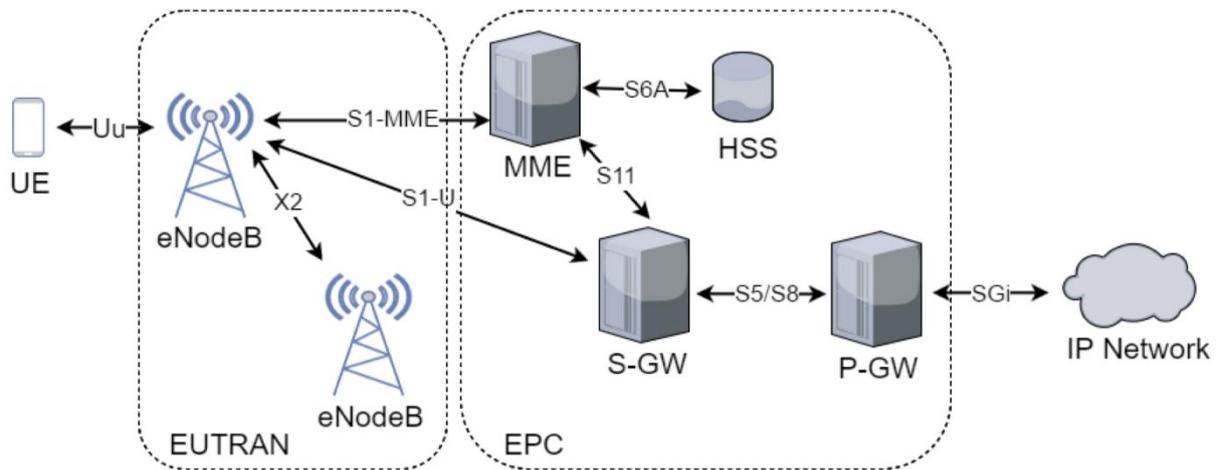


Figure I.1 : Architecture générale du réseau LTE [4]

Comme tous les réseaux pour mobiles, celui de la 4G LTE se compose de trois parties comme le montre la (Figure I.1) :

- **L'UE:** Les équipements mobiles (smartphone, tablette, laptop) qui doivent être compatibles au réseau 4G.
- **L'accès radio eUTRAN** (evolved Universal Terrestrial Radio Access Network), qui contient que des **eNodeB** qui assurent l'échange radio avec l'E-UTRAN.
- **Le cœur de réseau l'EPC** (Evolved Packet Core) tout IP

I.4.1 Equipement Utilisateur (UE) : Éléments du réseau LTE

C'est un équipement de téléphonie mobile cellulaire qui est compatible avec la technologie LTE et qui peut travailler sur le domaine IP. Ce terminal est authentifié et autorisé à accéder au réseau mobile de l'opérateur. L'UE se connecte par liaison radio aux stations de bases eNodeB, il assure l'établissement de la connexion avec le réseau mobile la reconfiguration et la continuité de service en mobilité avec la mise en œuvre des protocoles et mécanismes propres à cette technologie mobile. Le User Equipment est l'association de deux éléments qui sont :

- Le terminal mobile : (En anglais Mobile Equipment ME), il s'agit d'un téléphone mobile, d'un smartphone, d'une tablette tactile, d'un routeur 4G ou d'un ordinateur portable équipé d'une clé 4G.

- La carte SIM : (subscriber identification module) représentant l'abonnement souscrit et qui contient les paramètres clés le concernant. La carte SIM contient le numéro d'identification de l'abonné (IMSI), constitué du code pays (MCC), de l'identifiant de l'opérateur (MNC), et de l'identifiant de l'abonné (MSIN).

I.4.2 Réseau d'accès E-UTRAN

Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) désigne la partie radio de réseau mobile LTE qui permet d'assurer les communications radio entre les terminaux mobiles et le cœur de réseau LTE via une liaison radio VHF. Un EUTRAN est constitué d'antennes radio, de stations de base **eNodeB**, ainsi que des liaisons en fibre optique, cuivre ou portées par un faisceau hertzien raccordant ces équipements entre eux et avec le cœur de réseau. L'EUTRAN fait le transport de trafic (voix et données) en utilisant les protocoles IP via des bandes passantes attribuées ou vendues aux opérateurs mobiles par des autorités gouvernementales.

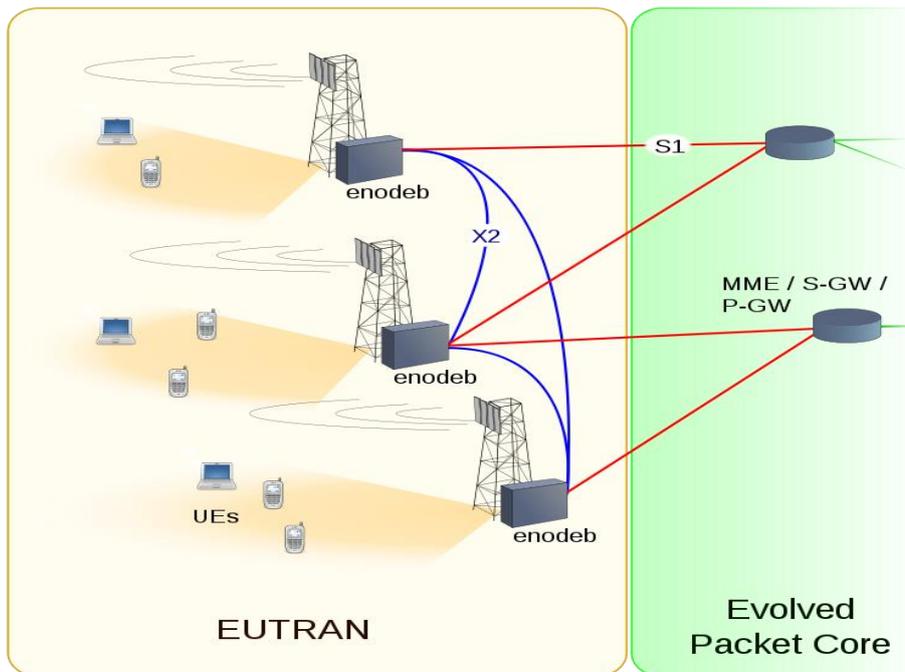


Figure I.2 : Architecture de l'accès radio (e-UTRAN) d'un réseau LTE [4]

I.4.2.1 eNodeB

Sont les stations de base des réseaux mobiles LTE. Équivalent du NodeB dans les réseaux UMTS. Elles constituent l'élément principal du réseau radio LTE. Les eNodeB sont des antennes fonctionnant comme une passerelle entre les UE et le réseau cœur du LTE via les RF air interface. Ils assurent la gestion des ressources radio, les fonctions de control radio et la mobilité intra - LTE (le Handover) pour le système d'accès évolué. Une station de base eNodeB peut gérer des cellules radio utilisant plusieurs bandes de fréquence sur différents secteurs. Un site radio a

généralement 3 secteurs, chacun couvrant un angle de 120°, et peut utiliser sur chaque secteur plusieurs bandes de fréquences. Un eNodeB gère en général un site d'antennes locales et un ou plusieurs sites distants.

1.4.2.2 Les interfaces

L'E-UTRAN fournit les informations générales sur les interfaces réseau S1 et X2. Ces deux interfaces sont montrées dans la (Figure I.3) suivante :

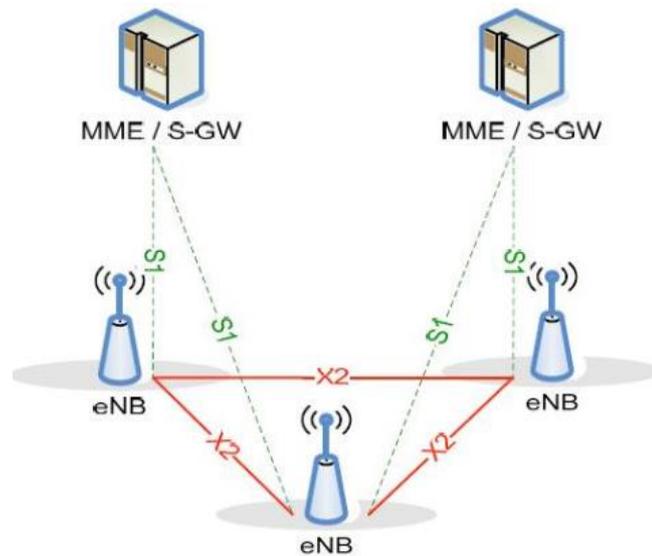


Figure I.3 : Vue d'ensemble de l'architecture de l'E-UTRAN

a. L'interface X2

X2 est une interface logique maillée, qui était définie dans le but de transporter les paquets entre les eNodeBs. Les échanges utilisant l'interface X2 incluent des informations de transfert, des rapports de mesure et de coordination des interférences, des mesures de charge, les configurations de eNodeB, la transmission des données utilisateur et de limiter les pertes de paquets durant le *Handover* ou la signalisation sans faire intervenir le réseau cœur. L'eNodeB est relié au cœur du réseau à travers l'interface S1.

b. L'interface S1

L'interface S1 c'est l'interface intermédiaire entre le réseau d'accès et le réseau cœur, est utilisée pour connecter le MME / S - GW et l'eNodeB. S1-U (S1-Usager) entre l'eNodeB ET le SGW. L'interface entre eNodeB et S-GW est appelée S1-U et est utilisée pour transférer données d'utilisateur. L'interface entre eNodeB et MME est appelée S1-MME et est utilisé pour transférer les informations du plan de contrôle. Un exemple de plan de contrôle : les informations comprennent la prise en charge de la mobilité, la pagination, la gestion des services de données, les services de localisation et la gestion du réseau.

I.4.3 Le cœur de réseau l'EPC (Evolved Packet Core) tout IP

Comparativement aux différents réseaux 2G et 3G qui utilisent les deux domaines de commutation de circuits CS (Circuit Switched) et de commutation de paquet, PS (Packet Switched), le réseau central (core network), opère avec un seul domaine de paquet appelé EPC (Evolved Packet Core), qui offre tous ces services en IP. L'évolution majeure de l'EPC est la séparation des plans contrôle et usage pour les équipements cœur. A l'image du NGN (Next Generation Network, évolution portée par la Release 4 3GPP) pour le circuit, les flux « contrôle » et « usage » ne seront plus, dans la plupart des cas, à destination des mêmes équipements. Les nouveaux éléments de la 4G (Figure I.4) :

- ❖ Le SGSN est séparé en deux entités fonctionnelles différentes : le MME (Mobile Management Entity) pour le plan « contrôle » et le Serving Gateway pour le plan « usage ».
 - Le MME va ainsi gérer les sessions (authentification, autorisations, session voix et donnée) et la mobilité (localisation, « paging », « hand-over »,...) du terminal.
 - La Serving Gateway sera responsable de l'acheminement des flux « utiles » dans le réseau cœur (les communications voix, le trafic data, etc.).
- ❖ Le GGSN quant à lui est remplacé par une PDN Gateway (Paquet Data Network Gateway). La PDN Gateway est responsable du lien avec les autres réseaux (publics ou privés), et notamment avec le monde Internet.
- ❖ Le HLR est remplacé par un HSS (Home Subscriber Server). Le HSS est responsable d'à peu près les mêmes fonctionnalités que le HLR (base des profils des abonnés, avec leurs droits et leurs caractéristiques). Le HSS inclut en plus un lien possible avec le monde IMS, pour la gestion des services de voix enrichis.
- ❖ Un nouvel élément du cœur de réseau 4G est le PCRF (Policy and Charging Rules Fonction), qui permet la gestion dynamique de la facturation et de Policy de qualité de service des flux (flux best effort, flux « premium » avec bande passante et latence garanties, tarification dynamique suivant le flux, etc.).
- ❖ Le PCEF (Policy and Charging Enforcing Function), module fonctionnel logé dans la PDN Gateway, applique les règles fixées par le PCRF. Enfin, l'IMS (IP Multimedia Subsystem), bien que ne faisant pas partie véritablement de la 4G, est un ensemble d'éléments permettant d'offrir des services multimédias sur les réseaux IP (et donc entre autres sur le réseau mobile).
- ❖ L'IMS permettra des services interpersonnels multimédia riches : voix sur IP, conférence vidéo, agenda enrichi, messagerie instantanée, sonnerie sur plusieurs terminaux, etc.

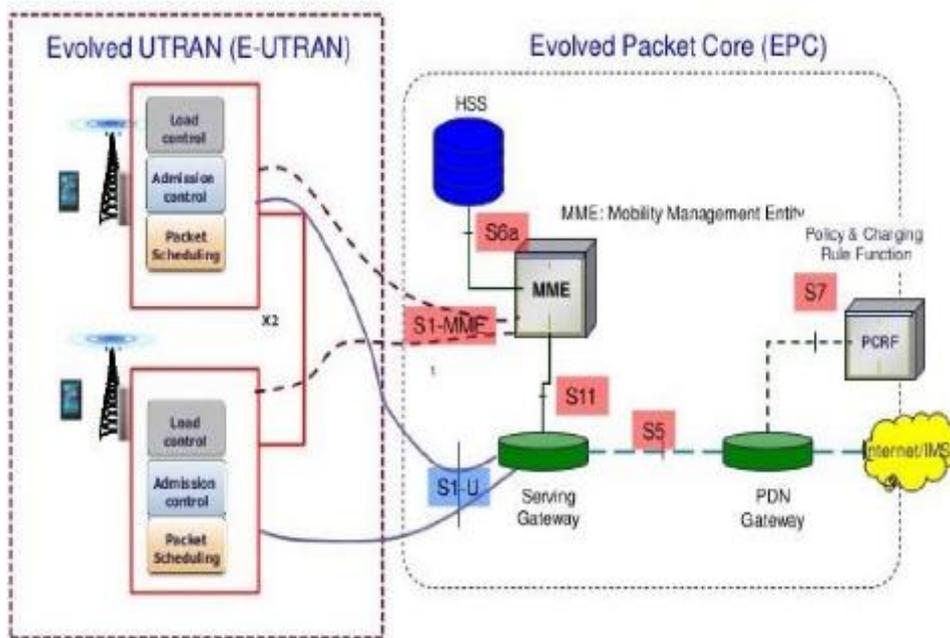


Figure I.4 : Architecture générale du LTE avec son cœur EPC [4].

I.5 Principes de fonctionnement de l'interface radio LTE (Protocole et couche MAC)

I.5.1 Les Canaux LTE [5]

Le système LTE, de manière similaire à l'UMTS, utilise le concept de canal afin d'identifier les types des données transportées sur l'interface radio, les caractéristiques de qualité de service associées, ainsi que les paramètres physiques liés à la transmission. Ces canaux sont des composantes de l'architecture du système et sont donc à distinguer du canal de transmission (qui capture les effets de la propagation radio) et du canal fréquentiel (ou porteuse) déjà rencontrés. On distingue trois classes de canaux, selon les couches du modèle OSI auxquelles ils sont attachés.

- Les canaux logiques, qui opèrent entre les couches RLC et MAC et sont définis selon le type d'information qu'ils transportent.
- Les canaux de transport, qui opèrent entre la couche MAC et la couche physique et sont définis Par la manière et les caractéristiques selon lesquelles les données sont transportées par l'interface Radio.
- Les canaux physiques, qui sont utilisés par la couche physique et sont définis par les caractéristiques physiques de leur transmission.

La (Figure I.5) suivante décrit l'association entre les canaux logiques, de transport et physiques, respectivement pour la voie montante (a) et la voie descendante (b).

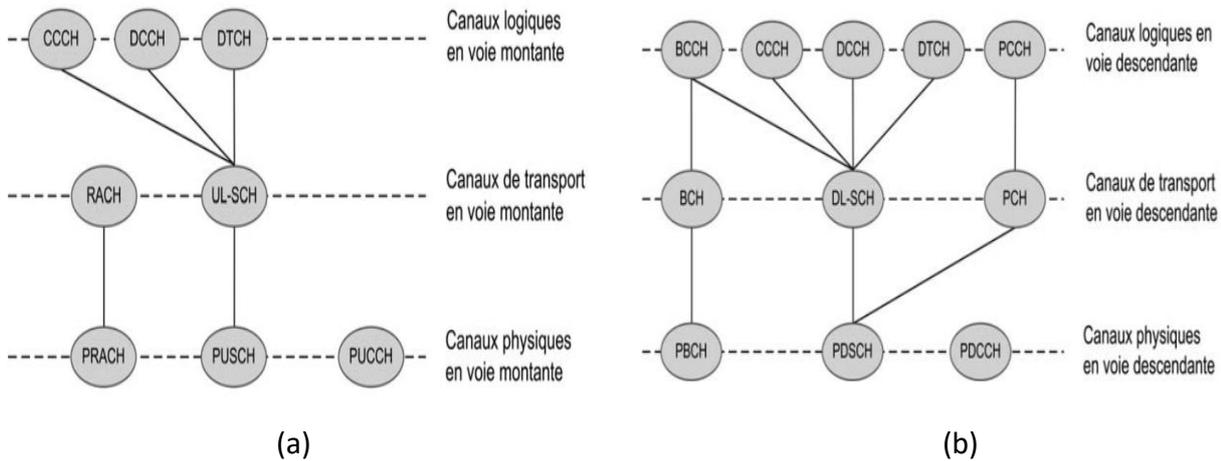


Figure 1.5 : Association entre les canaux logiques, de transport et physique, (a) : voie montante, (b) : voie descendante [5]

1.5.2 La couche MAC (Medium Access Control) [5]

La couche MAC est responsable du multiplexage et démultiplexage de données vers les porteuses radios différents, ainsi qu'elle permet l'accès et l'adaptation au support de transmission. Le but principal de la couche MAC (Medium Access Control) est de fournir un couplage efficace entre les services de la couche RLC2 et la couche physique. De cette perspective, la couche MAC supporte quatre fonctions principales :

- Le mappage entre les canaux logiques et de transport. En effet, quand le standard offre différentes options pour le transport de données pour un canal logique donné, la couche MAC s'occupe de choisir le canal de transport selon la configuration choisi par l'opérateur.
- La sélection du format de transport qui fait référence par exemple, au choix la taille du 'Transport Block' et le schéma de modulation.
- Gestion de propriété entre les connais logique d'une terminale ou entre plusieurs terminaux.
- Correction d'erreur à travers le mécanisme HARQ.

Dans une configuration donnée de l'interface radio (déterminée par le protocole RRC), un canal logique ne peut être porté que par un seul canal de transport, mais ce dernier peut transporter plusieurs canaux logiques. La même règle s'applique pour les canaux de transport et les canaux physiques. Enfin, certains canaux physiques ne sont associés à aucun canal de transport ni canal logique, car ils portent uniquement des informations relatives à la couche physique. Ceci est illustré par la (Figure 1.6) suivante, sur laquelle trois canaux physiques sont représentés (PDSCH et PDCCH pour le sens descendant, PRACH pour le sens montant).

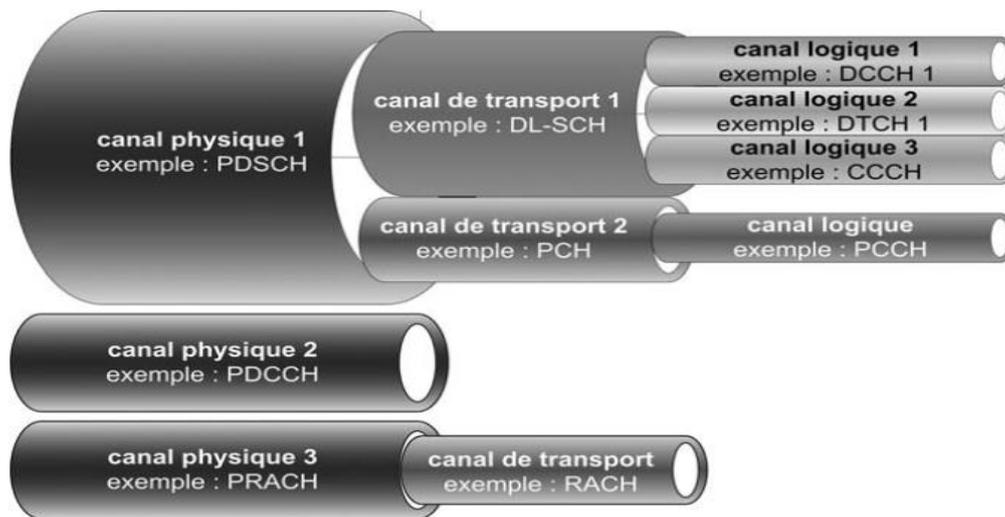


Figure I.6 : Les canaux de l'interface radio LTE et leurs imbrications. [5]

I.6 Allocation de bandes de Fréquences [6]

Les bandes de fréquences hertziennes prévues par les normes 3GPP pour le LTE et le *LTE Advanced* sont très nombreuses (plus de 30) et s'étalent de 450 MHz à 3,8 GHz. Celles situées dans la zone des 450 à 900 MHz sont utilisables sur tous les territoires et sont particulièrement adaptées aux zones rurales car elles ont une plus grande portée que les micro-ondes de fréquences plus élevées. Le rayon de couverture de chaque cellule est variable, allant de quelques centaines de mètres (débits optimaux en zones urbaines denses) jusqu'à 30 km (zones rurales) [7]. Beaucoup de ces bandes sont néanmoins déjà utilisées par d'autres standards de téléphonie comme l'UMTS. L'attribution des bandes de fréquences est la tâche la plus importante lors de la planification d'un réseau. Étant donné que différentes régions du monde utilisent ne serait-ce qu'une seule fréquence pour différents systèmes cellulaires [8], cela signifie que nous manquons de normes mondiales pour les communications cellulaires. Le duplexage définit la manière dont sont séparées les transmissions sur la voie descendante et sur la voie montante. La technologie LTE supporte les deux duplexages :

- Le duplex par répartition en fréquence (FDD).
- Le duplex par répartition dans le temps (TDD) sont utilisés comme techniques de duplexage dans le réseau LTE.

I.6.1 Attribution des bandes de duplex à répartition de fréquence (FDD)

Le réseau LTE utilise un grand nombre de bandes de fréquences [5]. Le système FDD utilise ces bandes. Les bandes de fréquences LTE-FDD sont présentées dans le (Tableau I.1), Nous citerons quelques exemples :

Numéro de la LTE bande	Liaison montante (MHZ)	Liaison descendante (MHZ)	Largeur de la bande (MHZ)	Espace entre les liaisons (MHZ)
1	1920 – 1980	2110 – 2170	60	130
3	1710 – 1785	7805 – 1880	75	20
4	1710 – 1755	2110 – 2155	45	355
9	1749.9 – 1784.9	1844.9 – 1879.9	35	60
10	1710 – 1770	2110 – 2170	60	340
11	1427.9 – 1452.9	1475.9 – 1500.9	20	28
15	1900 – 1920	2600 – 2620	20	680
16	2010 – 2025	2585 – 2600	15	560
17	704 – 716	734 – 746	12	18
19	830 – 845	875 – 890	15	30
20	832 – 862	791 – 821	30	71
21	1447.9 – 1462.9	1495.5 – 1510.9	15	33

Tableau I.1 : Les bandes de fréquences du LTE [5]

I.6.2 Bandes TDD (Time Division Duplex)

Il existe plusieurs attributions de fréquences non appariées associées au LTE-TDD [5]. Ces attributions de bande, comme indiqué dans le (Tableau I.2), ne sont pas appariées. En fait, ils sont multiplexés dans le temps, donc la fréquence n'est pas impliquée dans ces attributions.

Numéro de la bande LTE	Allocation (MHz)	Largeur de la bande (MHz)
33	1900 – 1920	20
34	2010 – 2025	15
35	1850 - 1910	60
36	1930 - 1990	60
38	2570 – 2620	50
39	1880 – 1920	40
40	2300 - 2400	100
41	2496 – 2690	194
42	3400 – 3600	200

Tableau I.2 : Les bandes de fréquences allouées au LTE TDD [5]

I.7 La modulation

Différents schémas de modulation sont utilisés pour différents types de communication dans la technologie sans fil. Il est très important de sélectionner le schéma de modulation le plus efficace qui réponde à toutes les exigences. En modulation, un signal en bande de base (signal basse fréquence) est multiplié par un signal porteur ou un signal modulateur (normalement un signal haute fréquence). Les signaux peuvent être transmis sur de longues distances grâce à l'utilisation de

la modulation. Le démodulateur démodule le signal à l'autre extrémité (récepteur). Il existe deux types de modulations, les modulations analogiques et les modulations numériques [9]. La modulation utilisée dans le LTE est une modulation adaptative (AMC), qui varie en fonction de la distance qui sépare l'abonné de l'eNodeB. L'Adaptive Modulation and Coding (AMC) [11] est une technique de modulation/codage adaptative de l'information, utilisée notamment dans les transmissions radio, sur les réseaux de téléphonie mobile WiMAX, UMTS (HSDPA), LTE et depuis 2012 sur les faisceaux hertziens. Elle consiste à adapter les codes correcteurs et les modulations utilisés en fonction de la qualité du signal. Chaque sous-porteuse est modulée à l'aide de différents niveaux de modulation : QPSK (Quadrature Phase Shift Keying : 4-QAM), 16-QAM, 64-QAM (Quadrature Amplitude Modulation). Chacune de ces modulations est utilisée pour un lien précis tel que :

- Modulations Downlink : QPSK, 16QAM et 64QAM
- Modulations Uplink : QPSK et 16QAM

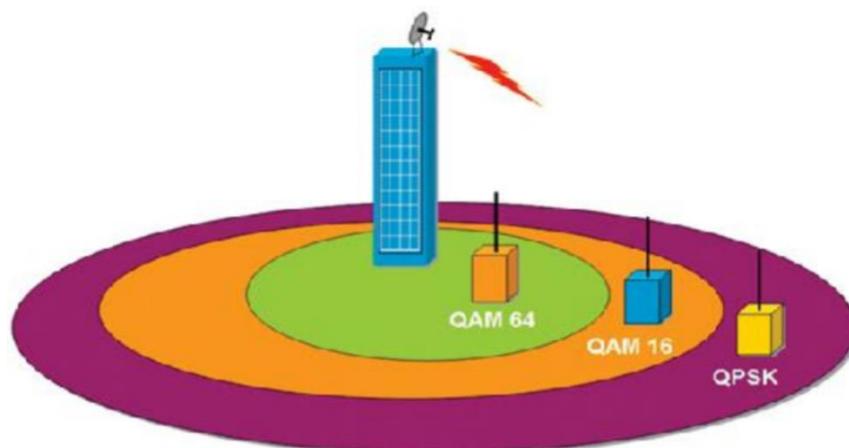


Figure I.7 : Modulation Adaptative.

I.7.1 La modulation 16-QAM

La modulation d'amplitude en quadrature (QAM) est une forme de modulation d'une porteuse par modification de l'amplitude de la porteuse elle-même et d'une onde en quadrature (une onde déphasée de 90° avec la porteuse) selon l'information transportée par deux signaux d'entrée [10]. L'amplitude et la phase de la porteuse sont simultanément modifiées en fonction de l'information à transmettre. La (Figure I.8) montre la constellation, qu'elle est en conséquence le nombre de bits pouvant être transmis en une fois, peut être augmentée pour un meilleur débit binaire, ou diminuée pour améliorer la fiabilité de la transmission en générant moins d'erreurs binaires. Le nombre de points de la constellation est indiqué avant le type de modulation QAM.

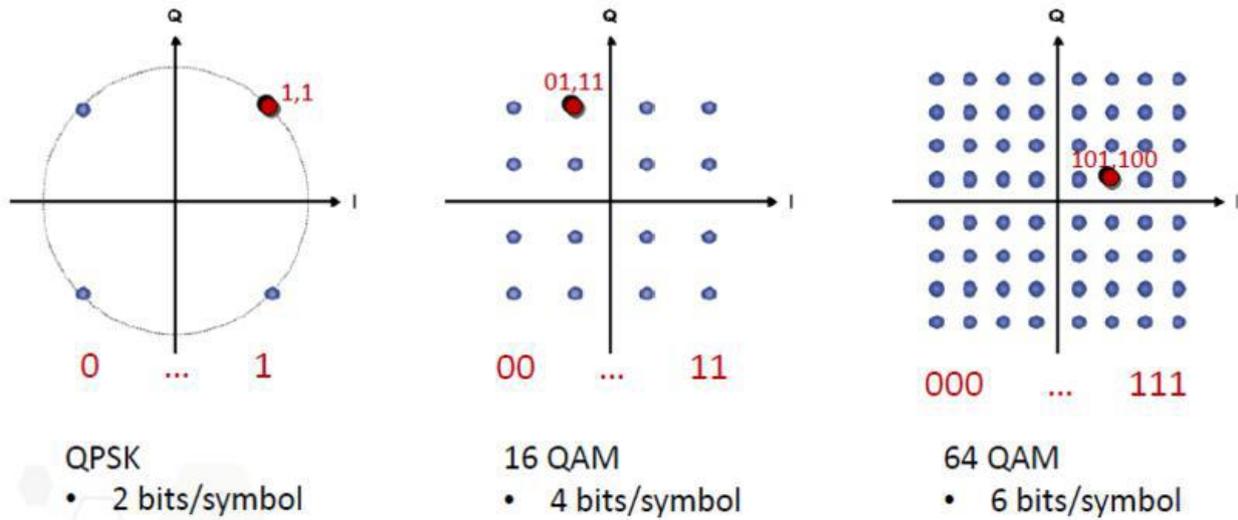


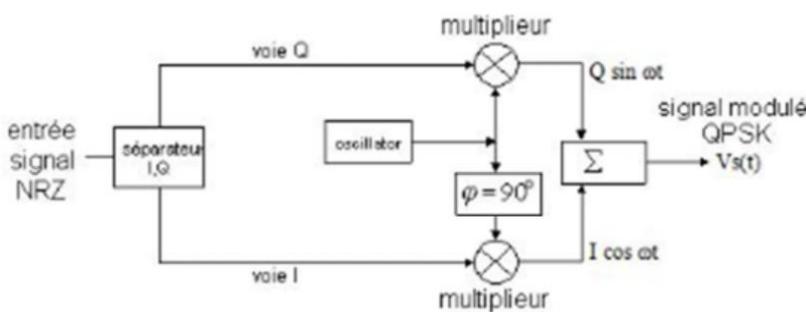
Figure I.8 : la modulation QPSK (2 bits / symbole) ; 16 QAM (4bits/symbole) et 64 QAM (6 bits / symbole) [11].

I.7.2 La modulation 64-QAM

Dans le cas d'une modulation, six bits sont mappés dans le symbole complexe [12,33]. La constellation est constituée de 64 symboles (Figure I.8)

I.7.3 La modulation QPSK

Souvent connue sous le nom de 4-PSK ou QPSK, cette modulation utilise un diagramme de constellation à quatre points [12], à équidistance autour d'un cercle. Avec quatre phases, QPSK peut coder deux bits par symbole (Figure I.8). Chacun attaque un multiplieur. Le résultat de chaque multiplication est sommé en sortie de façon à obtenir un signal modulé $V_s(t)$: $V_s(t) = I \cos(\omega t) + Q \sin(\omega t)$. (voir figure suivante)



Pour des considérations électroniques, les signaux I et Q sont centrés sur 0V. On peut donc considérer que I et Q prennent symboliquement deux niveaux +1, -1 correspondant aux états binaires.

Figure I.9 : Schéma du principe du modulateur QPSK [13]

I.8 Les différentes techniques d'accès LTE

L'interface radio assure le rôle de transfert, par la voie des airs les données issues de la couche IP associées au service demandé par l'utilisateur. Dans les réseaux radio qui partagent le canal radio entre plusieurs utilisateurs, il faut une technique d'accès qui permet à l'utilisateur d'émettre ses paquets. Pour éviter des collisions, différentes techniques d'accès ont été proposées,

des plus simples aux plus complexes. La modulation du LTE est basée essentiellement sur l'utilisation de la technologie OFDM et des technologies d'accès associés, OFDMA/SC-FDMA. Dans ce qui suit, nous allons présenter les différentes techniques d'accès :

1.8.1 Time Division Multiple Access (TDMA)

Dans un système TDMA, une même bande de fréquence est partagée par un certain nombre d'utilisateurs qui se voient attribuer un intervalle de temps (slot) unique (Figure I.10 (a)). Les différents slots sont regroupés sur une trame, le système offrant ainsi plusieurs voies de communication aux différents utilisateurs. Le TDMA est surtout utilisé dans les systèmes de deuxième génération, tels que le GSM.

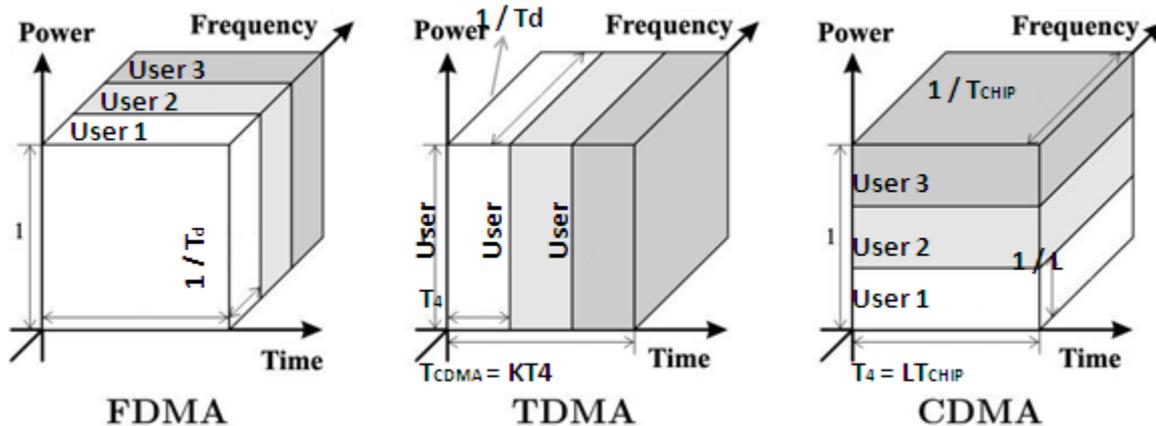


Figure I.10 : (a) Principe du TDMA ; (b) Principe du FDMA et (c). Principe du CDMA. [14]

1.8.2 Frequency Division Multiple Access (FDMA)

L'accès multiple par répartition de fréquences (FDMA) repose sur un multiplexage en fréquences qui divise le spectre disponible en plusieurs sous-bandes appelées : porteuses (Figure I.10 (b)). Chaque porteuse ne peut transporter que le signal d'un seul utilisateur. La méthode d'affectation d'un canal est alors basée sur une règle de type premier arrivé, premier servi. Cette méthode est essentiellement utilisée dans les réseaux analogiques

1.8.3 Code Division Multiple Access (CDMA)

Le CDMA est une technique d'accès multiple grâce à laquelle les différents utilisateurs peuvent communiquer simultanément dans une même bande de fréquence (Figure I.10 (c)). La distinction entre les différents utilisateurs s'effectue grâce à un code qui leur est attribué et n'est connu que par l'émetteur et le récepteur.

Dans ce qui suit, nous allons donner un aperçu détaillé que les techniques d'accès utilisées dans la modulation du LTE :

I.8.4 Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM)

Dans le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) (voir la Figure I.11), un grand nombre de porteuses étroitement espacées sont utilisées. La modulation de ces porteuses se produit à des débits de données inférieurs. L'interférence entre ces porteurs peut avoir lieu, mais l'orthogonalité entre ceux-ci ne provoque aucune interférence mutuelle. L'orthogonalité signifie rendre ces porteurs perpendiculaires les uns aux autres, ce qui signifie que l'espace entre ces porteurs doit être égal à l'inverse de la période du symbole. Tous les porteurs occupent les données transmises [16,33]. C'est une technique de modulation multi-porteuses à base de transformée de Fourier rapide qui permet de diviser le flux de données à transmettre en N sous flux de données parallèles, qui seront transmis sur des sous bandes orthogonales différentes. Cette technique permet d'offrir une grande efficacité au niveau de l'utilisation du spectre et de la puissance grâce à l'utilisation de N sous-porteuse orthogonales et très proche l'une de l'autre.

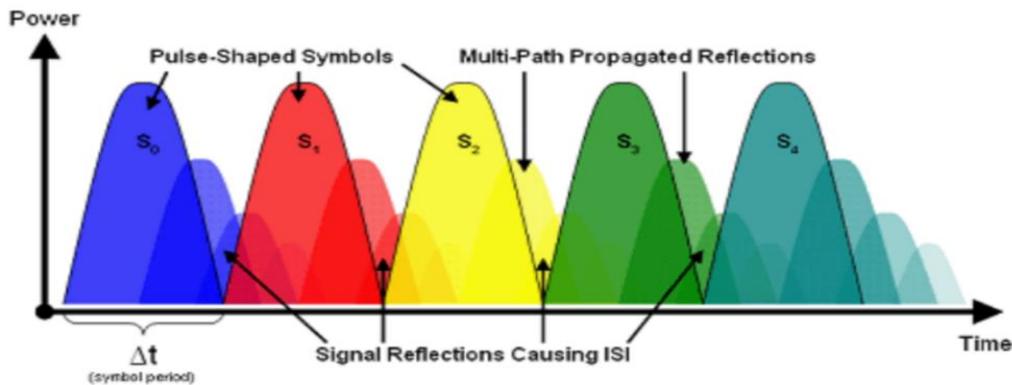


Figure I.11 : Modulation OFDM.

De plus, l'augmentation de la durée symbole accroît la robustesse de l'OFDM face au temps de propagation du aux trajets multiples (NLOS). D'autre part, une grande immunité contre les interférences inter-symboles crée par la propagation NLOS est apportée par l'insertion d'un temps de garde appelé aussi préfixe cyclique (CP) (voir figure suivante). En effet, le symbole OFDM est allongé avec ce préfixe qui doit être plus grand que le plus grand des retards qui apparaissent dans le canal.

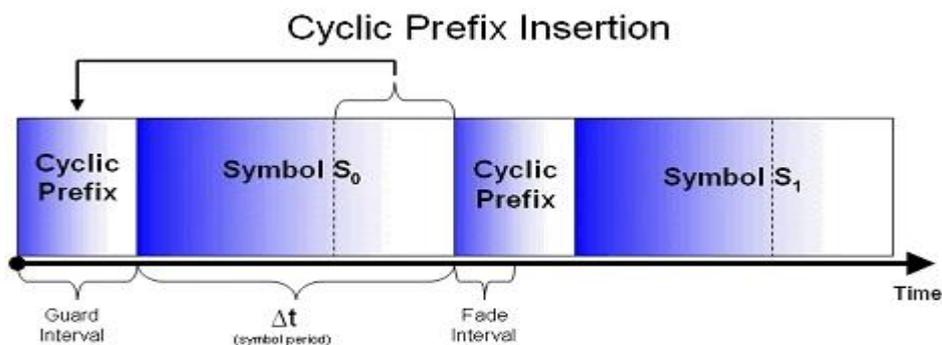


Figure I.12 : Préfixe Cyclique.

1.8.5 Orthogonal Frequency-Division Multiplexing Access (OFDMA)

Toujours côté radio, la 4G introduit, dans le sens descendant une nouvelle modulation, l'OFDMA appelée également 'multi-carrier' (multi-opérateurs), déjà notamment utilisée en Wi-Fi, en Wimax et en xDSL. Elle offre une meilleure efficacité spectrale, un faible temps de latence et résiste mieux aux interférences. C'est une technique hybride de l'OFDM, TDMA et FDMA. Elle permet d'augmenter le débit vu à la diversité fréquentielle et la robustesse multi trajet. Cette technique de multiplexage d'accès consiste la répartition du signal sur des porteuses orthogonales pour transmettre le signal indépendamment et à des fréquences différentes. L'OFDMA consiste à introduire trois types de sous-porteuse :

- Sous porteuses pilotes pour la synchronisation et l'estimation du canal.
- Sous porteuses de données pour la transmission de données.
- Sous porteuses nulles au symbole pour lutter contre l'interférence co-canal.

LTE utilise la technique OFDMA en voie descendante car elle nécessite une alimentation importante de l'amplificateur. Ceci ne pose pas problème pour une station de base fixe, mais cela n'est pas adapté à un émetteur alimenté par une batterie (cas d'un terminal mobile). Pour cela, LTE utilise en voie montante SC-FDMA qui est très similaire à OFDMA, mais plus efficace en consommation d'énergie.

1.8.6 Single Carrier – Frequency Division Multiple (SF-FDMA)

Le SC-FDMA offre des performances et une complexité globale similaire à l'OFDMA mais utilise une technique de multiplexage fréquentiel à une seule porteuse. La (Figure I.13) permet de relever les points communs entre l'OFDMA et le SCFDMA

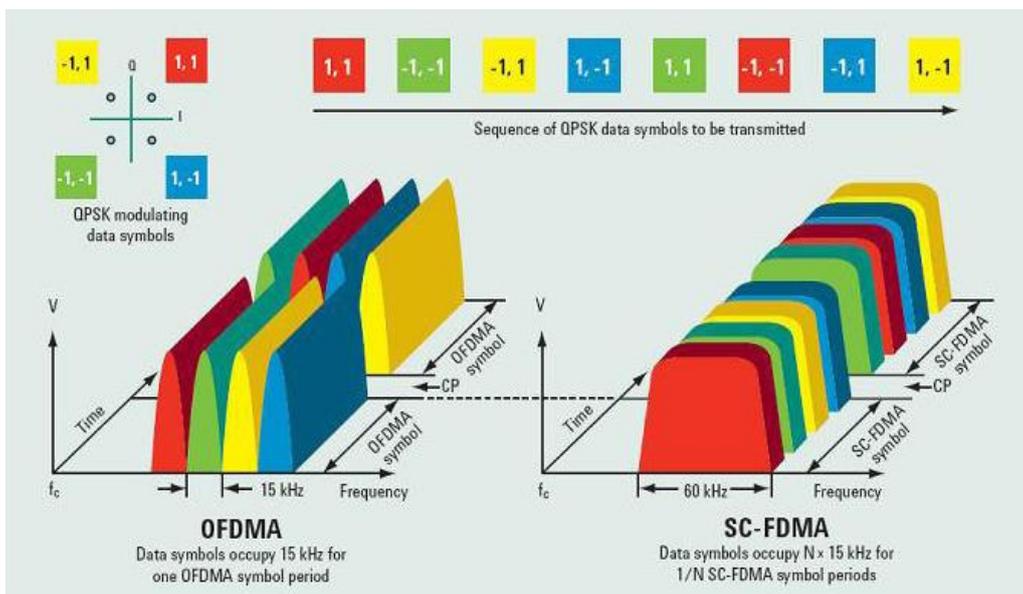
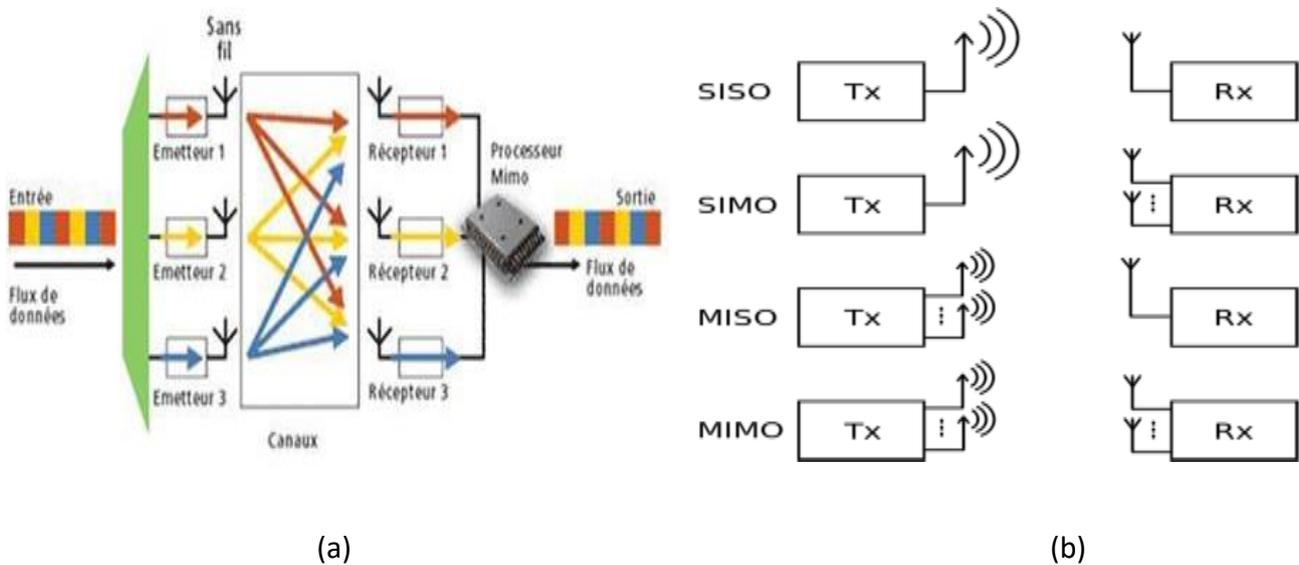


Figure I.13 : La différence entre OFDMA et SC-FDMA [11].

I.9 LTE MIMO (Multiple Input Multiple Output)

La technique MIMO consiste en l'utilisation de plusieurs antennes à l'émission et à la réception. Le but de la technique MIMO était d'améliorer le débit, d'augmenter l'efficacité spectrale, de diminuer la probabilité de coupure du lien radio, etc. En effet, MIMO répond au besoin de la norme LTE-Advanced en termes de capacité de transmission. Cette dernière limite le nombre d'antennes à utiliser en raison de contraintes technologiques exigées. La technologie permet de régler ce problème. Le principe de la technologie MIMO consiste à émettre dans un même canal des signaux transmis sur des antennes différentes. A la réception aussi et avec un certain nombre d'antennes et des traitements adéquats, il s'agit de simuler cette réception dans une même bande de n canaux différents. Cela permet d'améliorer les performances des appareils, rapport signal à bruit et donc du taux d'erreurs binaires. Lorsqu'un tel système comprend une seule antenne à l'émission et plusieurs antennes à la réception, il est nommé SIMO (Single Input Multiple Output). De même, lorsqu'il comprend plusieurs antennes à l'émission et une seule antenne à la réception, il est nommé MISO (Multiple Input Single Output). Finalement, si les deux côtés comptent une antenne chacun, le système est dit SISO (Single Input Single output).



I.10 Le Handover dans LTE

Dans LTE la gestion de mobilité est distribuée, les eNodeBs prennent la décision de Handover d'une façon autonome sans implication des éléments : MME et S-GW. Les informations nécessaires au Handover sont échangées entre les eNodeBs via une interface appelée X2. Le MME et le S-GW recevront une notification avec un message complet de Handover après que la nouvelle connexion

aura été attribuée entre l'UE et la nouvelle eNodeB. Après réception du message, les Gateways effectuent le chemin de commutation. Durant le Handover il y a un délai durant lequel l'UE n'est pas connectée au système. Pour résoudre cela, une solution temporaire de Forwarding des données perdues de l'ancien eNB vers le nouveau eNB est proposée.

Dans ce cas il n'y a pas de mémorisation des données au niveau des Gateways. L'intérêt de cette solution est de minimiser la charge de signalisation au niveau de l'interface entre l'eNB et l'MME/S-GW. Les principales étapes du Handover sont :

- Le Handover est déclenché par l'UE qui envoie un rapport de mesure à l'eNB source qui va décider en se fondant sur le rapport reçu et sur les informations concernant la gestion des ressources radio (RRM : Radio Resource Management).
- La phase de préparation du Handover commence par l'envoi d'une requête de Handover (HORequest) de la part de l'eNB source vers l'eNB cible. Ce message contient toutes les informations pertinentes sur le Handover (UE - RAN, PDP Context, etc...).
- L'eNB cible enregistre le contexte, prépare les couches 1 et 2 (L1/L2) pour le Handover et répond à l'eNB source par un acquittement (HO RequestAck) qui fournira les informations sur l'établissement de nouveau lien radio.
- L'eNB source transférera toutes les informations nécessaires à l'UE, et à ce moment-là, l'eNB source arrête d'envoyer et de recevoir des données avec l'UE. Il fera alors suivre les données à l'eNB cible.
- L'UE informe l'eNB cible du succès du Handover avec un message de confirmation. Jusqu'à cet instant l'eNB cible mémorise les données reçus de l'eNB source. Après avoir reçu le message de confirmation il commence à envoyer les données bufférisées à l'UE.
- L'eNB cible initie le changement de chemin de données en envoyant un « Handover Complete » aux passerelles. Les informations de localisation de l'UE seront ensuite mises à jour au niveau des passerelles qui vont effectuer le changement de chemin pour que les données soient envoyées directement vers l'eNodeB cible.
- L'MME/S-GW confirment le chemin par un message 'Handover Complete Ack', et dès que l'eNodeB cible reçoit ce message, il envoie une indication 'release Source' au eNodeB source pour qu'il libère définitivement la connexion avec l'UE.

I.11 Bilan de liaison

Le bilan de liaison radio donne la perte de trajet maximale autorisée à partir de laquelle la taille des cellules est calculée en se basant sur la fréquence de fonctionnement, le modèle de

propagation et les paramètres de l'émetteur (Tx) et du récepteur. Ce bilan est nécessaire pour savoir si deux nœuds peuvent communiquer entre eux [11]. Le bilan de liaison permet de calculer les pertes de propagation maximale admissible notée MAPL (Maximum Allowable Power Losses) pour un mobile situé au bord de la cellule qui peut l'atteindre tout en gardant le niveau de sensibilité de la station de base. Il dépend en particulier de l'eNodeB, de l'environnement radio et du modèle de propagation entre l'émetteur et le récepteur.

I.1.1.1 Paramètres du bilan de liaison

[11] L'équation du bilan de liaison s'écrit :

$$MAPL = PIRE - Sens_{RX} - \sum pertes - \sum marges + \sum gains \quad (I.1)$$

Avec : **PIRE** : puissance isotrope rayonnée équivalente par sous porteuse (dBm) ; **Sens_{RX}** : sensibilité de référence du récepteur (dB) ; **∑ pertes** : somme des pertes au cours de la propagation du signal jusqu'au récepteur (dB) ; **∑ marges** : somme des marges (dB) et **∑ gains** : somme des gains au niveau du récepteur (dBi). D'où :

$$MAPL = (P_{TX} + G_{TX} - L_{TX} - BL_{TX}) - Sens_{RX} - (L_{RX} + BL_{RX} + PL) - (IM + SM) + BL_{RX} \quad (I.2)$$

Avec P_{TX} : puissance par sous porteuse (dBm), Pour la voie descendante, la puissance maximale de l'émetteur est égale à la puissance de l'eNodeB (46 dBm), par contre pour la voie montante cette puissance est celle émise par l'équipement usager (23 dBm).

$$P_{TX} = P_{TX_{max}} - 10 \times \log(N_{SP} \times N_{PRB}) \quad (I.3)$$

Avec : $P_{TX_{max}}$: Puissance maximale de l'émetteur (dBm), ; N_{SP} : Nombre de sous porteuses ; N_{PRB} : Nombre de ressources blocs de la bande passante du système.

- G_{TX} : Gain introduit au niveau de l'émetteur (dBi), Pour le lien descendant, le gain de l'émetteur est le gain de l'antenne de la station de base. Pour le lien montant, le gain de l'émetteur est le gain de l'UE qui est égal à 0dB
- L_{TX} : pertes de l'émetteur (dB), Les pertes de l'émetteur pour la liaison descendante sont les pertes entre l'antenne et le RRU telles que la perte d'alimentation, la perte de connecteur etc.

- BL_{TX} : perte de type signal au niveau de l'émetteur (dB), c'est l'affaiblissement dû à l'absorption d'une partie de l'énergie transmise par le corps humain. Dans les deux sens, cette perte est nulle.
- $Sens_{RX}$: Sensibilité de référence du récepteur (dBm), La sensibilité du récepteur est le niveau de signal minimum que le récepteur doit avoir pour éviter les coupures radio.

$$Sens_{RX} = N_{RX} - 174 + 10 \log(15000) \quad (I.4)$$

Avec : $SINR$: Valeur de SINR (Signal-to-Interference Ratio) requise au récepteur (dBm) ; N_{RX} : facteur de bruit.

- L_{RX} : pertes au niveau du récepteur (dB), Ce sont les pertes causées au niveau de la réception, comme les pertes des câbles ou des composants électroniques. En liaison descendante, normalement cette perte vaut 0, tandis qu'en liaison montante elle est égale aux pertes rencontrées au niveau de l'eNodeB (0.5dB).
- BL_{RX} : perte de type signal au niveau du récepteur (dB), C'est l'affaiblissement dû à l'absorption d'une partie de l'énergie transmise par le corps humain.
- PL : perte de pénétration (dB), La perte de pénétration est due à l'obstruction par un bâtiment. Elle est identique dans les deux sens.
- I_M : marge d'interférence (dB), Compte tenu de l'interférence de la cellule voisine, la marge d'interférence doit être entrée dans le bilan de liaison pour compenser l'augmentation du bruit et maintenir l'équilibre. Elle est liée à la charge du système et à d'autres paramètres
- S_M : marge de Shadowing (dB), C'est l'effet de masque, c'est-à-dire la variation du signal due aux obstacles qui existent dans le milieu de propagation. Les mesures réelles du terrain ont montré que l'effet de masque est une valeur aléatoire Log Normale.
- G_{TX} : gain au niveau du récepteur (dBi), Le gain du récepteur correspond au gain de diversité de réception qui dépend du type d'antenne et du nombre d'antenne du récepteur.

I.11.2 Calcul du bilan de liaison pour les liens montant et descendant

Le bilan de liaison est établi sur la liaison descendante (Downlink) et la liaison montante (Uplink) (voir les Figure I.15 et Figure I.16 suivantes).

• Formules de calcul pour la liaison Montante

Paramètres	Unité	Formule	Valeur
Emetteur			
Puissance d'émission	dBm	P_{tx}	18-23 dBm
Gain d'antenne émetteur	dBi	G_e	-5 → 10 dBi
Perte corps humain	dB	P	0 → 5 dB
PIRE (Puissance isotrope rayonnée équivalente)	dBm	$PIRE = P_{tx} + G_e - P$	
Récepteur-eNodeB			
eNodeB noise figure	dB	eNoise	2 dB
Bruit thermique	dB	BruitT	-118.4 dBm
Bruit récepteur	dBm	Bruit = eNoise + BruitT	
SINR	dB	SINR	-7 dB
Sensibilité du récepteur	dBm	SensR= Bruit + SINR	
Marge d'interférence	dB	MargeInt	1 → 10 dB
Pertes de câble	dB	P_c	1 → 6 dB
Gain d'antenne récepteur	dBi	G_r	15 → 21 dB
Marge de fading rapide	dB	MargeF	0 dB
Gain du soft handover	dB	G_h	0 dB
Path Loss Maximal	dB	$PL = PIRE - MargeInt + G_r - P_c + G_h - SensR$	

Tableau I.3 : Bilan de liaison montante [11]

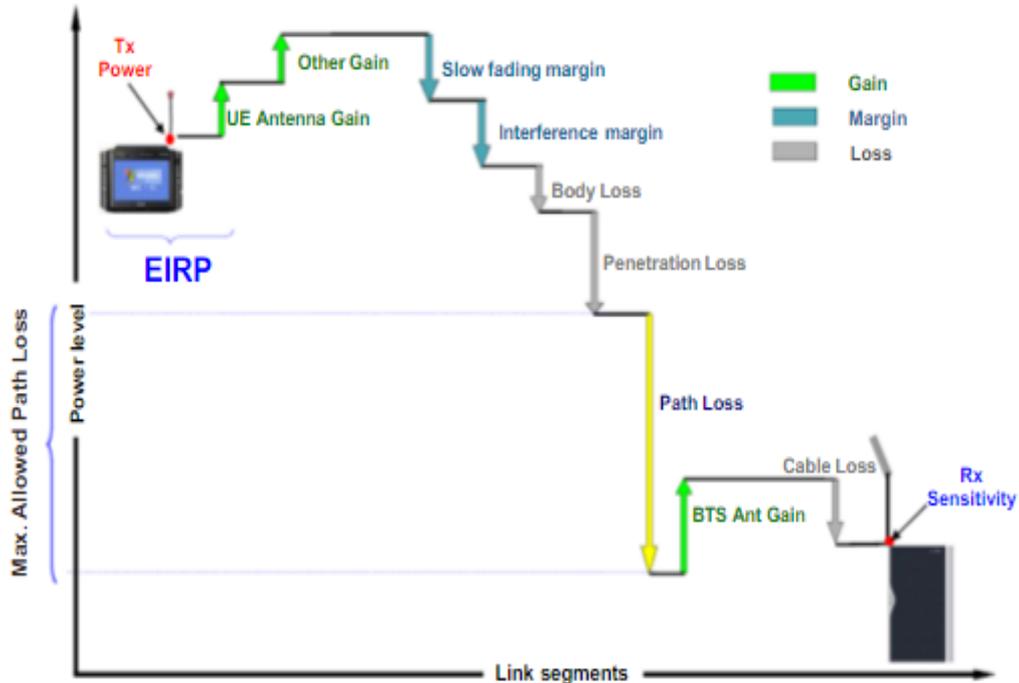


Figure I.15 : Modèle de bilan de liaison montante. [11]

• Formules de calcul pour la liaison Descendante

Paramètres	Unité	Formule	Valeur
Emetteur - eNodeB			
Puissance d'émission	dBm	P_{tx}	43-46 dBm
Gain d'antenne émetteur	dBi	G_e	15 → 18 dBi
Perte de câble	dB	P	1 → 6 dB
PIRE (Puissance isotrope rayonnée équivalente)	dBm	$PIRE = P_{tx} + G_e - P$	
Récepteur-UE			
UE noise figure	dB	$UENoise$	6 → 11 dB
Bruit thermique	dB	BruitT	-104.5 dBm
Bruit récepteur	dBm	$Bruit = UENoise + BruitT$	
SINR	dB	SINR	-9 dB
Sensibilité du récepteur	dBm	$SensR = Bruit + SINR$	
Marge d'interférence	dB	MargeInt	3 → 8 dB
Control channel overhead	dB	Ctrl	0.4 → 1 dB
Gain d'antenne récepteur	dBi	G_r	-5 → 10 dBi
Perte corps humain	dB	P	3 → 5 dB
Path Loss Maximal	dB	$PL = PIRE - MargeInt + G_r - Ctrl + P_c - SensR$	

Tableau I.4 : Bilan de liaison descendante [11]

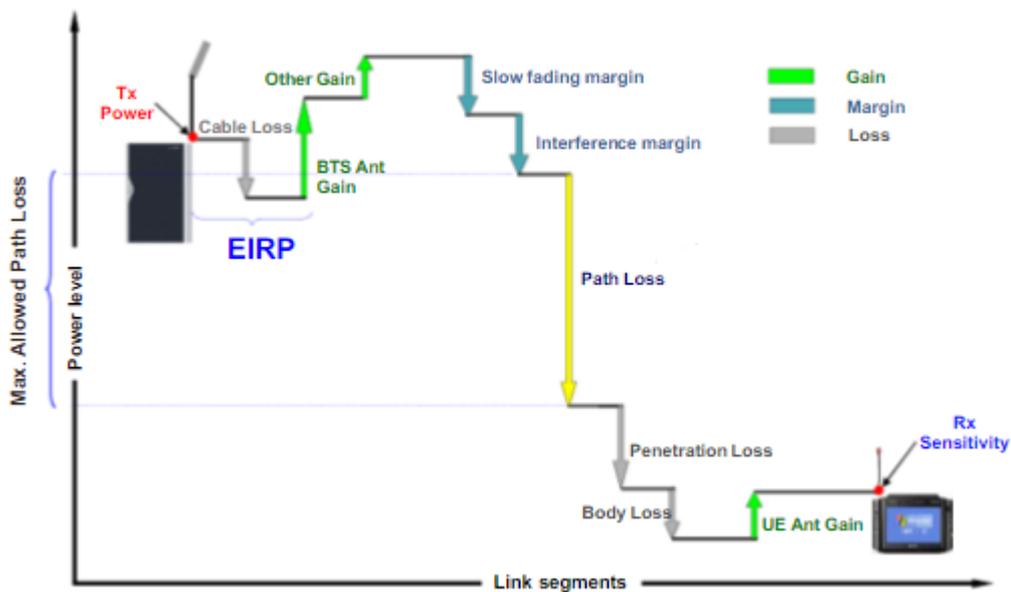


Figure I.16 : Modèle de bilan de liaison descendante. [11]

I.12 Modèles de propagation

I.12.1 Introduction et définition d'un modèle de propagation

Le modèle de propagation est un processus important du débit de déploiement du réseau car il permet une prédiction précise de la couverture [15]. Le modèle de propagation des ondes radio est un modèle mathématique qui est donné par un certain nombre de paramètres (caractéristiques

techniques, type d'environnement géographique) et peut simuler la perte entre l'émetteur et le récepteur [16]. Le modèle de propagation est une formule mathématique utilisée pour caractériser la propagation de l'onde radio entre émetteur et récepteur, qui dépend des facteurs suivants :

- Type de terrain.
- Les hauteurs des antennes d'émission et de réception.
- Fréquence de l'onde.
- Distance parcourue par l'onde.
- Caractéristique et densité des bâtiments.
- Saison (hiver, printemps...)

I.12.2 Propagation en espace libre (Free Space)

Lorsqu'un signal traverse un milieu vide non obstrué, nous l'appelons propagation en espace libre. Bien que ce modèle soit idéal, il peut être utilisé comme point de départ pour tout autre modèle. L'affaiblissement de trajet en espace libre est donné par :

$$L_{FS} = 20 \log \left(\frac{4\pi dF}{c} \right) \quad (I.5)$$

Avec d , F et c sont respectivement la distance parcourue, la fréquence et la célérité de la lumière.

I.12.3 Catégories des modèles de propagation

Sur la base de l'environnement radio (voir la Figure I.17), face à une demande croissante, les opérateurs doivent densifier leurs réseaux : ils ont augmenté le nombre de stations de base et réduit la taille des cellules. Une cellule est une zone couverte par une station de base. Il existe généralement quatre types de cellules (figure). Ils indiquent l'emplacement physique spécifique de l'antenne de la station de base et sa zone géographique déterminée : leurs caractéristiques sont liées à l'emplacement, la puissance, la hauteur et l'environnement géographique de l'antenne de la station de base.

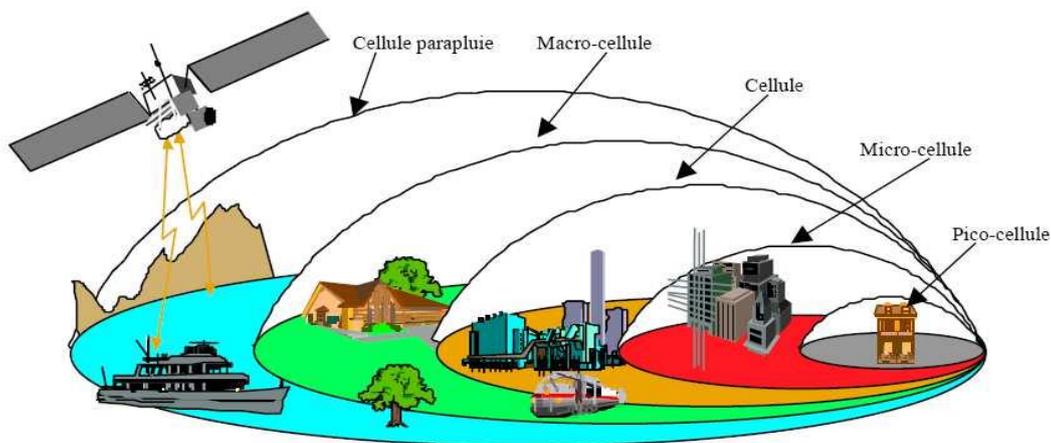


Figure I.17 : structure hiérarchique de cellules

Les modèles de prédiction peuvent être classés en deux principales catégories :

- Modèle Macro-cellule.
- Modèle Micro-cellule.

I.12.3.1 Modèle Macro-cellule

Les modèles macro-cellulaires sont des modèles empiriques généralement fondés sur l'analyse du profil vertical émetteur-récepteur et des obstacles qui s'y trouvent (colline, forêt, etc.). Ils sont généralement basés sur des données géographiques [15]. Le milieu environnant est généralement rural ou montagneux, et l'antenne de la station de base est située à une position très élevée. La distance entre la station de base et le téléphone mobile peut être supérieure à dix kilomètres [17]. Cette zone géographique est peu urbaine et implique un certain nombre de trajets à forte latence (jusqu'à 30 ms).

I.12.3.2 Modèle Micro-cellule

La petite cellule est différente de la macro-cellule [17]. Le modèle micro-cellulaire tente de prédire une zone de couverture moins étendue mais plus précise, ce modèle peut utiliser efficacement le spectre limité et fournir une infrastructure plus rentable, Ces modèles sont principalement ou partiellement adaptés aux installateurs de réseaux mobiles en milieu urbain et semi-urbain [15]. Les Antenne de la station de base (de 3 m à 10 m) il a une faible puissance de rayonnement (de 10 mW à 1 W) [17].

I.12.4 Différents types de Modèles de propagation RF

Il existe deux méthodes principales pour prédire le comportement du canal de transmission dans le domaine des communications radio mobiles, la première méthode effectue généralement une simulation statistique du canal, et la deuxième méthode consiste à modéliser le chemin du signal dans le milieu de propagation par l'utilisation de résolution analytique direct des équations de propagation.

Il existe une autre méthode appelée méthode de rayon (déterministes) est basée sur des calculs d'optique géométrique (réflexion, diffraction, etc.) [17,19].

I.12.4.1 Les modèles empiriques

Les deux principaux modèles dérivés de ces méthodes sont les modèles théoriques et les modèles empiriques. Les modèles semi-empiriques utilisant des méthodes antérieures a également été déterminé, ces derniers prennent en compte les équations théoriques de propagation et sont paramétrés à l'aide des résultats de mesures réelles [17]. Les modèles empiriques reposent sur l'analyse d'un grand nombre de mesures expérimentales, c'est-à-dire l'analyse statistique des

données de divers paramètres (la fréquence, la distance, la hauteur des antennes, l'affaiblissement, et milieu géographique différent, etc.), il représentera correctement les données qui ont servi à l'établir. L'élaboration de ces modèles basés sur la collecte de données liées à la mesure. Grâce à l'analyse statistique des données on tire les équations donnant une valeur moyenne d'affaiblissement pour une distance donnée [19,20].

La (Figure I.18) montre la topologie des modèles empiriques :

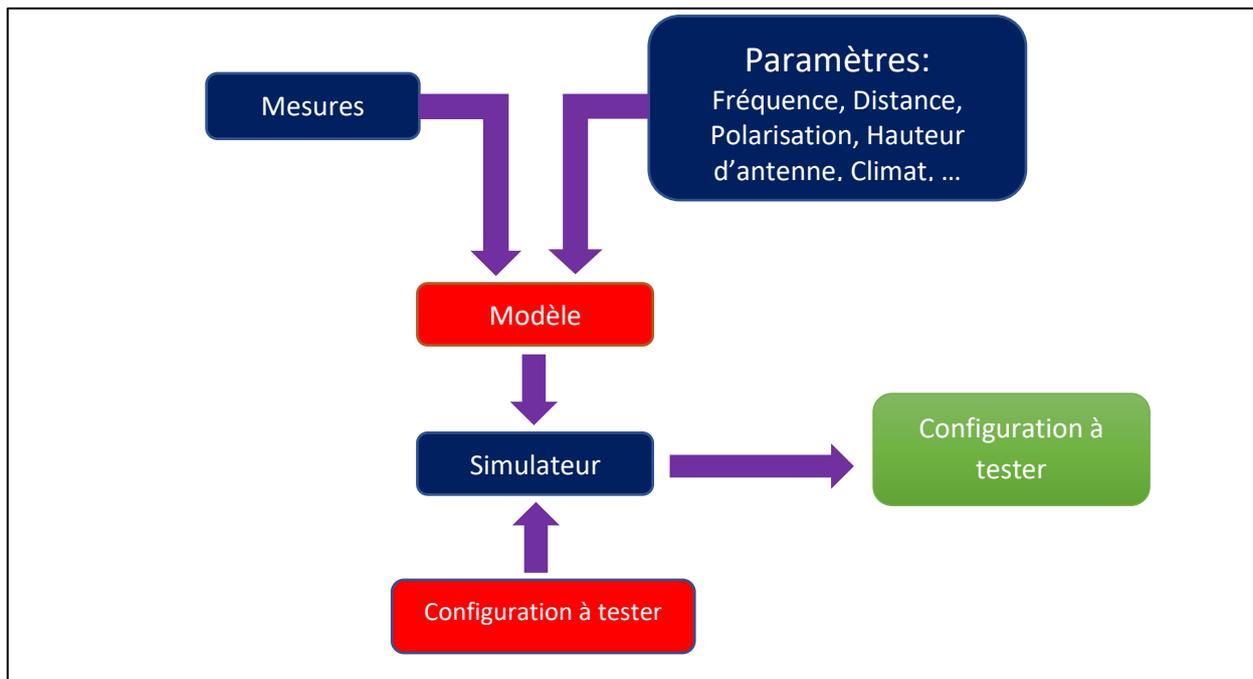


Figure I.18 : Plan de travail des modèles empiriques.

I.12.4.2 Les modèles déterministes

Ces modèles s'appuient sur les lois fondamentales de la physique du signal radioélectrique ainsi que sur des modèles de l'atmosphère et des modèles de terrain. Les modèles déterministes sont très complexes, leur utilisation nécessite une connaissance très approfondie du sujet. Ils sont donc mieux utilisés pour la recherche, ce qui les rend incompatibles avec les conceptions de réseaux radio-mobiles qui nécessitent des outils d'exploitation rapides. De plus, les performances de ces modèles ne répondent pas toujours aux résultats atteints de cette méthode [17]. De plus, ils sont longs à calculer et sont généralement réservés à des lieux spécifiques qui ne sont pas disponibles pour d'autres modèles.

I.12.5 Les Modèles de propagation RF

Le modèle est basé sur tous les calculs pouvant être effectués par le logiciel radio (niveau de champ radio reçu, calcul des interférences, analyse du Handover, etc...). Ce logiciel apporte une aide précieuse pour le dimensionnement du réseau. Cela devrait également minimiser le temps de calcul

pour la couverture du champ, vous devez donc faire très attention aux différents paramètres d'entrée du modèle.

I.12.5.1 Les modèles pour les grandes cellules (Macro-Cells)

Il s'agit de cellules dont le rayon de service est de 1 à 35km. Elles caractérisent les liaisons en milieu suburbain et rural.

I.12.5.1.1 Modèle de Hata

Le modèle de Hata s'applique aux fréquences comprises entre 150 et 1500 MHz. En milieu urbain, l'affaiblissement en dB appelé ici L_{50} est donné par [18].

$$L_{50} = 69.55 + 26.16 \log(f_c) - 13.82 \log(h_b) - a(h_r) + (44.9 - 6.55 \log(h_b)) \times \log(d) \quad (I.6)$$

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

- Une petite à moyenne ville :

$$a(h_r) = (1.1 \log(f_c) - 0.7) h_r - (1.56 \log(f_c) - 0.8), \text{ en dB} \quad (I.7)$$

- Grande ville ($f_c < 300$ MHz):

$$a(h_r) = 8.29 (\log 1.54 \times h_r)^2 - 1.1, \text{ en dB} \quad (I.8)$$

- Grande ville ($f_c > 300$ MHz) :

$$a(h_r) = 3.2 (\log 11.75 \times h_r)^2 - 4.97, \text{ en dB} \quad (I.9)$$

En milieu suburbain nous devons apporter une correction à la formule ci-dessus :

$$L_{50}(\text{suburban}) = L_{50}(\text{urban}) - 2 \left(\log \left(\frac{f_c}{28} \right)^2 \right) - 5.4 \quad (I.10)$$

En milieu rural :

- Environnement dégagé :

$$L_{50}(\text{rural}) = L_{50}(\text{urbain}) - 4.78 (\log(f_c))^2 - 18.33 \log(f_c) - 40.94 \quad (I.11)$$

- Environnement semi-dégagé :

$$L_{50}(\text{rural}) = L_{50}(\text{urbain}) - 4.78 (\log(f_c))^2 - 18.33 \log(f_c) - 35.94 \quad I.12)$$

I.12.5.1.2 Modèle Okumura-Hata

Le Modèle Okumura-Hata est le modèle le plus fréquemment utilisé, basé sur les mesures d'Okumura prises dans la région de Tokyo [19]. Ce modèle prend en considération plusieurs facteurs, essentiellement la nature de l'environnement en spécifiant son degré d'urbanisation (urbain, urbain dense, sous urbain, rural). L'affaiblissement de ce modèle est donné par :

Urbain :

$$L_U = 69.55 + 26.16 \log(f_c) - 13.82 \log(h_b) - a(h_r) + [44.9 - 3.55 \log(h_b)] \log(d) \quad (I.13)$$

Avec :

$$a(h_r) = [1.1 \log(f_c) - 0.7] \times h_r - [1.56 \log(f_c) - 0.8] \quad (\text{I. 14})$$

Rural :

$$L_R = L_U - 4.7 [(\log(f_c))^2 + 18.33 \log(f_c) - \alpha] \quad (\text{I. 15})$$

$\alpha = 40.94$ si la zone est rurale ouverte. Où : L_U et L_R = affaiblissement total dans les zones Urbains et ruraux, en dB ; f_c = fréquence, en MHz ; d = la distance entre la station mobile et BTS, en Km ; h_b , h_r = les hauteurs respectivement de BTS et de la station mobile, en m. Avec f désigne la fréquence en MHz $150 < f < 1000$

I.12.5.1.3 Modèle de COST231-Hata

Les membres du projet européen COST231 ont proposé d'étendre le modèle de Hata à des fréquences supérieures [20], notamment à cause du déploiement des réseaux GSM 1800 (Europe) et GSM 1900 (USA) aux milieux urbain et suburbain. La formule suivante a été proposée :

$$L_{50} = 46.3 + 33.9 \log(f_c) - 13.82 \log(h_b) - a(h_r) + [44.9 - 6.55 \log(h_b)] \log(d) + C_M \quad (\text{I. 16})$$

Avec : $C_M = 0$ dB pour les villes de tailles moyenne et $C_M = 3$ dB pour les grands centres métropolitains. $a(h_r)$ est identique à celui du modèle de Hata. Le domaine de validité de ce modèle est :

$$1500 \text{ MHz} < f < 2000 \text{ MHz}, 30 \text{ m} < h_b < 200 \text{ m}, 1 \text{ m} < h_r < 10 \text{ m}, 1 \text{ km} < d < 20 \text{ km}$$

I.12.5.1.4 Modèle d'Egli

L'un des modèles statistiques les plus connus pour prédire l'affaiblissement de propagation dans le milieu urbain ou milieu rural est celui de Egli . Comme dans le cas d'Okumura-Hata, il n'inclut pas les pertes de diffraction provoquée par propagation sur un terrain irrégulier ; Toutefois, Okumura prend implicitement en compte l'effet des bâtiments, ce qui n'est pas le cas pour Egli. Selon Egli, les pertes de propagation sont exprimées en tant que :

$$PL = 20 \log(f_c) + 40 \log(d) - 20 \log(h_b) + \begin{cases} 76.3 - 10 \log(h_r), & h_r \leq 10 \text{ m} \\ 76.3 - 10 \log(h_r), & h_r \geq 10 \text{ m} \end{cases} \quad (\text{I. 17})$$

Où : PL = affaiblissement total, en dB ; f_c = fréquence, en MHz ; d = la distance entre la station mobile et BTS, in Km ; h_b , h_r = les hauteurs respectives de BTS et de la station mobile, en m.

I.12.5.1.5 Le Modèle SUI

Stanford University Interim (SUI) est un modèle développé pour IEEE 802.16 par l'Université stanford [21, 22]. Il est utilisé pour les fréquences supérieures à 1900 MHz. Dans ce modèle de propagation, trois types différents de terrains ou de zones sont pris en compte. Ceux-ci sont appelés terrains A, B et C.

Terrain (A) représente une zone avec la perte de chemin la plus élevée, il peut être une région peuplée très dense tandis que le terrain (B) représente une zone avec une perte modérée de chemin, un environnement suburbain. Le terrain (C) à la moindre perte de trajectoire qui décrit une zone rurale ou plate. Dans le (Tableau I.5), ces différents terrains et différents facteurs utilisés dans le modèle SUI sont décrits.

Paramètres	Terrain A	Terrain B	Terrain C
a	4.6	4	3.6
b(1/m)	0.0075	0.0065	0.005
c(m)	12.6	17.1	20

Tableau I.5 : Différentes terrains et leurs paramètres.

L'affaiblissement de propagation dans le modèle SUI peut être décrite comme :

$$PL = A + 10 \gamma \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_f + X_h + S \quad (I.18)$$

Où : PL : La perte de chemin en dB ; d : La distance entre l'émetteur et le récepteur ; d₀ : La distance de référence (Ici sa valeur est de 100m) ; X_f : Le facteur de correction de fréquence ; X_h : Le facteur de correction pour la hauteur BTS ; A : L'affaiblissement du trajet en espace libre ; γ : L'exposant de l'affaiblissement du chemin ; S : Le facteur d'ombrage.

L'exposant de l'affaiblissement du chemin est décrit comme :

$$\gamma = a - bh_b + \frac{c}{h_b} \quad (I.19)$$

Où h_b est la hauteur de la station de base et a, b et c sont des facteurs de terrain listés comme indiqué dans le (Tableau I.5).

$$A = 20 \log \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) \quad (I.20)$$

Où : A : L'affaiblissement en espace libre ; d₀ : est la distance entre Tx et Rx ; λ : est la longueur d'onde.

Les facteurs de correction pour la fréquence et la hauteur de la station de base sont les suivants :

$$X_f = 6 \log \left(\frac{f_c}{2000} \right) \quad (I.21)$$

$$X_h = 10.8 \log \left(\frac{h_r}{2000} \right) \quad (I.22)$$

Où : f_c : La fréquence en MHz ; h_r : La hauteur de l'antenne du récepteur.

Ces expressions sont utilisées pour les terrains de type (A) et (B). Pour le terrain (C), l'expression ci-dessous est utilisée.

$$X_h = 20 \log \left(\frac{h_r}{2000} \right) \quad (I.23)$$

$$S = 0.65 (\log(f_c))^2 - 1.3 \log(f_c) + \alpha \tag{I.24}$$

Avec $\alpha = 5,2$ dB pour les environnements ruraux et suburbains (terrains C et B) et $6,6$ dB pour l'environnement urbain (terrain A).

I.12.5.1.6 Ericsson 9999

Le modèle Ericsson [23,24] est un modèle fourni par la société Ericsson à utiliser pour la planification des réseaux sans fil. Ce modèle a été développé sur la base du modèle Okumura-Hata modifié pour être utilisé dans différents environnements de propagation selon les paramètres indiqués dans le tableau suivant. L'affaiblissement est donné par :

$$PL = K_0 + K_1 \log(d) + K_2 \log(h_b) + K_3 \log(h_b) \log(d) - 3.2[\log(11.75 \times h_b)^2] + 44.9 \log(f_c) - 4.78 (\log(f_c))^2 \tag{I.25}$$

k_0, k_1, k_2 et k_3 : sont des valeurs qui sont modifiées en fonction des environnements (c'est-à-dire les zones). Pour les différentes zones, les paramètres sont décrits dans le (Tableau I.6) ci-dessous :

Environnement (type)	k0	k1	k2	k3
Rurale	45.95	100.6	12	0.1
Suburbaine	43.20	68.63	12	0.1
Urbaine	36.20	30.20	12	0.1

Tableau I.6 : les Valeurs de k_n en fonction des environnements.

I.12.5.2 Les modèles pour les petites cellules (micro-cells)

Contrairement aux modèles statistiques grandes-cellules qui prédisent une couverture radio moyenne et pas très précise essentiellement en milieu ouvert. Les modèles Micro-cellules essaient de prédire une zone de couverture moins étendue mais plus précise. Ces modèles sont essentiellement destinés aux installateurs de réseaux mobiles en environnement urbain ou semi-urbain [25]. Ces cellules ont un rayon de service de 1 à 4km. Elles sont adaptées à l'environnement urbain dense.

I.12.5.2.1 Le modèle de LEE

Le modèle de Lee (LEE, 1982) est basé sur des mesures réalisées dans différents environnements (espace libre, espace ouvert, périurbain, urbain) voir le (Tableau I.7).

Environnement	N	P ₀
Espace Libre	2	-45
Espace Ouvert	4,35	-49
Suburbain	3,84	-61,7
Urbain : Philadelphie	3,68	-70
Newark	4,31	-64
Tokyo	3,05	-84
New York City	4,08	-77

Tableau I.7 : Paramètres du modèle de Lee.

L'affaiblissement total est donné par la relation suivante :

$$PL = 10 n \log(d) - 20 \log(h_{b_{eff}}) - P_0 - 10 \log(h_r) + 29 \quad (I.26)$$

Avec : PL : affaiblissement total ; d : longueur de la liaison (en kilomètres) ; n et P_0 : paramètres déduits à partir de mesures faites sur le terrain Et dont la valeur est fonction du milieu géographique ; h_r : hauteur du mobile; h_b (eff): hauteur effective (voir la Figure I.19) de l'antenne d'émission.

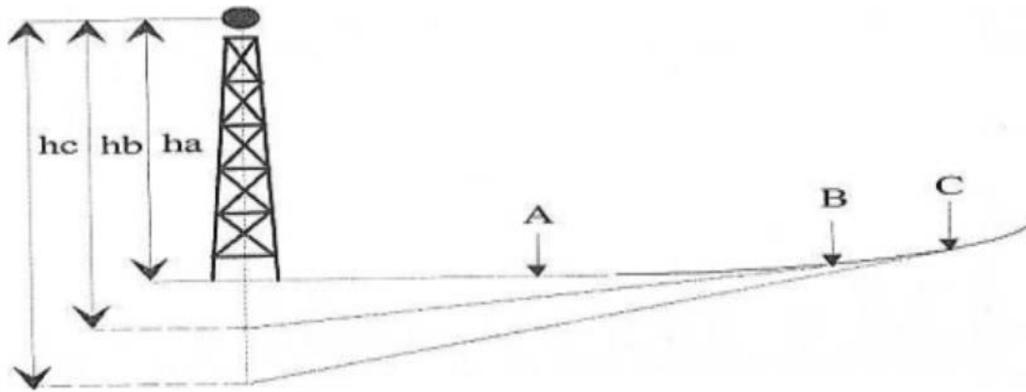


Figure I.19 : Détermination des différentes hauteurs équivalentes de l'antenne d'émission.

La hauteur effective de l'antenne d'émission est déterminée en projetant la pente du terrain à proximité du dispositif mobile sur l'emplacement de la station de base portant l'émetteur. La (Figure I.19) schématise la variation de la hauteur effective de l'antenne d'émission (h_a , h_b , h_c) pour différentes positions du mobile en fonction de la pente du terrain (avec A, B, C : pente du terrain plus 1.5 mètres, correspondant à la position du mobile).

I.12.5.2.2 Le modèle COST-CNET

L'amélioration des moles de propagation purement statistiques pour les petites cellules en milieu périurbain et urbain est obtenue par l'intégration du mode profil et de différents algorithmes de diffraction multiple sur une succession d'arêtes. Le modèle COST-CNET est un modèle semi empirique en 2D qui a été développé pour modéliser le signal radio des petites cellules (micro cellules) d'un réseau radio mobile, particulièrement adapté à l'ingénierie du GSM à 900 MHz et du DECT156 à 1800 MHz, avec une émission de 5 à 15 mètres au-dessus des toits. Il a été élaboré par FTR&D (anciennement CNET : Centre National d'Etude des Télécommunications) dans le cadre du programme européen COST 231 (voir la Figure I.20).

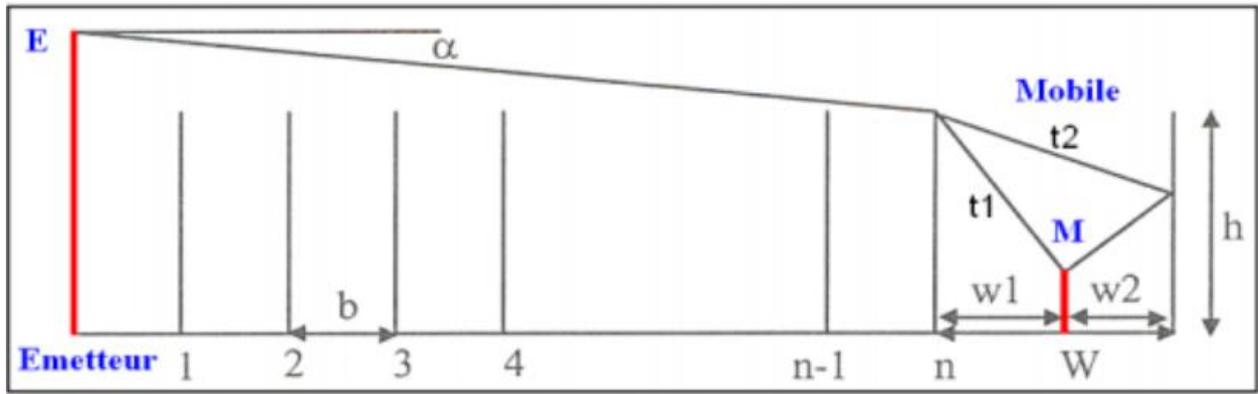


Figure I.20 : Profil E-R considéré par le modèle COST-CENT.

Avec : h : Hauteur des bâtiments ; b : Distance entre les bâtiments ; W : Largeur de la rue dans laquelle est localisé le mobile ; w_1 : Distance entre le mobile et le bâtiment sur lequel l'onde radio est diffractée, w_2 : Distance entre le mobile et le bâtiment sur lequel l'onde radio est réfléchié ; N : Arêtes des bâtiments (façades, coins de bâtiment) ; t_1 : Trajet de l'onde diffractée par la dernière arête au niveau du toit ; t_2 : Trajet de l'onde réfléchié sur la façade de l'immeuble opposé ; A : Angle formé entre l'horizontale et la direction de propagation de l'onde radio émise depuis l'émetteur ; M : Le mobile ; E : L'émetteur.

Les formules de calcul permettent alors de calculer l'affaiblissement total de la liaison qui est en fait la somme de 3 composantes :

$$PL_{total} = PL_0 + PL_{msd} + PL_{rst} + PL_{deg} \quad I.27$$

Avec : PL_{total} : Affaiblissement total ; PL_0 : Affaiblissement d'espace libre ; PL_{msd} : Affaiblissement de diffraction multiple sur les $n-1$ arêtes ; PL_{rst} : Affaiblissement dans la rue du mobile (superposition du trajet 1 et du trajet 2) ; PL_{deg} : Affaiblissement lié à la diffraction sur l'arête principal

I.12. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu des différents composants et caractéristiques de la technologie LTE (quatrième génération) afin de présenter par la suite la terminologie des termes utilisés dans cette technologie. Nous nous sommes aussi intéressés à la présentation des modèles empiriques pour la prédiction de la propagation RF les plus couramment utilisés. Ces modèles de propagation ne sont que des formules mathématiques obtenues à partir des statistiques sur un très grand nombre de mesures dans réalité et dans différents environnements. Ils traduisent l'affaiblissement en fonction de plusieurs paramètres tels que les hauteurs des bâtiments, du mobile, de la station de base, des distances etc. Toutefois un ajustement de quelques paramètres pour améliorer la précision des modèles doit être faite. Le modèle de propagation des ondes radio ou perte de trajet modèle joue un rôle très important dans la planification. Dans ce travail, une comparaison sera faite entre les

différents modèles de propagation radio proposés qui seraient utilisés pour le LTE, comme : le modèle Stanford University Interim (SUI), le modèle Okumura-Hata. Dans le chapitre suivant, nous allons présenter l'algorithme PSO pour l'optimisation de ces modèles empiriques.

CHAPITRE

02

II. Optimisation du modèle de propagation RF

Par l'algorithme PSO

II.1 Introduction

Les métaheuristiques, avec leur aspect stochastique (dépend de variables aléatoires) sont reconnues pour être des algorithmes d'optimisation performants visant à résoudre des problèmes d'optimisation difficile qui n'ont pas de méthode classique plus efficace [13]. En comportant comme des algorithmes de recherche, elles tentent à apprendre les caractéristiques d'un problème afin d'en trouver une meilleure solution. Il existe un grand nombre de métaheuristiques différentes, qui permettent d'être adaptées à une large gamme de problèmes différents. L'optimisation par Essaim de particule (OEP) ou bien (PSO **Particle Swarm Optimization**), est une technique d'optimisation stochastique développée par Russel Eberhart (ingénieur en électricité) et James Kennedy (socio-psychologue) en 1995 [26], inspirée du comportement social des oiseaux en vol (voir figure II.1) ou des poissons en bancs et basée sur la notion de collaboration entre les particules aux capacités assez limitées pour arriver à résoudre un problème quelconque en trouvant l'ensemble des paramètres qui maximise/minimise un objectif particulier[26]. Ainsi, grâce à des règles de déplacement très simples (dans l'espace des solutions), les particules peuvent converger progressivement vers un optimum global. Le système qui est initialisé avec une population de solutions aléatoires, recherche un optimum en actualisant les générations. Les solutions potentielles, appelées particules, volent à travers l'espace du problème en suivant les particules optimales actuelles [26].

Dans ce chapitre, nous allons présenter le principe de fonctionnement de l'Optimisation d'Essaim de Particules (PSO), ainsi que la conception et comment se déroule l'algorithme PSO. Ensuite, nous allons élaborer l'algorithme d'optimisation des modèles de propagation empiriques OKUMURA-HATA et SUI basé sur des calculs évolutifs qui dépendent de l'intelligence de l'essaim. Nous intéressons aussi à l'application du PSO sur un modèle empirique de prédiction pour plusieurs régions en comparant aussi les mesures expérimentales réelles prise dans la région de la wilaya de Tébessa, Algérie.



Figure II.1 : Essaims des oiseaux en vol

II.2 Principe de fonctionnement de l'optimisation d'Essaim de Particules (Particle Swarm Optimization : PSO)

II.2.1 Définition de l'optimisation et de la fonction objective

L'optimisation mathématique est la sélection du meilleur élément, au regard d'un certain critère, à partir d'un ensemble d'alternatives disponibles. L'optimisation consiste à trouver les "meilleures valeurs disponibles" d'une fonction objective donnée à maximiser ou minimiser en choisissant systématiquement des valeurs d'entrée dans un ensemble autorisé et en calculant la valeur de la fonction [13]. Le terme fonction objective désigne une fonction qui sert à déterminer la meilleure solution à un problème d'optimisation. En associant une valeur à une instance d'un problème d'optimisation. Le but du problème d'optimisation est alors de minimiser ou de maximiser cette fonction jusqu'à l'optimum, par différents procédés comme l'algorithme PSO. Concrètement, ces fonctions objectives parcourent l'ensemble des solutions possibles de l'espace de recherche local et sont, à chaque itération, comparés à des optimums définis [13]. Leur égalité (ou presque égalité dans le cas d'une garantie de performance) conduit alors à l'état final et ainsi à la solution.

II.2.2 Motivation de l'utilisation de l'algorithme P.S.O

Plusieurs métaheuristiques sont développées afin de résoudre un problème d'optimisation. La difficulté réside alors dans le choix de la méthode la plus appropriée. De nombreuses métaheuristiques mettent en œuvre une certaine forme d'optimisation stochastique, la plus courante est la descente stochastique : on part d'une solution initiale, on la compare à tous ses voisins en conservant à chaque fois le meilleur résultat [13]. L'optimisation par essaim particulaire a gagné la popularité croissante parmi des chercheurs et des praticiens comme une technique robuste et efficace pour résoudre des problèmes d'optimisation difficiles, facile à programmer, quelques lignes de code suffisent dans n'importe quel langage évolué. Cette technique est fondée sur la notion de coopération et l'échange d'information entre les particules. Les individus de l'algorithme sont appelés particules et la population est appelée essaim [26].

Chaque individu dans l'essaim est représenté par un vecteur dans l'espace de recherche multidimensionnel. Ce vecteur a également un vecteur assigné qui détermine le prochain mouvement de la particule et s'appelle le vecteur de vitesse. Chaque particule interroge chaque congénère de proximité sur sa meilleure performance. Sur la base des informations dont elle dispose, chaque particule modifie sa vitesse d'une manière stochastique en fonction de sa propre vitesse actuelle, sa meilleure performance et la meilleure performance de ses voisins [26].

Le déplacement d'une particule est influencé par trois composantes (Figure II.2) : (1) une composante physique : la particule tend à suivre sa direction courante de déplacement ; (2) une composante cognitive : la particule tend à se diriger vers le meilleur site par lequel elle est déjà passée ; (3) une composante sociale : la particule tend à se fier à l'expérience de ses congénères et, ainsi, à se diriger vers le meilleur site déjà atteint par ses voisins [26].

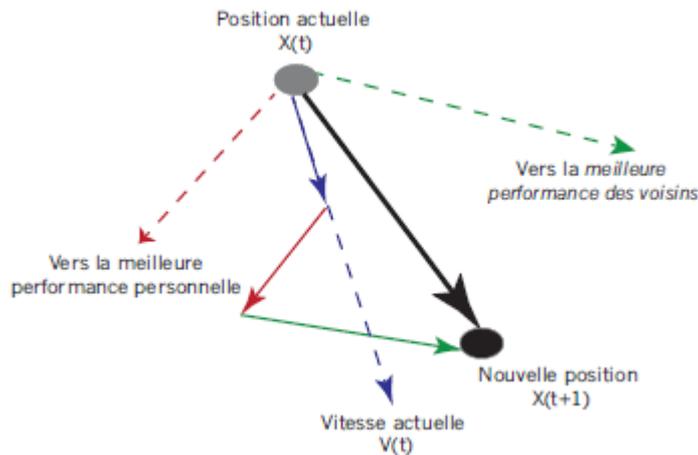


Figure II.2 : PSO - schéma de principe du déplacement d'une particule

Le voisinage constitue la structure du réseau social. Les particules à l'intérieur d'un voisinage communiquent entre-elles. Différents voisinages ont été étudiés [26]. Les particules à l'intérieur d'un voisinage communiquent entre-elles, et sont connues comme une sociométrie qui suit trois types de topologie (Anneau, Etoile, Rayon) représentés comme ce suit (voir la Figure II.3) :

- **Topologie en anneau** : chaque particule communique avec n voisines immédiates. Chaque particule tend à se déplacer vers la meilleure dans son voisinage local [26].
- **Topologie en étoile** : le réseau social est complet, donc une communication complète et une attirance vers la meilleure particule [26].
- **Topologie en rayon** : une particule « centrale » est connectée à toutes les autres. Seule cette particule centrale ajuste sa position vers la meilleure, si cela provoque une amélioration l'information est propagée aux autres [26].

Le choix de la topologie de voisinage a un grand effet sur la propagation de la meilleure solution trouvée par l'essaim. Cependant, en utilisant les topologies anneau et rayon ralentiront la convergence parce que la meilleure solution trouvée doit propager par plusieurs voisinages avant d'affecter toutes les particules dans l'essaim. Cette propagation lente permettra aux particules d'explorer plus les secteurs dans la recherche et diminuent ainsi la chance de la convergence [26].

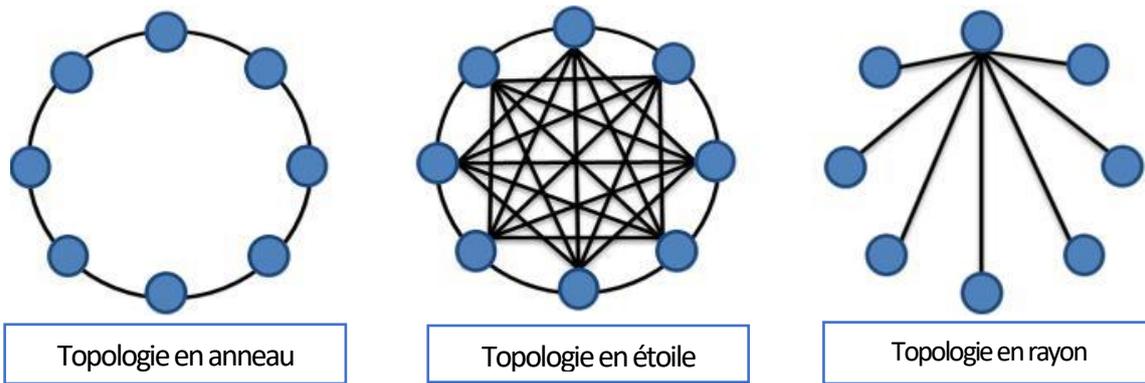


Figure II.3 : Différents topologies pour un essaim des particules

II.2.3 Les éléments de l'algorithme P.S.O [26]

Pour appliquer la PSO, il faut définir un espace de recherche constitué de particules et une fonction objective à optimiser. Le principe de l'algorithme est de déplacer ces particules afin qu'elles trouvent l'optimum. Chacune de ces particules est dotée :

- ✓ D'une position, c'est-à-dire ses coordonnées dans l'ensemble de définition.
- ✓ D'une vitesse qui permet à la particule de se déplacer. De cette façon, au cours des itérations, chaque particule change de position. Elle évolue en fonction de son meilleur voisin, de sa meilleure position, et de sa position précédente. C'est cette évolution qui permet de tomber sur une particule optimale.
- ✓ D'un voisinage, c'est-à-dire un ensemble de particules qui interagissent directement sur la particule, en particulier celle qui a le meilleur critère.

A tout instant, chaque particule connaît :

- ✓ Sa meilleure position visitée. On retient essentiellement la valeur du critère calculée ainsi que ses coordonnées.
- ✓ La position du meilleur voisin de l'essaim qui correspond à l'ordonnement optimal.
- ✓ La valeur qu'elle donne à la fonction objective car à chaque itération il faut une comparaison entre la valeur du critère donnée par la particule courante et la valeur optimale.

Le voisinage d'une particule est le sous-ensemble de particules de l'essaim avec lequel il a une communication directe. Ce réseau de rapports entre toutes les particules est connu comme la sociométrie, ou la topologie de l'essai.

II.2.4 Définition de la position et de la vitesse courante associée à une particule

Chaque particule représente une solution potentielle dans l'espace de recherche. Une particule est décrite par leurs propriétés ayant deux caractéristiques : position et vitesse [26]. La nouvelle position d'une particule est déterminée en fonction de sa propre valeur et celle de ses

voisines. Soit $\vec{X}_i(t)$ la position de la particule P_i au temps (t) . La position est modifiée en ajoutant une vitesse \vec{V}_i à sa position courante ; les propriétés des particules changent à chaque itération. Elles sont mises à jour par les équations [26] :

- La position au temps (t) de la particule est alors définie par :

$$\vec{X}_i(t) = \vec{X}_i(t-1) + \vec{V}_i(t) \quad (\text{II. 1})$$

- La vitesse au temps (t) De la particule est alors définie par :

$$V_{ij}(t) = \omega V_{ij}(t-1) + c_1 \cdot \text{rand1}[P_{bestij}(t-1) - X_{ij}(t-1)] + c_2 \cdot \text{rand2}[g_{bestj}(t-1) - X_{ij}(t-1)] \quad (\text{II. 2})$$

Avec : $i = 1, 2, \dots, N_p$; $j = 1, 2, \dots, N_d$.

Où :

- N_p : Le nombre de particules de l'essaim.
- N_d : Le nombre de variables du problème (dimension d'une particule).
- $iter_{max}$: Le nombre maximal d'itération.
- V_{ij} : La vitesse de la $j^{ième}$ composante de la $i^{ième}$ particule de l'essaim.
- P_{bestij} : est la $j^{ième}$ composante de la meilleure position occupée par la $i^{ième}$ particule de l'essaim, enregistrée dans les itérations précédentes (particule best).
- g_{bestj} : La $j^{ième}$ composante de la meilleure position occupée par la meilleure particule globale de l'essaim (global best).
- X_{ij} : La $j^{ième}$ coordonnée de la position actuelle de la particule i .
- c_1 et c_2 : Les coefficients d'accélération (c_1 contrôle le comportement cognitif de la particule et c_2 contrôle l'aptitude sociale de la particule), dont le but de caractériser la capacité de la particule à chercher dans un autre endroit de l'espace de recherche. Ces coefficients contrôlent l'influence stochastique des composantes cognitive et sociale sur la vitesse globale d'une particule. Les constantes c_1 et c_2 sont également appelées paramètres de confiance, où c_1 exprime le degré de confiance d'une particule en elle-même, tandis que c_2 exprime le degré de confiance d'une particule en ses voisins. En général on choisit et tels que : randm_1 et randm_2 sont deux nombres aléatoires compris entre 0 et 1. Pour une bonne convergence de l'algorithme, les valeurs de c_1 et c_2 ne doivent pas être choisies indépendamment l'un de l'autre. En pratique le premier doit être un peu inférieure à 2 et le second peut être calculé par la formule :

$$c_2 = (2/0,97725) c_1 \quad (\text{II. 3})$$

- ω : Une pondération qui change à chaque itération (coefficient d'inertie) pour contrôler

l'influence de la direction de la particule sur le déplacement futur. Le but de l'introduction de ce paramètre est de réaliser un équilibre entre la recherche locale (exploitation) et la recherche globale (exploration). Elle est calculée par l'expression :

$$\omega(ite\text{r}) = \omega_{\text{max}} \frac{\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{min}}}{ite\text{r}_{\text{max}}} ite\text{r} \quad (\text{II. 4})$$

Avec :

- **Iter** : Le rang de l'itération actuelle
- **ω_{max}** : la valeur initiale de la pondération, on la prend généralement égale à 0.9.
- **ω_{min}** : la valeur finale de la pondération, elle est comprise entre 0.3 et 0.4

L'évolution de la vitesse d'une particule est la somme des trois parties qui ont les significations suivantes :

- **La première partie** : $(\omega V_{ij}(t-1))$: correspond la direction précédente (déplacement physique). Il signifie que la particule continue d'évoluer dans le même sens. Ce terme de mémoire peut être vue comme élan, qui empêche la particule de la direction rigoureusement changeante, et à la polarisation vers la direction courante. Ce composant désigné également sous le nom du composant d'inertie.

- **La deuxième partie** : $(c_1 \cdot \text{rand}1 [P_{\text{best}ij}(t-1) - X_{ij}(t-1)])$: correspond à la composante cognitive. Il indique la direction vers la meilleure position déjà occupée par la particule X_{tj} (elle fait confiance à ça propre expérience). Le composant cognitif ressemble la mémoire individuelle de la position qui était la meilleure pour la particule. L'effet de ce terme est que ces particules sont attirées à leurs propres meilleures positions, ressemblant la tendance des individus de retourner aux situations ou aux endroits qui les ont satisfaits plus dans le passé. Kennedy et Eberhart se sont également référés au composant cognitif comme « nostalgie » de la particule.

- **La troisième partie** : $(c_2 \cdot \text{rand}2 [g_{\text{best}j}(t-1) - X_{ij}(t-1)])$: correspond à la composante sociale du déplacement. Il indique la direction vers la meilleure position déjà occupée par l'ensemble de l'essaim (elle fait confiance au groupe). Conceptuellement, la composante sociale ressemble à une norme de groupe que les individus cherchent à atteindre. L'effet du composant social est que chaque particule est attirée vers la meilleure position trouvée par son voisinage.

Ensuite, chacun de ces trois termes est pondéré par un coefficient qui permet de favoriser l'un ou l'autre de ces trois termes puisqu'à la fin on fait leur somme. La (Figure II.4) illustre ce principe.

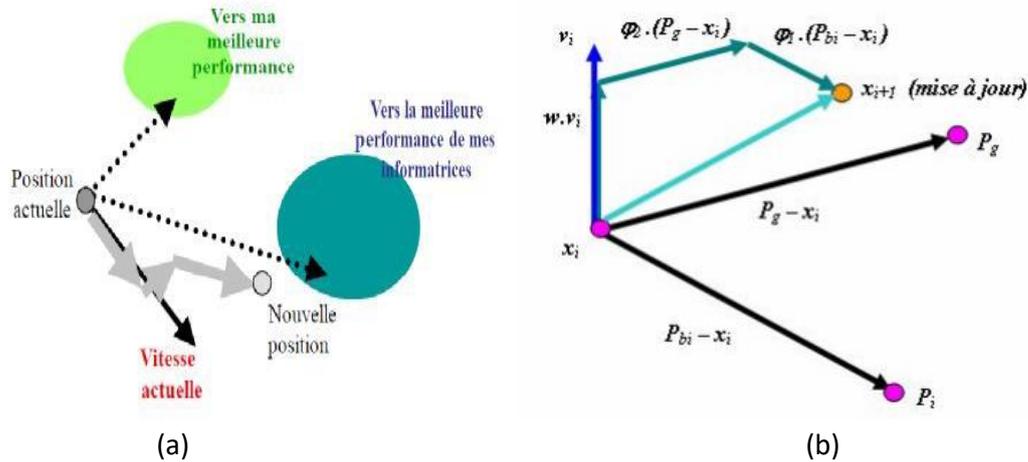


Figure II.4 : (a) schéma de principe du déplacement d'une particule, (b) schéma vectorielle du déplacement

II.3 Conception et déroulement de l'algorithme

II.3.1 Conception de l'algorithme

Un algorithme PSO trouve une solution en recherchant un extremum (maximum ou minimum) sur un ensemble de solutions possibles. L'ensemble des solutions est appelé espace de recherche. Le principe de l'algorithme PSO est appliqué pour résoudre un problème de minimisation ou de maximisation, considérons le problème d'optimisation suivant [13]:

$$\min\{(X_j)\} \text{ avec } j = 1,2,3 \dots d \quad (\text{II.5})$$

La fonction fitness (fonction objective) associée est définie par :

$$\text{fitness}(X_j) = f(X_j) \quad (\text{II.6})$$

L'algorithme est construit en utilisant la procédure décrite ci-dessous :

- Initialisation** : Les particules sont initialisées avec des positions et des vitesses aléatoires et les paramètres nécessaires.
- Évaluation** : La valeur de la fonction objective est mesurée pour chaque particule.
- Trouver le P_{bestij}** : Si la valeur de la fonction objective pour la particule i est meilleure que P_{bestij} celle de la particule i , la valeur actuelle de la fonction objective est définie comme la nouvelle P_{bestij} de la particule i .
- Trouver le g_{bestj}** : Si n'importe quel P_{bestij} est meilleur que le g_{bestj} , la valeur actuelle de g_{bestj} est fixée à la valeur actuelle.
- Mise à jour de la vitesse et de la position** : La vitesse de chaque particule est mise à jour selon l'équation (de vitesse), et la particule est déplacée vers la position suivante selon l'équation (de déplacement).

- f. **Critère d'arrêt** : Si le nombre d'itérations est atteint, l'algorithme est arrêté, sinon il retourne à l'étape b.

Les étapes de l'algorithme PSO sont résumées dans l'organigramme suivant :

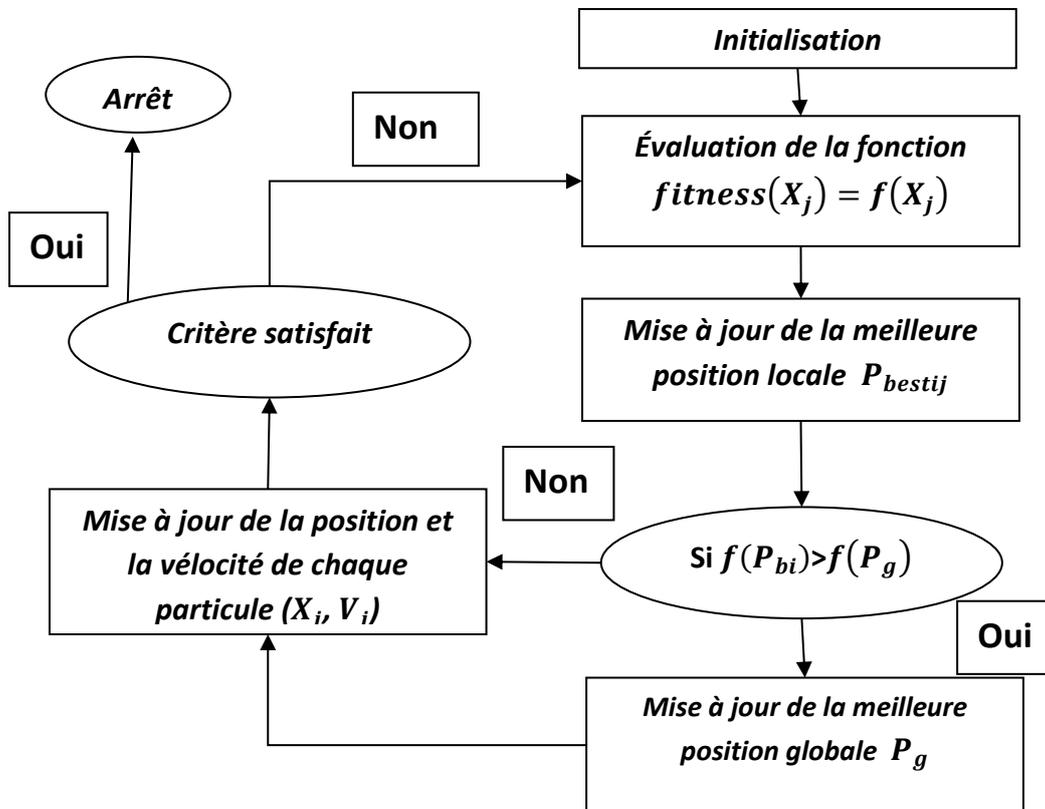


Figure II.5 : Organigramme générale de l'algorithme PSO

L'algorithme PSO à six paramètres à prendre en considération pour son déroulement :

- La dimension du problème.
- Le nombre de particules (la taille d'essaim).
- Les valeurs des coefficients.
- La taille du voisinage.
- La vitesse maximale.
- L'inertie.

II.3.2 Déroulement de l'algorithme PSO

Si l'on considère N particules et que chaque particule compare sa nouvelle position à sa meilleure position obtenue, c'est-à-dire qu'on ne prend pas compte du voisinage puisqu'on utilise uniquement l'amélioration obtenue sur la particule elle-même, cela donne l'algorithme 1. f : étant la fonction fitness.

Algorithme PSO. Sans considération de voisinage [26]

*(Les variables et paramètres de l'algorithme)**N : nombre de particule* *X_i : Position de la particule P_i* *V_i : Vitesse de la particule P_i* *P_{best_i} : meilleure fitness obtenue pour la particule P_i* *Y_i : Position de la particule P_i pour la meilleure fitness* *ρ : Valeur aléatoire positive***[Initialisation]***Initialiser aléatoirement la population**Pour chaque particule $i \in \{1, \dots, N\}$ Faire**Initialiser aléatoirement X_i ,**Initialiser aléatoirement V_i (ou bien $V_i=0$)**$y_i = X_i$;**Fin pour***[Traitement]***Répéter**Pour i de 1 à N faire**Si ($f(x_i) > p_{best_i}$) Alors**$p_{best_i} \leftarrow f(x_i)$* *$y_i \leftarrow x_i$;**Fin si**$V_i(t+1) \leftarrow V_i(t) + \rho(y_i(t) - x_i(t))$* *$x_i(t+1) \leftarrow x_i(t) + v_i(t+1)$* *Fin pour**Jusqu'à ce que (**le processus converge**)***II.3.3 Inconvénient de l'algorithme PSO [26]**

Le PSO et d'autres algorithmes de recherche stochastiques ont deux principaux inconvénients :

- **Le premier inconvénient** est que l'essaim peut prématurément converger :
 - Quand des individus attirent l'essaim vers un optimum local.
 - Une mauvaise initialisation de la population.

Bien que le PSO trouve de bonnes solutions dans un temps beaucoup plus court que d'autres algorithmes évolutionnaires, l'amélioration de la qualité des solutions ne peut être garantie en augmentant le nombre d'itération.

- **Le deuxième inconvénient** est que les approches stochastiques ont un problème de dépendance. Cette dépendance résulte habituellement des arrangements de paramètres de chaque algorithme. Ainsi, en utilisant de différents arrangements de paramètres pour un seul algorithme de recherche stochastique on obtient des résultats de haute performance. Mais en général, l'arrangement d'un paramètre ne peut être appliqué à tous les problèmes.

II.4 Application de l'algorithme PSO à l'optimisation des modèles empiriques de propagation OKUMURRA-HATTA et SUI

Dans cette partie, nous allons présenter l'optimisation par la technique PSO, des paramètres prédéfinis des modèles empiriques choisis (voir le Déroulement de l'algorithme PSO).

II.4.1 Les données et l'analyse de l'affaiblissement

Le PathLoss, ou L'affaiblissement du trajet est la réduction de la densité de puissance (atténuation) d'une onde électromagnétique lorsqu'elle se propage dans l'espace. L'affaiblissement du trajet est une composante majeure de l'analyse et de la conception du bilan de liaison d'un système de télécommunication. Ce terme est couramment utilisé dans les communications sans fil et la propagation des signaux. Il peut être dû à de nombreux effets, tels que l'affaiblissement en espace libre, la réfraction, la diffraction, la réflexion. Il est également influencé par les contours du terrain, l'environnement (urbain ou rural), le milieu de propagation (air sec ou humide), la distance entre l'émetteur et le récepteur, ainsi que la hauteur et l'emplacement des antennes.

Dans les cas pratiques, le PathLoss est calculé à l'aide de diverses approximations à l'aide méthodes statistiques (également appelées stochastiques ou empiriques) qui sont basées sur des pertes mesurées et moyennées le long de classes typiques de liaisons radio. Ces méthodes sont également connues sous le nom de modèles de propagation des ondes radio l'un des modèles plus utilisés est le modèle **Okumura-Hata**.

L'approche d'optimisation du modèle de propagation proposée ici est basée sur l'algorithme d'optimisation par essaims de particules (PSO). Elle permet d'optimiser les cinq paramètres du modèle Okumura-Hata et quatre paramètres dans le modèle de propagation SUI. PSO peut produire non seulement une solution, mais un ensemble de solutions possibles, parmi lesquelles la meilleure est sélectionnée.

- **Le Modèle Okumura-Hata** : L'affaiblissement selon ce modèle est donné par :

- **Dans un milieu Urbain :**

$$L_u = 69.55 + 26.16 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(hb) - a(hm) \\ + [44.9 - 6.55 \log_{10}(hb)] \log_{10}(d)$$

Avec : $a(hm) = [1.1 \log_{10}(f) - 0.7] * hm - [1.56 \log_{10}(f) - 0.8]$

- **Dans un milieu Rural :**

$$L_r = L_u - 4.7 [\log_{10}(f)]^2 + 18.33 \log_{10}(f) - \alpha$$

Avec : $\alpha = 40.94$ si la zone est rurale ouverte ; où : L_u et L_r : Affaiblissement total dans une région urbaine et rurale, en dB.

- **Le modèle SUI :** L'affaiblissement selon ce modèle peut être décrite comme :

$$PL = A + 10 \gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_f + X_h + S$$

Où : PL : La perte de chemin en dB ;

d : La distance entre l'émetteur et le récepteur ; d_0 : La distance de référence (100m) ;

X_f : Le facteur de correction de fréquence ; X_h : Le facteur de correction pour la hauteur BTS ;

A : L'affaiblissement du trajet en espace libre ; γ : L'exposant de l'affaiblissement du chemin ;

S : Le facteur d'ombrage.

$$\gamma = a - b h_b + \frac{c}{h_b}$$

Où h_b est la hauteur de la station de base et a, b et c sont des facteurs de terrain listés.

II.4.2 Algorithme PSO appliqué au modèle

En formulant le problème à résoudre comme une équation mathématique L de modèle Okumura-Hata, on obtient cinq variables k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 évaluées par une fonction de sortie à un critère d'arrêt qui dépend de la performance de celui-ci. Cette fonction de sortie est généralement définie comme la MSE (Erreur Quadratique Moyenne : Mean Square Error). Avec, k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 : les facteurs de Modèle de propagation optimisé. On va adapter le PSO pour notre problème comme suit :

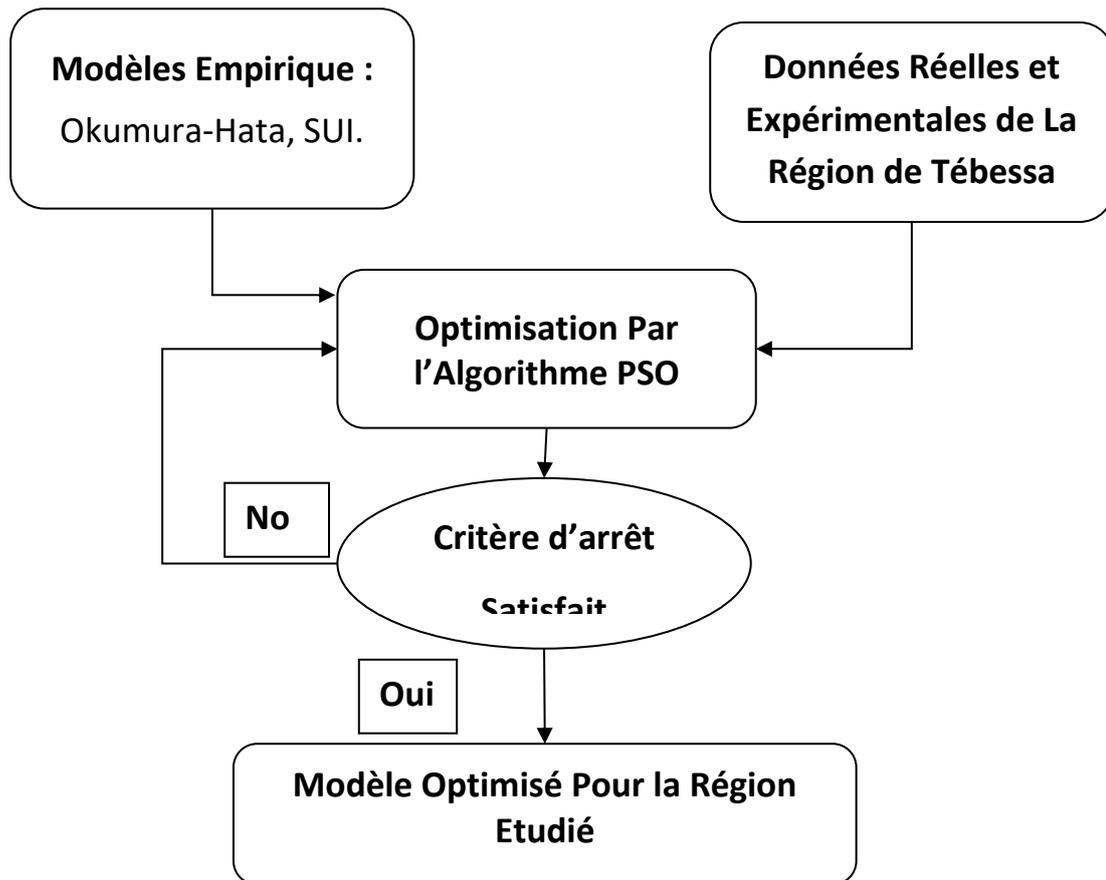


Figure II.6 : Organigramme de processus d'optimisation

L'Optimisation par PSO emploie une population composée de Np particules, avec un nombre d'itération i entre 5 et 100. Avec la définition de la fonction objective de fitness. En exécutant l'algorithme itération par itération, les particules de la population changes de position et de vitesse en se rapprochant de plus en plus l'optimum. Jusqu'à atteindre le nombre maximum d'itération.

- Pour un nombre total de particules Np de dimension $N_d=5$ ayant les positions $(X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}, X_{i4}, X_{i5}) = (k_{i1}, k_{i2}, k_{i3}, k_{i4}, k_{i5})$, et les facteurs cognitifs $c_1=0,5$ et $c_2=0,8$.

Le processus de l'algorithme est résumé par les étapes suivantes :

- **Etape 1** : Initialiser de manière aléatoire les positions de $k_{i1}, k_{i2}, k_{i3}, k_{i4}, k_{i5}$ et les vitesses des particules avec des valeurs distribuées respectivement, et avec tous les parametres nécessaires.

- **Etape 2** : Evaluer la fonction objectif $\min(\mathbf{L}(k_{i1}, k_{i2}, k_{i3}, k_{i4}, k_{i5}))$ à chacune des positions X_{ij}^0 à l'itération initiale $n = 0$ et déterminer P_{bestij} et g_{bestj} .

- **Etape 3** : Evaluer la pondération $\omega(iter) = \omega_{max} \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{iter_{max}} iter$

Avec $iter = \{1, .. iter_{max}\}$.

- **Etape 4** : Déterminer la fonction fitness $(X_{ij}) = \mathbf{L}(X_{ij})$ et évaluer la fonction objective associée à chacune des postions X_{ij} et mettre à jour la position et la vitesse de chaque particule. Si

la valeur de la position X_{ij} est meilleure que son P_{bestij} courante, P_{bestij} prend cette nouvelle valeur. Si la meilleure valeur de P_{bestij} est meilleure que g_{bestj} Courante, g_{bestj} est remplacé par cette meilleure valeur et la position qui correspond à cette meilleure valeur est ainsi stockée.

- **Etape 5** : Vérifier à chaque fois le critère d'arrêt. Si le critère d'arrêt n'est pas satisfait, aller vers l'étape 2, Si le critère d'arrêt est satisfait le programme se termine, est produite $(X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}, X_{i4}, X_{i5}) = (k_{i1}, k_{i2}, k_{i3}, k_{i4}, k_{i5})$.

II.5 Conclusion.

Dans ce chapitre nous avons présenté l'algorithme d'optimisation par essaim particulaire PSO basé sur la simulation du comportement des oiseaux. Simple à comprendre, à programmer et à utiliser, PSO présente un fort potentiel d'application pratique qui semble à être très efficace pour optimiser une large gamme des fonctions. En plus de ses liens avec la vie ordinaire, l'optimisation par essais de particules a des liens directs avec le calcul évolutif (un ensemble initial de solutions candidates est généré et mis à jour de manière itérative). L'ajustement vers **pbest** et **gbest** par PSO dépend fortement des processus stochastiques pour converger vers des "meilleures" solutions. Nous avons opté pour l'algorithme PSO car il est bien adapté au problème posé et très performant en termes de la précision des solutions trouvées, du temps de calcul et du nombre de paramètres à ajuster. Dans le chapitre suivant, nous allons présenter les résultats obtenus pour l'optimisation par PSO des modèles empiriques choisis à savoir le modèle Okumura-Hata et le modèle SUI. Pour valider cette optimisation, nous avons aussi testé et élaboré un algorithme pour optimiser les valeurs mesurées et expérimentales de l'affaiblissement dans l'antenne 4G de l'université de Tébessa, TEBESSA, Algérie.

CHAPITRE

03

III. RESULTATS

ET INTERPRETATIONS

III.1 Introduction

La problématique étudiée dans ce mémoire étant la simulation de l'algorithme d'optimisation des performances des réseaux LTE (4G), et en particulier les paramètres de l'affaiblissement (PathLoss) implémenter dans les différentes zones et en utilisant plusieurs modèles empiriques. Les modèles empiriques ont l'avantage d'être simple et de faiblement dépendre des caractéristiques d'un site. C'est pourquoi ils sont couramment employés pour les communications cellulaires pour une première estimation de la perte de propagation. L'affaiblissement (PathLoss) du trajet est une composante majeure de l'analyse et de la conception du bilan de liaison d'un système de télécommunication. Ce terme est couramment utilisé dans les communications sans fil et la propagation des signaux. Il peut être dû à des nombreux paramètres, tels que l'affaiblissement en espace libre, la réfraction, la diffraction, la réflexion, etc... Il est également influencé par les contours du terrain, l'environnement (urbain ou rural), le milieu de propagation (air sec ou humide), la distance entre l'émetteur et le récepteur, ainsi que la hauteur et l'emplacement des antennes. Le deuxième objectif visé par notre travail est de pouvoir ajustés et prédire ces valeurs en minimisant l'erreur entre les valeurs prédites et les valeurs réelles pour le choix du modèle le plus approprié et le plus robuste pour chaque zone. Pour arriver à ces fins, nous avons choisi l'utilisation de l'algorithme PSO pour l'optimisation des modèles empirique. Ce chapitre sera consacré aux résultats obtenus pour l'étude de l'influence de la variation de certains paramètres sur l'affaiblissement des trois modèles empiriques choisis. Ensuite, les résultats de l'optimisation de ces modèles RF par PSO avec une simulation réelle de la région de Tébessa et ceci pour valider le modèle choisi.

L'Environnement de travail :

L'environnement de programmation est Matlab R2015a, afin de bénéficier de ses Toolbox. La configuration matérielle utilisée dans notre implémentation est :

- **MATLAB R2015a.**

Le processus d'implémentation des méthodes sera exécuté sur un pc Dell Inspiron 3542 qui a les spécifications suivantes :

- **Processeur:** Intel(R) Celeron(R) 2957U @ 1.40GHz (2 CPUs), 1.4GHz.
- **RAM:** 4096MB (4.00 GB).
- **System d'opération:** Windows 10 Pro 64-bit version 20H2 (10.0, Build 19042).

À contacter l'encadreur

À contacter l'encadreur

III.3 Conclusion

Dans la première partie de la simulation, nous avons étudié trois modèles empiriques macro-cellules. Nous avons montré l'influence d'un ensemble de paramètres tel que : le mode de propagation, la variation de la distance entre l'émetteur et le récepteur, la hauteur de l'eNodeB, et la fréquence sur les performances de la liaison radio d'un système 4G/LTE. D'après les résultats obtenus, les types de milieu sur lesquels se propage les ondes électromagnétiques influent directement sur l'affaiblissement alors que la propagation est meilleure lorsque les obstacles sont réduits. Dans notre cas, le modèle empirique Okumura-Hata a montré une robustesse et des performances. Le travail proposé s'est concentré aussi sur l'optimisation d'un modèle de

propagation le mieux adapté pour une meilleure prédiction de l'affaiblissement d'un réseau 4G LTE dans un environnement urbain, nous avons choisi la région de Tébessa. L'affaiblissement mesuré a été comparé à l'affaiblissement à 1800 MHz. Le modèle Okumura-Hata s'est avéré le plus précis pour l'environnement Tébessa et un modèle Okumura-Hata optimisé a été développé et jugé satisfaisant pour l'environnement.

CONCLUSION

GENERALE

Conclusion Générale

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes intéressés au problème d'affaiblissement de trajet dans les réseaux de la quatrième génération de la téléphonie mobile. L'objectif principal est d'optimiser la propagation de la couverture radio de ce réseau.

A partir des calculs ci-dessus, nous concluons que lorsque la hauteur de la station de base change, la valeur de l'affaiblissement sur le trajet diminue pour ces modèles de propagation empiriques RF. Il est donc clair que la hauteur de la station de base joue un rôle essentiel dans la détermination de l'affaiblissement sur le trajet pour ces modèles de propagation en LTE. En revanche, lorsque la fréquence augmente, l'affaiblissement sur le trajet augmente mais ce changement n'est pas très remarquable. Ainsi, la fréquence et la hauteur ont un effet majeur sur l'affaiblissement.

L'objectif de notre travail, consiste à établir un modèle empirique optimisé pour le rendre plus approprié à la zone de couverture désirée. Pour résoudre un tel problème d'optimisation, on utilise une technique méta-heuristique populaire basée sur l'intelligence par essaim basée sur le calcul du minimum global d'une fonction coût en minimisant l'erreur quadratique moyenne entre les données de prédiction établies par ce modèle à optimiser, ainsi les mesurés réels établis sur le terrain. Ces mesures sont prélevées de la région de Tébessa. Chaque paramètre de l'algorithme PSO a une influence importante sur le comportement des particules et donc de la convergence de l'algorithme ; et même si la méthode PSO présente des résultats satisfaisants, le choix du bon paramétrage de la méthode reste un point critique en tant qu'une des clés de succès pour tout algorithme PSO. À noter, qu'un simple changement de la valeur d'un paramètre peut changer grandement le résultat, et peut même mener à une convergence prématurée.

Les différences entre les valeurs moyennes de pathloss mesurées et les valeurs modifiées du modèle ont été optimisées à l'aide de l'algorithme d'optimisation de l'essaim de particules pour l'adéquation du terrain. Les résultats obtenus ont montré à travers les métriques d'erreur que la technique PSO a donné un meilleur résultat par rapport au modèle modifié, le modèle Okumura-Hata et d'autres modèles existants pour le système LTE à 1800MHz. Par conséquent, le modèle optimisé PSO pourrait être déployé de manière appropriée pour l'amélioration de l'atténuation du signal pour le réseau LTE dans la région urbaine de Tébessa.

Références

- [1] BCHINI.T, « Gestion de la mobilité, de la qualité de service et interconnexion de réseaux mobiles de nouvelle génération », Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2010.
- [2] A. Hanane, M. Radjaa Asma, « Optimisation de la couverture radio 4G (LTE-A) des opérateurs de télécommunications », Mémoire Master en Télécommunications, Tlémcen, 2017/2018.
- [3] Maciej Stasiak et al, "Modelling and Dimensioning of Mobile Wireless Networks : From GSM to LTE", Livre Edition Willy, 2010.
- [4] X. ZHANG, « LTE Optimization Engineering Handbook », Wiley-IEEE Press, 2017.
- [5] Yannick Bouguen, Éric Hardoin, François-Xavier Wolff, « LTE et les réseaux 4G », Groupe Eyrolles, 2012.
- [6] J. KIEFFER, « Contribution au dimensionnement des PLL pour des modulations polaires larges bandes », Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, 4 Juillet 2014.
- [7] N. SHABIR et al, « Comparison of Radio Propagation Models for Long Term Evolution (LTE) Network, International Journal of Next-Generation Networks, Vol.3, No.3, 2011.
- [8] DJEDDI FATMA, OUTALEB FAIZA, "Planification et optimisation d'un réseau 4G LTE", Mémoire de Master, Université de Tizi-Ouzou, 2017
- [9] BOUGUERRA YAAQOUB ET DELLOUM SARRA, « Optimisation paramétrique pour estimation des pertes dans un réseau GSM utilisant l'algorithmme PSO », mémoire de Master, Université de M'sila, 2017.
- [10] ASAD SAEED, HABIB UR, REHMAN MUHAMMAD, HASSAN MASOOD, « Performance Analysis and Comparison of Radio Frequency Propagation Models for Outdoor Environments in 4G LTE Network », Thesis of Master, Electrical Engineering Blekinge Institute of Technology 2013.
- [11] T. Houda, « Optimisation de la couverture radio du réseau 4G de Tunisie Telecom », Mémoire Master en Télécommunications et Réseaux, Tunis, 2015-2016.
- [12] B.S. Riyad, B. Hadjer, « Etude des performances des réseaux 4G (LTE) », Mémoire Master en Télécommunications, Université de Tlemcen, 2013.
- [13] Nourredine TABIA, « MODELES ET ALGORITHMES POUR L'OPTIMISATION ROBUSTE DANS LES SELF-ORGANIZING NETWORK », Thèse de Doctorat, université Technologie, Belfort-Montbéliard, 2013.
- [14] Karoling, « FDMA, TDMA_ja_CDMA_graafiline_vördlus » Wikimedia.org, 2013. [En ligne].
- [15] H.Terdayet, M.Boujnah, « Calibration de modèles de propagation pour les réseaux GSM, WCDMA et LTE », Mémoire Master, Sciences et technologies de l'Information et de la Communication-Option RST, Tunis, 2012-2013.
- [16] N.Melouki, « Etude et estimation des pertes dans réseau GSM », Mémoire Master en Télécommunications, Université de M'sila, 2015.
- [17] D.Imen, « Planification radio d'une solution de couverture indoor », Rapport de projet de fin d'étude, Tunis, 2004-2005.

- [18] M.Hata, « Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services », IEEETrans, Veh.Technol, vol.vt-29, no.3, pp.317-325, August 1980.
- [19] H.Besbes, S.DALY, « Outil de planification et de dimensionnement dans l'E-UTRAN LTE-Advanced », Tunis, 2011-2012.
- [20] Hashim A, « Location Management in LTE Networks using Multi-Objective Particle Swarm Optimization », Computer Networks, vol. 157, pp. 78-88, 2019.
- [21] J. Milanovic, S. Rimac-Drlje, K. Bejuk, « Comparison of propagation model accuracy for WiMAX on 3.5GHz », 14th IEEE International conference on electronic circuits and systems, Morocco, 2007, pp. 111-114.
- [22] V.S. Abhayawardhana, I.J. Wassel, D. Crosby, M.P. Sellers, M.G. Brown, « Comparison of empirical propagation path loss models for fixed wireless access systems », 61th IEEE Technology Conference, Stockholm, pp. 73-77, 2005.
- [23] O. Ajose, A. Imoize, « Propagation measurements and modelling at 1800 MHz in Lagos Nigeria », Wireless and Mobile Computing, vol. 6, no. 2, pp. 165-174, 2013.
- [24] P. Kumar, B. Patil, and S. Ram, « Selection of radio propagation model for long term evolution (LTE) network », Engineering Research and General Science, vol. 3, no.1, pp. 372-379, 2015.
- [25] Eunice Abdjarah « PLANIFICATION GLOBALE DES RESEAUX MOBILES DE LA QUATRIEMEGENERATION (4G) », Université de Montréal 2014.
- [26] KENNEDY. J, EBERHART. R, « Particle Swarm Optimization, Proceedings of the IEEE International Joint Conference on Neural Networks », IEEE Press, vol. 8, no. 3, pp. 1943–1948. 1995.