



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية
الشعبية

Republique Algérienne 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 Télécommunication

Spécialité : Réseaux et Télécommunication

Par : Eby Mohamed Sidi ABDELLAHI

Sujet

**OPTIMISATION PARAMÉTRIQUE POUR
ESTIMATION DES PERTES DANS UN RÉSEAU 4G**

Évalué, le 22 / 06 / 2021, par le jury composé de :

Mme.Ouacifi Malika

Grade MAA

Président

Mme.Djellab Hanane

Grade MCA

Rapporteur

M.Ferroudji Karim

Grade MCB

Examineur 1

...

...

...

Promotion : 2020/2021

Remerciement

*Je remercie tout d'abord Dieu le tout puissant de nous
Avoir procuré patience et volonté durant toutes les années de
Mes études.*

*Je tiens à exprimer mes sincères et vifs remerciements à
Dr Mme.Djellab Hanane l'encadreur de mémoire pour m'avoir fait
Confiance, d'avoir conseillé tout au long de la réalisation de ce
Travail, pour son soutien et sa grande générosité, qu'il soit
Assuré de mes profondes gratitude.*

*Je remercie Dr Mme.Bouchemha Amel et Dr M.Manaa Saber et
Dr M.Riad Saidi, Pr M.Mahmoud Maamri d'avoir me conseillés tout au long de la
réalisation de ce Travail*

*Je remercie également tous les membres de jurys
D'avoir accepté d'examiner ce modeste travail.*

*Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de
Loin à l'élaboration de ce travail.*

Dédicace

Je dédie ce travail :

A mon très cher père, je lui dédie avec fierté ce mémoire qui reflète le fruit de l'éducation et de l'attention qu'il m'a tant réservée, je lui suis très reconnaissant et j'aurai tant aimé partager la joie de ma réussite avec lui.

A ma mère, pour tous les sacrifices et son soutien moral, avec toute mon affection et ma reconnaissance, merci maman.

A mes frères : pour leurs soutiens et leurs amours.

A mes sœurs : pour leur soutien moral et pour leur amour et soins.

À tous mes proches et mes amis,

Ainsi qu'à toutes les personnes qui m'a aidé à la réalisation de ce travail

Eby Mohamed Sidi Abdellahi

Table des matières

Remerciement	i
Dédicace	ii
Table des matières	iii
Liste des tableaux	v
Liste des figures	vi
Liste des symboles	vii
Résumé	x
Introduction Générale	1
CHAPITRE 1 : GÉNÉRALITÉ SUR LE RÉSEAU 4G	3
1.1 Introduction	4
1.2 Architecture	4
1.2.1 Équipement de l'utilisateur (UE)	5
1.2.2 Le réseau d'accès (E-UTRAN)	5
1.2.3 Le réseau central (EPC)	6
1.3 Les caractéristiques	9
1.4 Les techniques	9
1.4.1 OFDMA et SC-FDMA	9
1.4.2 Duplexage	10
1.4.2.1 Frequency Division Duplex (FDD)	11
1.4.2.2 Time Division Duplex (TDD)	11
1.4.3 Bandes Passantes	11
1.4.4 MIMO (Multi Input Multi Output)	12
1.5 Dimensionnement de LTE	13
1.5.1 Bilan de liaison Radio (RLB).....	13
1.5.1.1 Paramètres du bilan de liaison.....	15
1.5.1.2 Calcul du bilan de liaison pour les liens montant et descendant	18
1.5.2 Modèle de Propagation	20
1.5.2.1 Modèles de propagation en espace libre :	22
1.5.2.2 Modèles empiriques :	23
1.5.2.2.1 Modèles Outdoor :	23
1.5.2.2.1.1 Modèle d'Okumura-Hata	23
1.5.2.2.1.2 Modèle COST 231 de Hata :	24
1.5.2.2.1.3 Modèle d'Egli	25
1.5.2.2.1.4 Modèle Ericsson 9999	25
1.5.2.2.2 Modèles Indoor :	25
1.6 Conclusion	26
CHAPITRE 2 : ALGORITHME PSO	27
2.1 Les méthodes approchées	28
2.2 PSO (Particle Swarm Optimization)	28
2.3 Définition	29
2.4 Les caractéristiques principales de PSO	29

2.5	Trois règles locales	30
2.6	Formulation.....	31
2.7	Algorithme de principe	31
2.8	Les Paramètres	34
2.8.1	La dimension du problème	34
2.8.2	Le nombre des particules.....	34
2.8.3	Les coefficients de confiance	34
2.8.4	La notion du voisinage.....	35
2.8.5	La vitesse maximale.....	35
2.8.6	Le facteur d'inertie	36
2.8.7	Le facteur de construction	36
2.8.8	Le critère d'arrêt	37
2.9	Conclusion	37
CHAPITRE 3 : RÉSULTATS ET DISCUSSION		38
3.1	Introduction	39
3.2	Les Données Et L'analyse De L'affaiblissement	39
3.3	Résultats de simulation et discussion	40
3.3.1	Stratégie d'Optimisation	42
3.3.2	Critère d'arrêt	43
3.4	Résultats d'optimisation par PSO	43
3.4.1	Résultats d'optimisation de Cost231 avec F 1800 Mhz	44
3.4.2	Résultats d'optimisation d'Ericsson avec F 1800 Mhz	45
3.5	Comparaison entre Cost231-op et Ericsson-op en F 1800 Mhz et F 2100 Mhz	46
3.6	Conclusion	47
Conclusion Générale		48

Liste des tableaux

CHAPITRE 1 : GÉNÉRALITÉ SUR LE RÉSEAU 4G

Tableau 1. 1 : Comparaison entre 3G et LTE.....	8
Tableau 1. 2 : Paramètres pour le calcul du la PIRE [15].	16
Tableau 1. 3 : Bilan de liaison Montante [11].	18
Tableau 1. 4 : Bilan de liaison Descendante [11].	19
Tableau 1. 5 : Vitesses types de déplacement du mobile. [15].....	21
Tableau 1. 6 : Types de cellule. [15].....	21
Tableau 1. 7 : Les valeurs par défaut de a_0 , a_1 , a_2 et a_3	25

CHAPITRE 3 : RÉSULTATS ET DISCUSSION

Tableau 3. 1 : paramètres de l'eNodB 12668.	40
Tableau 3. 2 : Les caractéristiques du système exploité	40
Tableau 3. 3 : Le RMSE entre les mesures réelles et les modèles utilisés en une zone Suburbain.	41
Tableau 3. 4 : Les tests COST231-Opt 1, 2, 3, 4,5,6.	44
Tableau 3. 5 : Les tests Ericsson-Opt 1, 2, 3, 4,5,6.....	45
Tableau 3. 6 : Comparaison entre Cost231-op et Ericsson-op	46

Liste des figures

CHAPITRE 1 : GÉNÉRALITÉ SUR LE RÉSEAU 4G

Figure 1. 1 : Architecture de haut niveau de la LTE [2]	4
Figure 1. 2 : Architecture E-UTRAN [2]	5
Figure 1. 3 : Architecture de haut niveau de l'EPC [2].....	7
Figure 1. 4 : La répartition des fonctions entre E-UTRAN et EPC [3].....	8
Figure 1. 5 : Comparaison d'OFDMA et SC-FDMA [5].....	10
Figure 1. 6 : Duplexage FDD et TDD [6].	10
Figure 1. 7 : Schéma représentatif des systèmes SISO, SIMO, MISO et MIMO [10].	12

CHAPITRE 2 : ALGORITHME PSO

Figure 2. 1 : Déplacement d'une particule [23].....	29
Figure 2. 2 : Séparation.	30
Figure 2. 3 : Alignement.....	30
Figure 2. 4 : Cohésion.	31
Figure 2. 5 : Organigramme de l'algorithme d'optimisation par essaim de particules.....	32
Figure 2. 6 : différents types de topologie pour un essaim de particule [26].	35

CHAPITRE 3 : RÉSULTATS ET DISCUSSION

Figure 3. 1 : L'emplacement d'eNodB 12668 Cité 1ère Novembre.	39
Figure 3. 2 : Comparaison Graphique des modèles empiriques avec les mesures réelles.	41
Figure 3. 3 : Organigramme du processus d'optimisation	42
Figure 3. 4 : Comparaison entre COST231 et COST231-Opt 2.....	44
Figure 3. 5 : Comparaison entre Ericsson et Ericsson-Opt 4.	45
Figure 3. 6 : Comparaison entre Cost231-opt et Ericsson-opt	46

Liste des symboles

A

APN : Access Point Name

C

CDMA : Code Division Multiple Access

E

EPC: Evolved Packet Core

E-UTRAN: Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network

EIRP: Equivalent Isotropic Radiated Power

EIR: Register identifier equipment

ENodeB: Evolved Node Base

ETWS: Earthquake Tsunami Warning System

F

FDD: Frequency Division-Duplexing

G

GGSN: Gateway GPRS Support Node

GPRS: General Packet Radio Service

H

HSS: Home Subscriber Server

HSPA: High Speed Packet Access

HeNB: Home Evolved Node Base

L

LTE: Long Term Evolution

M

MIMO: Multiple Input Multiple Output

MME: Mobility Management sEntity

MSC: Mobile Switching Center

MAPL: Maximum Allowable Path Loss

MAQ: Modulation Amplitude quadrature

MAD: Modulation par Déplacement d'Amplitude

N

NF: Noise Figure

O

OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access

OFDM: Orthogonal Frequency-Division Multiplexing

P

PGW: Packet Data Network Gateway
PCRF: Policy and Charging Rules Function
PIRE : Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente
PDN : Packet Data Network
PSO: Particle Swarm Optimization

Q

QAM: Quadrature Amplitude Modulation
QOS: Quality of Service
QPSK: Quadrature Phase Shift Keying

R

RNS: Radio Network Sub-system
RNC : Radio Network Controller
RXG : Gain d'antenne de réception
RAN: Radio Access Network

S

S1-U: Interface entre EnodB et S-GW (S1 User Plan)
SINR: Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio
S1-C : Interface entre EnodB et MME (S1 Control Plan)
SHG: Gain de soft handover
SC- FDMA: Single Carrier FDMA
SGW: Serving Gateway
SGSN: Serving GPRS Support Node
SIM: Subscriber Identity Mobile

T

TDD: Time Division-Duplexing

U

UIT: Union Internationale des Télécommunications
UMTS: Universal Mobile Telecommunications System
UE: User Equipment
UICC: Universal Integrated Circuit Card

W

WCDMA: Wide band Code-Division Multiple Access

X

X2 : Interface entre les eNodB

الملخص

أصبحت شبكات الاتصالات السلكية واللاسلكية ذات أهمية متزايدة في مجتمعنا. من أجل تلبية احتياجات ومصالح العملاء على أفضل وجه، يجب أن يكون المشغلون قادرين على تقديم خدمات ذات جودة ممتازة بأفضل سعر. وفي هذا السياق، تشكل مشكلة التحسين لتقدير الخسائر في شبكة 4G، التي تتكون من تحسين تخفيف نماذج الانتشار، كما تم استخدام خوارزمية PSO. للحد من هذا التخفيف.

وكجزء من مشروع التخرج هذا، الذي تم تطويره في جامعة تبسة وبرعاية شركة Mobilis من أجل الحصول على شهادة ماستر الأكاديمية في تخصص الشبكات والاتصالات، نقترح تحسين تخفيف شبكة الجيل الرابع 4G وفقا لنماذج الانتشار المختلفة الأكثر استخداما مع اختيار النموذج الأنسب من حيث الموثوقية والاقتصاد. ومن هنا جاء التحسين من خسائر الشبكة. ولذلك يتضمن هذا المشروع الوحدات النمطية التالية:

دراسة نظرية لشبكة الجيل الرابع 4G.

دراسة نماذج الانتشار المختلفة المطبقة للتخطيط من أجل أن تكون قادرة على حجم المنطقة التي سيتم دراستها.

دراسة مفهوم أداة التحسين.

إدراك أن من شأنها أن تقودنا إلى اختيار نموذج الانتشار الأنسب وهذا يعني أن يسمح للمشغل لتنفيذ شبكة G4 مع الحد الأدنى من الخسائر والتكلفة مع الحفاظ على نوعية جيدة من الخدمات.

الكلمات الدلالية: نموذج الانتشار، 4G، ENodB، التحسين، PSO، توازن الرابط، Cost231, Ericsson

Résumé

Les réseaux de télécommunications ont pris de plus en plus d'importance dans notre société. Pour satisfaire au mieux les besoins et les intérêts des clients, les opérateurs doivent pouvoir offrir, au meilleur prix, des services d'excellente qualité. C'est dans ce cadre que s'inscrit le problème d'optimisation paramétrique pour estimation des pertes dans un réseau 4G, qui consiste à optimiser l'atténuation des modèles de propagation. Une optimisation par l'algorithme PSO bien effectuée a pour effet de réduire cette atténuation.

Dans le cadre de ce projet de fin d'études, élaboré à l'université de Tébessa et parrainé par Mobilis afin d'obtenir le diplôme de Mastère académique en Réseaux et Télécommunications, nous proposons d'optimiser l'atténuation du réseau 4G selon les différents modèles de propagation les plus utilisés tout en choisissant le modèle le plus approprié en terme de fiabilité et d'économie. D'où l'optimisation de des pertes du réseau.

Ce projet regroupe donc les modules suivants :

Etude théorique du réseau 4G.

Etude des différents modèles de propagation appliqués pour la planification afin de pouvoir dimensionner la zone à étudier.

Une étude conceptuelle de l'outil d'optimisation.

La réalisation qui nous mènera au choix du modèle de propagation le plus approprié c'est à dire qui permet à l'opérateur d'implanter le réseau 4G avec un minimum de des pertes et de coût tout en conservant une bonne qualité de services.

Mots clés: modèle de propagation, 4G, EnodB, optimisation,,PSO, bilan de liaison, Cost231, Ericsson.

Abstract

Telecommunications networks have become increasingly important in our society. In order to best meet the needs and interests of customers, operators must be able to offer excellent quality services at the best price. It is in this context that the problem of parametric optimization for estimating losses in an 4G network, which consists in optimizing the attenuation of propagation models, is part of. A well-performed PSO optimization reduces this attenuation.

As part of this graduation project, developed at the University of Tébéssa and sponsored by Mobilis in order to obtain the diploma of Academic Master in Networks and Telecommunications, we propose to optimize the attenuation of the 4G network according to the different most used propagation models while choosing the most appropriate model in terms of reliability and economy. Hence the optimization of network losses.

This project therefore includes the following modules:

Theoretical study of the 4G network.

Study of the different propagation models applied for planning in order to be able to size the area to be studied.

A conceptual study of the optimization tool.

The realization that will lead us to the choice of the most appropriate propagation model that is to say that allows the operator to implement the 4G network with a minimum of losses and cost while maintaining a good quality of services.

Keywords: propagation model, 4G, EnodB, optimization, PSO, link balance, Cost231, Ericsson.

Introduction Générale

Le système de téléphonie cellulaire connaît un succès considérable, avec un nombre d'abonnés sans cesse croissant, le premier système sans fil a été inventé par Bell System, aux états unis, en 1940.

Les réseaux de deuxième génération ont fait ses débuts dans les années 1990 tel que le système GSM (*Global System for Mobile*) en Europe, le system PDC au Japon et le système IS-95 aux USA.

On peut définir la troisième génération comme un ensemble de technologies développées dans le but de faire évoluer les systèmes cellulaires de deuxième génération au niveau de la capacité et de la couverture ainsi que la qualité de service (*QoS*). La 3G est arrivée avec la norme UMTS, les utilisateurs ont fait un premier saut qualitatif en termes de débits d'échanges de données et on passe théoriquement à des échanges de plusieurs mégabits/secondes.

Actuellement on passe vers le réseau 4G avec la norme LTE Advanced, c'est potentiellement 1 Gb/s de téléchargement, qui présente beaucoup d'amélioration quant à la bande passante de l'utilisateur ainsi que d'autres paramètres de qualité de service.

C'est dans ce contexte que se situe notre projet de fin d'étude qui vise à optimiser les pertes du sous-système radio de la norme LTE.

La méthode PSO est retenue pour optimiser un modèle empirique qui sera choisi après comparaison entre plusieurs modèles existants avec des données réels. Cette technique est une méta-heuristique populaire basée sur l'intelligence par essaim, elle a été proposée en 1995 par Kennedy et Eberhart.

L'optimisation par essaim de particules s'inspire du comportement social des oiseaux évoluant en groupe et des bancs de poissons. L'algorithme d'optimisation par essaim de particule lance la recherche avec une population de solutions, où chacune est appelée « particule ». Cette dernière est caractérisée par une vitesse de déplacement et une position dans l'espace de recherche [1].

L'objectif de ce travail de Master consiste à maîtriser un programme qui utilise l'algorithme PSO pour optimiser un modèle empirique et le rendre plus approprié à la zone de couverture désirée. Pour résoudre un tel problème d'optimisation, on va calculer 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 pour l'eNodB 12668 cité 1^{ier} Novembre qui couvre une zone suburbaine.

Ce mémoire est structuré comme suit :

Dans le premier chapitre, nous allons consister à décrire les généralités et l'architecture ainsi que le dimensionnement d'un système LTE. On a exposé les différentes modèles de propagation et le calcul de bilan de puissance (Pathloss).

Le second chapitre représente les méthodes approchées et expose l'algorithme d'optimisation PSO (Particle Swarm Optimization)

Un dernier chapitre a été consacré aux résultats de simulation qui présente la performance de modèle optimisé avec l'algorithme PSO et les mesurés réelle prélevés d'une zone Suburbaine de la wilaya de Tébessa.

Enfin, nous finalisons notre mémoire par une conclusion générale où nous résumons le travail proposé.

CHAPITRE 1 : GÉNÉRALITÉ SUR LE RÉSEAU 4G

1.1 Introduction

La LTE est la norme de quatrième génération du 3GPP pour les communications cellulaires à haut débit. Elle offre des débits de données maximaux de 300 Mbps en liaison descendante et de 75 Mbps en liaison montante et 75 Mbps en liaison montante. Elle a été introduite dans la version 8 du 3GPP en décembre 2008.

Les principaux changements par rapport à l'UMTS sont les suivants réseaux centraux entièrement commuté par paquets, ainsi que le passage de l'accès multiple par répartition en Wide band Code-Division Multiple Access (WCDMA) à l'Orthogonal Frequency- à l'accès multiple par répartition en fréquence orthogonale (OFDMA).

Le système LTE est composé de deux éléments : le réseau central, appelé Evolved Packet Core (EPC), et le réseau d'accès radio (RAN), appelé Evolved Packet Core (EPC).

1.2 Architecture

Les trois éléments principaux de l'architecture de réseau de haut niveau de LTE sont :

- UE (User Equipment).
- E-UTRAN (Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network).
- EPC (Evolved Packet Core).

L'EPC communique avec les réseaux de données par paquets du monde extérieur tels que l'internet, les réseaux d'entreprise privés ou le sous-système multimédia IP.

Comme indiqué ci-dessous, (Uu, S1 et SGi) sont les interfaces entre les différentes parties du système :

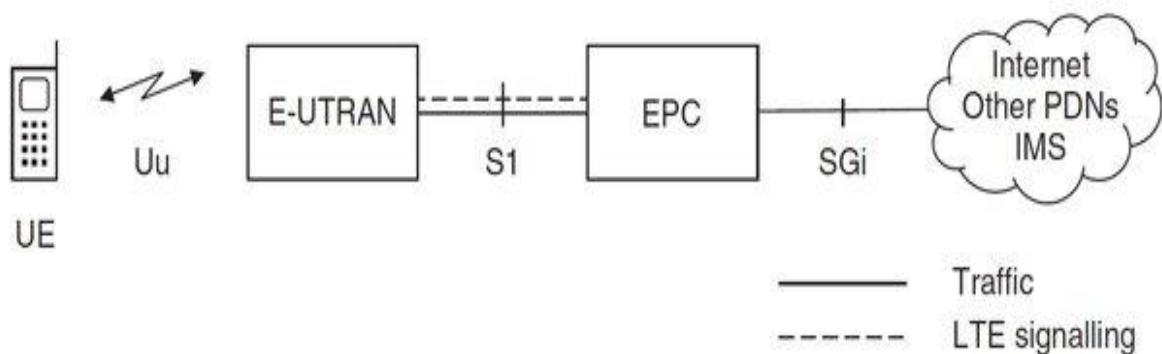


Figure 1. 1 : Architecture de haut niveau de la LTE [2]

1.2.1 Équipement de l'utilisateur (UE)

L'équipement utilisateur pour le réseau LTE a une architecture interne identique à celle utilisée par l'UMTS et le GSM qui est un équipement mobile (ME). Ce dernier est composé des modules importants suivants :

- **Mobile Termination (MT)** : Il assure toutes les fonctions de communication.
- **Universal Integrated Circuit Card (UICC)** : pour les équipements LTE ce- lui ci est appelée carte SIM. Il assure l'exécution d'une application appelée USIM (Universal Subscriber Identity Module).

Des données spécifiques stockées à l'utilisateur par l'application USIM, très similaires à celles d'une carte SIM 3G. Il conserve des informations sur le numéro de téléphone de l'utilisateur, les clés de sécurité et l'identité du réseau domestique, etc.

1.2.2 Le réseau d'accès (E-UTRAN)

L'architecture du réseau d'accès radio terrestre UMTS évolué (E-UTRAN) a été illustrée ci-dessous :

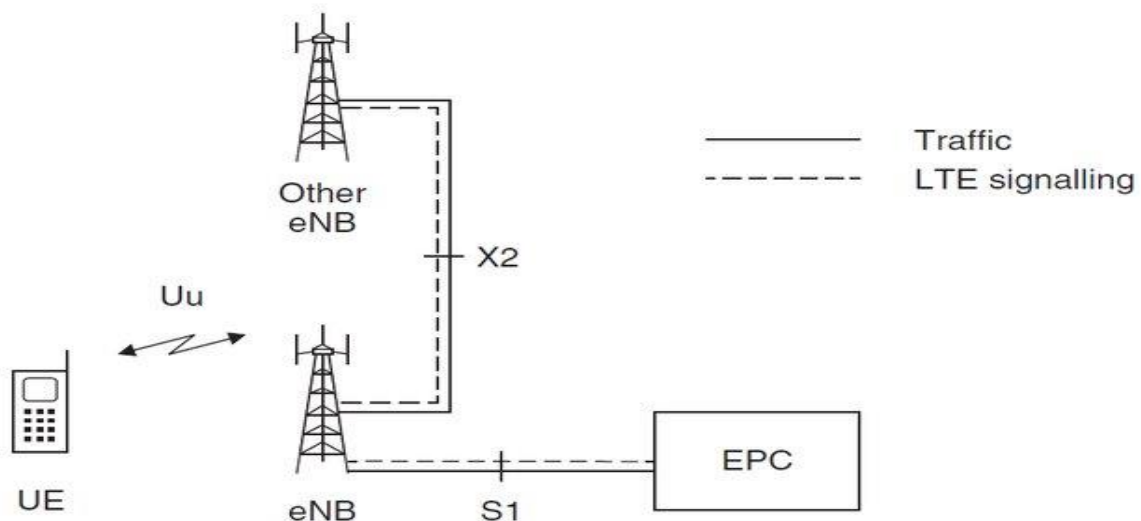


Figure 1. 2 : Architecture E-UTRAN [2]

L'E-UTRAN assure la gestion des communications radio entre le noyau de paquets évolué et le mobile et ne possède qu'un seul composant, les stations de base évoluées, appelées eNodeB ou eNB. Chaque eNB est une station de base qui a comme rôle le contrôle des mobiles dans une ou plusieurs cellules. Et l'eNB qui communique avec un mobile est appelée eNB de service.

Le LTE Mobile communique avec une seule cellule et une seule station de base à la fois et les deux fonctions principales suivantes sont prises en charge par l'eNB :

- A l'aide des fonctions de traitement des signaux numériques et analogiques de l'interface aérienne de LTE L'eNB envoie et reçoit des transmissions radio vers tous les mobiles.
- En leur envoyant des messages de signalisation tels que des commandes de transfert le fonctionnement de bas niveau de tous ses mobiles est contrôlé par L'eNB.
- Au moyen de l'interface S1 chaque eNB se connecte à l'EPC et peut également être relié aux stations de base voisines par l'interface X2, qui est principalement utilisée pour la signalisation et le transfert de paquets lors du transfert.
- Un eNB domestique (HeNB) est une station de base qui a été achetée par un utilisateur pour fournir une couverture femto-cellulaire dans la maison.
- Un eNB domestique appartient à un groupe fermé d'abonnés (CSG) ou (Closed Subscriber Group) et n'est pas accessible que par des mobiles dotés d'une USIM qui appartient à ce groupe fermé d'abonnés.

1.2.3 Le réseau central (EPC)

Nous avons illustré ci-dessous l'architecture de l'Evolved Packet Core (EPC). Il y a peu d'autres composants qui n'ont pas été montrés dans le diagramme pour rester simple. Ces composants sont comme le registre d'identification des équipements (EIR), le système d'alerte aux tremblements de terre et aux tsunamis ETWS (Earthquake Tsunami Warning System) et la fonction de contrôle des politiques et des règles de tarification PCRF (Control Function for Pricing Policies and Rules)

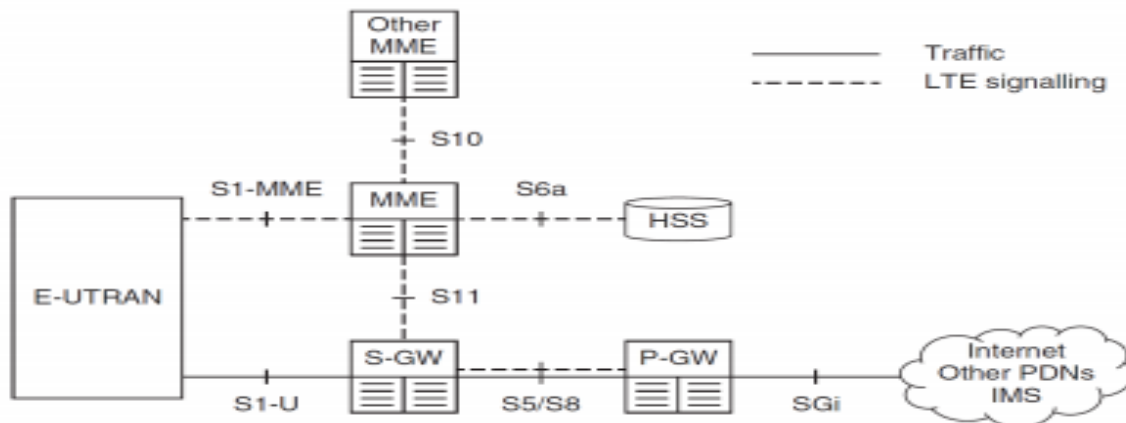


Figure 1. 3 : Architecture de haut niveau de l'EPC [2]

Vous trouverez ci-dessous une brève description de chacune des composantes de l'architecture :

- Le composant Home Subscriber Server (HSS) a été repris de l'UMTS et du GSM et est la base de données centrale qui contient des informations sur tous les abonnés de l'opérateur de réseau.
- La passerelle (P-GW) du réseau de données par paquets (PDN) communique avec le monde extérieur, c'est-à-dire les réseaux de données par paquets PDN, en utilisant l'interface SGi. Chaque réseau de données par paquets est identifié par un nom de point d'accès (APN). La passerelle PDN a le même rôle que le nœud de support GPRS (GGSN) et le nœud de support GPRS de desserte (SGSN) avec UMTS et GSM.
- La passerelle (S-GW) ou (Serving Gateway) agit comme un routeur et transmet les données entre la station de base et la passerelle PDN.
- Le MME : contrôle le fonctionnement de haut niveau du mobile au moyen de messages de signalisation et du Home Subscriber Server (HSS).
- La PCRF est une composante qui n'est pas représentée dans le diagramme ci-dessus, mais elle est responsable de la prise de décision en matière de contrôle de la politique, ainsi que du contrôle des fonctionnalités de tarification en fonction des flux dans la fonction d'application du contrôle de la politique (PCEF), qui réside dans la P-GW.

Les passerelles de service et de PDN sont reliées par l'interface S5 si les deux appareils sont dans le même réseau, et S8 s'ils sont dans des réseaux différents.

Répartition fonctionnelle entre l'E-UTRAN et l'EPC

Le schéma suivant montre la répartition fonctionnelle entre l'E-UTRAN et l'EPC pour un réseau LTE :

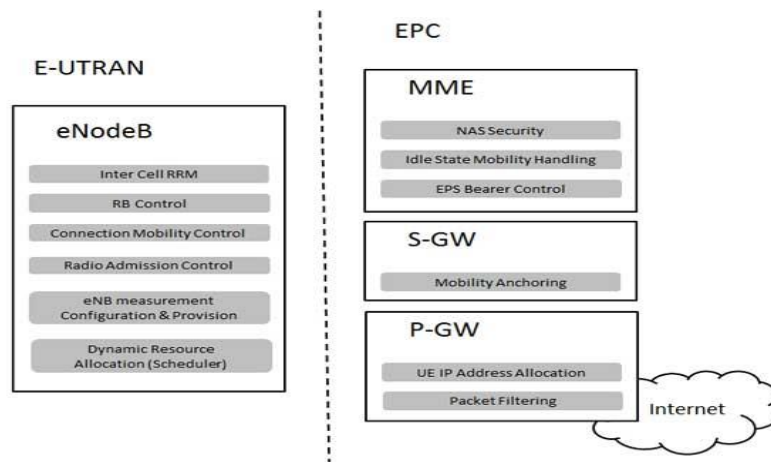


Figure 1. 4 : La répartition des fonctions entre E-UTRAN et EPC [3].

Comparaison entre 3G et LTE

Le tableau suivant compare divers éléments de réseau et protocoles de signalisation importants utilisés 3G et LTE.

Tableau 1. 1 : Comparaison entre 3G et LTE

3G	LTE
UTRAN	E-UTRAN
SGSN/PDSN-FA	S-GW
GGSN/PDSN-HA	PDN-GW
HLR	HSS
VLR	MME

1.3 Les caractéristiques

- Il offre un débit de donnée crête sur la voie montante de 50 Mbits/s
- un débit pic théorique de 100 Mbits/s à 300 sur la voie descendante et un temps d'aller-retour de moins de 10 ms sur l'interface radio (RAN).
- Le réseau LTE utilise une largeur de bande de 2x20 MHz et supporte le duplexage temporel (TDD) ou fréquentiel (FDD).
- La taille des cellules est de 5 km pour des performances optimales.
- Ces performances sont possibles grâce à l'utilisation d'antennes MIMO (Multiple Input Multiple Output) avec les techniques de transmission OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), d'accès multiples : OFDMA (OFDM Multiple Access) sur la voie descendante et la technique SCFDMA (Single-Carrier FDMA) sur la voie montante

1.4 Les techniques

1.4.1 OFDMA et SC-FDMA

L'OFDM constitue le format de signal de base utilisé dans le 4G LTE. OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplex est le format de base utilisé et il est modifié pour fournir le schéma d'accès multiple : OFDMA, accès multiple par répartition orthogonale de la fréquence sur la liaison descendante et SC-FDMA, accès multiple par répartition orthogonale de la fréquence sur un seul canal sur la liaison montante.

Utilisant plusieurs porteuses, chacune transportant un faible débit de données, l'OFDM est idéal pour la transmission de données à haut débit car il offre une résistance contre les évanouissements à bande étroite qui se produisent à la suite de réflexions et les propriétés générales de propagation à ces fréquences.

Dans le format de base du signal OFDM LTE, divers formats de modulation sont utilisés, notamment la MDP (Modulation par déplacement de phase) et la MAQ (Modulation d'Amplitude en Quadrature). Une modulation d'ordre supérieur est utilisée pour obtenir les débits de données les plus élevés : l'ordre de modulation étant déterminé par la qualité du signal [4].

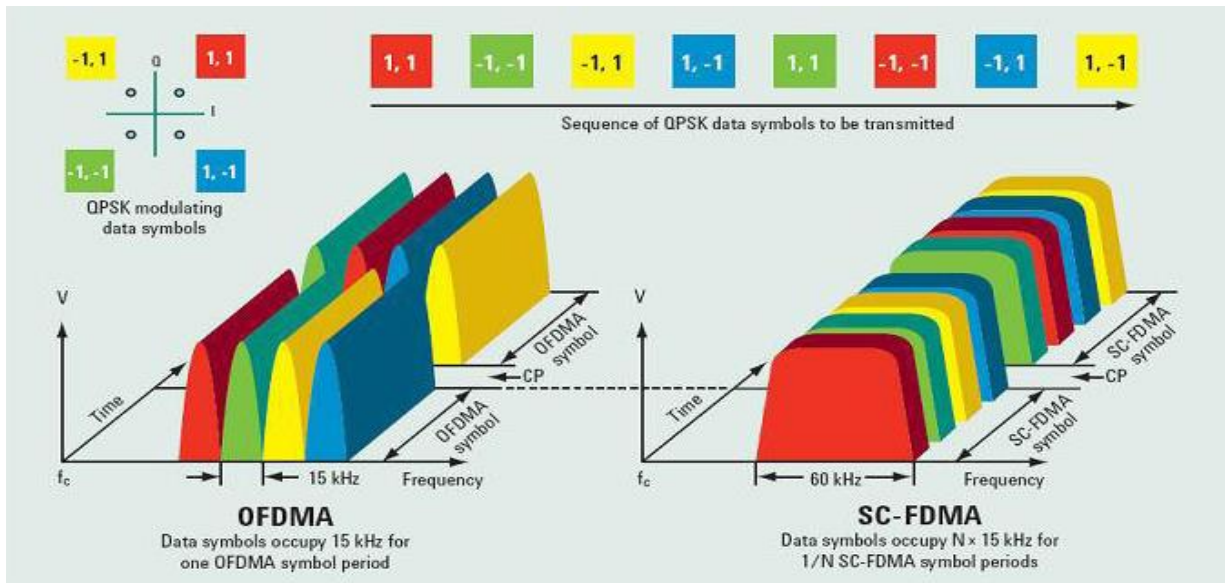


Figure 1. 5 : Comparaison d’OFDMA et SC-FDMA [5].

1.4.2 Duplexage

Au niveau de radio, deux variantes exclusives de la norme LTE ont été définies :

Le TDD (Time-Division Duplex) qui utilise une seule bande de fréquence avec des ressources allouées dynamiquement à l’émission ou à la réception des données (multiplexage temporel), et le FDD (Frequency Division Duplexing) qui utilise deux bandes de fréquences distinctes pour l’émission (upload) et la réception (download)

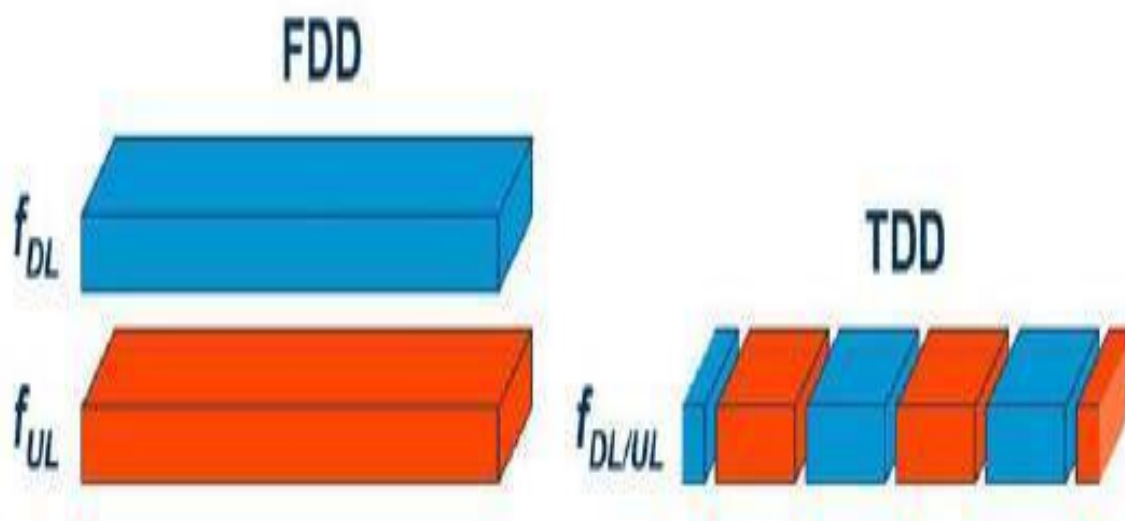


Figure 1. 6 : Duplexage FDD et TDD [6].

1.4.2.1 Frequency Division Duplex (FDD)

La première commercialisée a été la variante FDD (plus de 90 % du marché en 2013), elle est la plus simple à mettre en œuvre dans les terminaux LTE et les antennes relais.

Les fréquences centrales des bandes de fréquence émission et réception y sont séparées d'au minimum 30 MHz [7]. Elle implique des contraintes de synchronisation moins sévères entre les terminaux mobiles et les stations de base car les terminaux utilisent en émission une bande de fréquence différente de celle de l'antenne-relais. Début 2014, les Smartphones les plus récents sont compatibles avec les 2 variantes : FDD et TDD. L'Europe (via la CEPT) et la France ont choisi au début des années 2010 pour les réseaux européens la variante FDD et les bandes de fréquences associées.

1.4.2.2 Time Division Duplex (TDD)

La variante TDD a l'avantage de s'adapter facilement à des débits upload / download déséquilibrés, ce qui est souvent le cas pour le trafic des smartphones utilisés pour consulter Internet ou pour visualiser des vidéos, l'ensemble des sous-porteuses définies par la modulation OFDMA peuvent être utilisées pour émettre et recevoir avec une répartition de la bande passante entre les débits montants et descendants qui est définie par l'opérateur mobile. Cette variante nécessite une synchronisation plus précise de tous les constituants du réseau, y compris les terminaux mobiles. [8]

1.4.3 Bandes Passantes

Les bandes de fréquences pour la 4G sont variés :

- Une large bande (140 MHz) est prévue dans les fréquences « hautes », pour permettre un débit maximal pour les zones denses. Cette bande dans les fréquences « hautes » est située autour des 2600 MHz (2,6 GHz) et porte le numéro de canal 7 d'après la norme LTE.
- Une bande plus limitée (60 MHz) dans les fréquences « basses » pour permettre la couverture de zones très étendues. Cette bande dans les fréquences « basses » est située autour des 800MHz et porte le numéro 20.
- Deux autres bandes plus récentes : une dans les fréquences basses provenant de la télévision numérique terrestre TNT, autour des 700 MHz, portant le numéro 28 et une provenant de la 2G, autour des 1800 MHz et portant le numéro 3.

1.4.4 MIMO (Multi Input Multi Output)

MIMO signifie Multiple Input Multiple Output, une technologie d'antenne pour le sans-fil. Les communications qui utilisent plusieurs émetteurs et récepteurs pour transférer plus de données en même temps.

La capacité sans fil peut être augmentée en transmettant plusieurs flux de données en même temps.

Comparez à un système d'antenne unique, l'ajout d'antennes MIMO peut améliorer la fiabilité de la liaison et s'évanouissent moins. La combinaison d'antennes à chaque extrémité du circuit de communication permet minimiser les erreurs et optimiser la vitesse des données.

MIMO est de plus en plus utilisé pour améliorer les niveaux de l'efficacité de nombreuses technologies à haut débit de données telles que les technologies cellulaires, le Wi-Fi et autres sans fil.

MIMO est l'une des nombreuses formes de technologie d'antenne intelligente pour les communications sans fil, là les autres étant SISO (Single Input Single Output), MISO (Multiple Input Multiple Output) et SIMO (Single Input Multiple Output) [9].

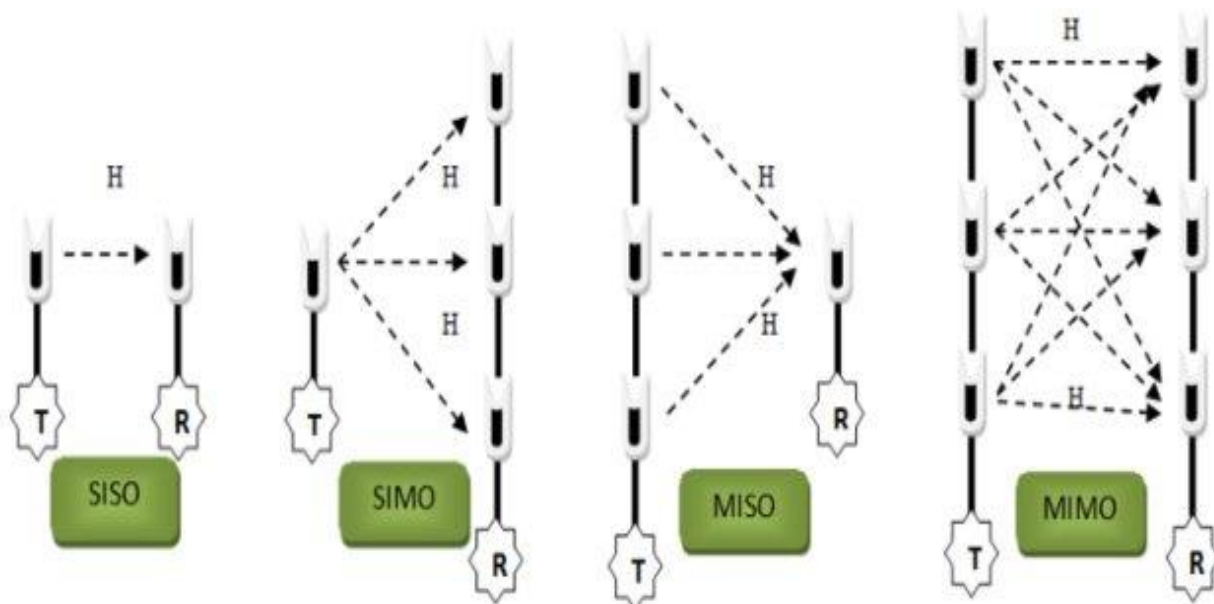


Figure 1. 7 : Schéma représentatif des systèmes SISO, SIMO, MISO et MIMO [10].

1.5 Dimensionnement de LTE

Le dimensionnement est une étape préliminaire qui permet de déterminer le volume des équipements et les logiciels à acquérir et à déployer afin de satisfaire ses abonnés ainsi le nombre des eNodeBs maximum.

Le dimensionnement des réseaux mobiles est un problème complexe qui met en jeu à la fois des aspects théoriques et pratiques. Il s'agit de trouver la meilleure architecture cellulaire au regard de plusieurs critères qu'on peut résumer comme suit :

- **Qualité de couverture** : garantir un lien radio en tout point de la zone à couvrir.
- **Absorption de la charge** : le réseau doit être capable de fournir un nombre de canaux de communication adapté à la densité de trafic associée à chaque cellule.
- **Mobilité** : Faciliter le handover lors des changements de cellules. Chaque station de base doit connaître ses voisines pour permettre à un utilisateur de se déplacer sans perte de communication.
- **Evolutivité** : un réseau cellulaire de type LTE est en perpétuelle évolution, intégrant de nouvelles stations de bases, ou simplement de nouveaux TRX associés à chaque station de base.
- **Déploiement du réseau fixe** via un ensemble de faisceaux hertziens pour interconnecter les stations de base. Dans la pratique, le déploiement d'un réseau LTE nécessite l'optimisation du placement des sites, sous les deux contraintes de type radio et trafic. Il s'agit de tester, en fonction du type d'antenne, de sa puissance d'émission et de son orientation, la zone couverte par l'émetteur. Une approche pas à pas permet progressivement de faire converger le réseau vers une bonne configuration. Le principe est le suivant : de répartir les émetteurs sur le terrain, établir les zones de couverture, et les adapter en déplaçant les sites, en modifiant les puissances d'émission, en choisissant les orientations. Une fois la couverture est assurée, il faut rechercher une répartition des fréquences en analysant les sites qui sont voisins, ainsi rechercher une répartition des fréquences entre les sites [11].

1.5.1 Bilan de liaison Radio (RLB)

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 permet de prédire le rayon de couverture de la cellule en se basant sur la fréquence de fonctionnement, le modèle de propagation et les paramètres de l'émetteur (Tx) et du récepteur.

En effet, il s'agit d'additionner tous les éléments du gain (augmentation) ou de perte (diminution) dans la puissance du signal radio entre chaque extrémité. Ce bilan est nécessaire pour savoir si deux nœuds peuvent communiquer entre eux. Il dépend en particulier du type de l'eNodeB, de l'environnement radio et du modèle de propagation entre l'émetteur et le récepteur [12].

Pour le LTE, l'équation RLB de base peut être écrite comme suit (en dB) :

$$PathLoss = TxPower + TxGains - TxLosses - RequiredSINR + RxGains - RxLosses - RxNoise \quad (1.1)$$

Avec :

- *PathLoss* : perte de trajet totale rencontré par le signal provenant de l'émetteur au récepteur (dB)
- *TxPower* : La puissance transmise par l'antenne de l'émetteur (dBm)
- *TxGains* : Gain d'antenne d'émission (dBi)
- *TxLosses* : les pertes de l'émetteur (dB)
- *RequiredSINR* : Minimum de SINR requis (dB)
- *RxGains* : Gain d'antenne de réception (dB)
- *RxLosses* : Les pertes du récepteur (dB)
- *RxNoise* : Bruit du récepteur (dB)

Dans le cas d'un affaiblissement de parcours maximal, la puissance reçue devient donc la sensibilité du récepteur. La différence entre la puissance de l'émetteur et la sensibilité de récepteur donne l'affaiblissement maximum qu'on peut tolérer, il est calculé de la manière suivante :

$$MAPL = Pire - IM + RXG - K + SHG - RX \quad (1.2).$$

Avec :

- MAPL (Maximum Allowable PathLoss): L'affaiblissement maximal de parcours, exprimé en dB. C'est le paramètre qu'on veut déterminer à travers l'établissement d'un bilan de liaison.
- PIRE (Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente) : ou EIRP (Equivalent Isotropic Radiated Power), est la puissance rayonnée équivalente à une antenne isotrope.
 - IM = Marge d'interférence
 - RXG = Gain d'antenne de réception
 - K = Perte de câble

- SHG = Gain de soft handover
- RX = Sensibilité de réception

1.5.1.1 Paramètres du bilan de liaison

➤ Puissance d'émission :

La puissance d'émission est la puissance maximale de la station de base (eNodeB) ayant une valeur typique pour la macro cellule 43-46 dBm au niveau du connecteur d'antenne.

La puissance de transmission maximale de 23 dBm pour le UE [12].

➤ Gain d'antenne :

Le gain d'antenne est défini comme étant la puissance rayonnée par l'antenne, dans une direction donnée, par rapport à la puissance rayonnée par une antenne omnidirectionnelle parfaite qui rayonne uniformément dans toutes les directions. Il est exprimé en dB mais pour signifier que l'antenne de référence utilisée est isotrope, il est d'usage de parler de dBi [13].

Un concept est lié à celui de gain est la surface effective d'une antenne, qui en rapport avec la taille et la forme de celle-ci. La relation entre gain et la surface effective de l'antenne est donnée par:

$$G = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \quad (1.3)$$

Avec :

- A : Aire équivalente de l'antenne
- λ : Longueur de l'onde rayonnée

L'antenne isotrope de référence à un gain $G=1$ et donc une aire équivalente $A = \lambda^2/4\pi$ [14].

Il dépend principalement de la fréquence porteuse, de la taille de l'antenne et du type du dispositif.

Le gain d'antenne de station de base typique est de 15 à 18 dBi. De même, selon le type de l'appareil, le gain de l'antenne du mobile varie de -5 dBi à 10 dBi.

➤ Les pertes :

Comprend la perte du câble et la perte du corps à la fois à l'eNodeB et UE. Perte du câble est de perte entre l'antenne de l'équipement et de l'amplificateur à faible bruit qui dépend de la longueur du câble, du type de câble et de bande de fréquence. Elle varie de 1 à 6 dB pour eNodeB et 0 dB pour UE. Perte du corps se produit lorsque l'UE se tient près de la tête de l'utilisateur et à la planification pratique, il est considéré comme 0 dB.

➤ **PIRE (Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente) :**

La puissance rayonnée par une antenne est appelée Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente (PIRE) ou Effective Isotropic Radiated Power (EIRP). Elle correspond à la puissance qu'il faudrait fournir à une antenne isotrope pour obtenir le même champ à la même distance. La PIRE est donnée en dBm par la formule suivante [14] :

$$PIRE = P + G - L_r \quad (1.4)$$

Avec :

- P : la puissance fournie à l'entrée de l'antenne
- G : le gain de l'antenne étudiée
- L_r : une perte supplémentaire dans la direction considérée

Tableau 1. 2 : Paramètres pour le calcul du la PIRE [15].

Paramètre	Enb	UE
P_{TX}	Puissance de l'émission de l'eNB au niveau du connecteur de l'antenne (43-49 dBm).	Puissance d'émission de l'UE (dépend de la catégorie du UE) Catégorie 1->5 UE de Rel-8/9 Catégorie 6-7-8 UE de Rel10/11
$G_{TX} = \sum_{i \in UE/eNB} G_i$	G_a : Gain de l'antenne de l'eNB, il dépend du constructeur. G_{Tx}, d : Gain de diversité, dépend du nombre d'antennes à l'eNB et de la taille du motif de coopération (M).	G_a : Gain de l'antenne de l'UE, il dépend du constructeur. G_{Tx}, d : Gain de diversité, dépend du nombre d'antennes à l'UE
$L_{TX} \sum_{i \in UE/eNB} L_i$	L_{feeder} : Pertes des câbles D'alimentation entre l'eNB et le connecteur d'antenne : elle dépend de la longueur, type et fréquence du câble. (1-6 dBm), L_{other} : Autres pertes liées à l'eNB (exemple : connecteurs).	L_{feeder} : Perte du corps humain, dépend de l'équipement de l'utilisateur (téléphone/clé USB/tablette) L_{other} : Autres pertes liées à l'UE

➤ Sensibilité du récepteur

Un récepteur est caractérisé par sa sensibilité. La sensibilité « S » est le niveau de puissance minimal de réception pour éviter la coupure du lien radio. Elle est donnée par la formule suivante [16] :

$$S = 10 \log_{10} (K.T.B_{Rx}) + RequiredSINR + NF + IM - G_{Rx,d} \quad (1.5).$$

Avec :

- K : Constante de Boltzmann (1.388062×10^{-23}).
- T : Température ambiante en (K)
- B_{Rx} : La largeur de bande de réception : elle dépend du nombre de blocs de ressources requis, et la largeur d'un bloc de ressources.
- RequiredSINR: Valeur du SINR requise au récepteur, c'est un indicateur de la performance du système plus il est faible plus le système est performant, dépend du nombre de blocks de ressources , débit d'information requis etc.
- NF (Noise Figure (dB)) : dépend du mode de duplexage et l'écart duplex.
- IM (Marge d'implémentation (dB)): dépend du constructeur, elle tient compte des erreurs résiduelles dans l'étage RF du récepteur (erreurs d'échantillonnage, quantification, etc.)
- $G_{Rx, d}$: Gain de diversité de réception (dBi) : dépend du type de récepteur et du nombre d'antennes

➤ La bande passante

LTE fonctionne dans différentes largeurs de bande passante, y compris 1,25 MHz, 2,5 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz et 20 MHz à la fois pour la liaison montante et descendante. La sélection de la largeur de bande est reliée directement à la capacité de la station de base, plus la bande est large plus le trafic qui peut prendre en charge est grand. Lors de la planification pratique, pour une première fois de déploiement, le dimensionnement se fait par une bande passante de 5 MHz, 10 MHz [14].

➤ Marge de shadowing (L'effet de Masque)

Le shadowing, ou l'effet de masque (slow fading) est la variation du signal dû aux obstacles qui existent dans le milieu de propagation radio, tel que les bâtiments et la morphologie du terrain (vallées, collines...).

➤ Marge d'interférence

La marge d'interférence est le niveau d'augmentation du bruit dû à l'augmentation de la charge dans la cellule. Il s'agit de deux types d'interférence : l'interférence intracellulaire et interférence intercellulaire.

Dans le cas de la technologie LTE, l'utilisation de l'OFDM élimine les interférences intracellulaires. En outre, dans les cas de planification et d'optimisation pratiques, l'interférence totale sera la somme des interférences intercellulaires et du bruit thermique au niveau du récepteur [14].

1.5.1.2 Calcul du bilan de liaison pour les liens montant et descendant

Ces tableaux englobent les paramètres, les formules nécessaires au calcul d'un bilan de liaison pour les liens montant et descendant, ainsi que les différents seuils et large prise en compte et qui sont proposés par la norme.

➤ Formules de calcul pour la liaison Montante

Tableau 1. 3 : Bilan de liaison Montante [11].

Paramètres	Unité	Formule	Valeur
Emetteur-UE			
Puissance d'émission	DBm	A	18-23 dBm
Gain d'antenne émetteur	DBi	B	-5-10 dBi
Perte corps humain	Db	C	0-5db
PIRE (Puissance isotrope rayonnée équivalente)	DBm	$d = a + b + c$	
Récepteur – eNodeB			
eNodeB noise figure	dB	E	2dB
Bruit thermique	dB	F	-118.4 dBm
Bruit récepteur	dBm	$g = e + f$	
SINR	dB	H	-7dB
Sensibilité du récepteur	Dbm	$I = g + h$	
Marge d'interférence	dB	J	1-10 dB

Pertes de câble	dB	K	1-6 dB
Gain d'antenne récepteur	dBi	L	15-21 dBi
Marge de fading rapide	dB	M	0dB
Gain du soft handover	dB	N	0dB
Path Loss Maximal	dB	$o = d - j + l - k + n - i$	

➤ **Formules de calcul pour la liaison Descendante:**

Tableau 1. 4 : Bilan de liaison Descendante [11].

Paramètres	Unité	Formule	Valeur
Emetteur-UE			
Puissance d'émission	dBm	A	43-46 dBm
Gain d'antenne émetteur	dBi	B	15-18 dBi
Perte de câble	dB	C	1-6dB
PIRE (Puissance isotrope rayonnée équivalente)	dBm	$d = a + b - c$	
Récepteur – eNodeB			
UE noise figure	dB	E	6-11dB
Bruit thermique	dB	F	-104.5 dBm
Bruit récepteur	dBm	$g = e + f$	
SINR	dB	H	-9dB
Sensibilité du récepteur	Dbm	$i = g + h$	
Marge d'interférence	dB	J	3-8 dB
Control channel overhead	dB	K	0.4-1 dB
Gain d'antenne récepteur	dBi	L	-5-10 dBi
Perte corps humain	dB	M	3-5Db
Path Loss Maximal	dB	$o = d - j + l - k + m - i$	

1.5.2 Modèle de Propagation

Sur des distances inférieures à 1 km, la propagation est plus perturbée par les bâtiments et les arbres que par le relief : Le rôle déterminant est joué par les bâtiments, la plupart des liaisons radioélectriques de courte portée étant utilisées dans des zones urbaines et suburbaines et le Terminal mobile étant, très vraisemblablement, transporté par un piéton ou à bord d'un véhicule. Etant donné la grande diversité des environnements existant à l'intérieur de chaque catégorie, il n'est pas prévu de modéliser chaque cas possible, mais d'établir des modèles de propagation qui soient représentatifs des environnements les plus fréquents comme [10] :

Urbain élevé : Véritables « canyons urbains », c'est-à-dire rues encaissées entre des bâtiments de plusieurs étages chacun, la propagation par-dessus les toits des bâtiments est peu probable à cause de leur hauteur, les temps de propagation risquent d'être longs à cause de l'existence de rangées de bâtiments de grande hauteur ainsi les nombreux véhicules se déplaçant dans la zone sont autant d'obstacles qui réfléchissent les ondes et ajoutent un effet Doppler aux ondes réfléchies.

Urbain/suburbain faiblement élevé : Se caractérise par des rues larges, risque de diffraction par-dessus les toits des bâtiments qui comptent en général moins de trois étages, les véhicules en mouvement peuvent parfois donner lieu à des phénomènes de réflexion et d'occultation principales conséquences : temps de propagation importants et effet Doppler faible.

Résidentiel : Habitations d'un ou deux étages, les rues sont en général à deux voies et des voitures sont stationnées le long des bas-côtés, possibilité de feuillage plus ou moins dense ainsi trafic automobile habituellement léger.

Rural : Petites maisons entourées de grands jardins, incidences de la topographie, possibilité de feuillage plus ou moins dense et trafic automobile parfois élevé.

Dans chacun de ces quatre environnements on tient compte de deux scénarios possibles d'utilisation du terminal mobile, les usagers étant divisés en piétons et en automobilistes.

Pour ces deux applications, la vitesse de déplacement du mobile est très différente, d'où des effets Doppler différents.

Le Tableau 3 indique les vitesses types retenues pour ces scénarios :

Tableau 1. 5 : Vitesses types de déplacement du mobile. [15].

Milieu	Vitesse pour les piétons	Vitesse pour les véhicules
Urbain élevé	1,5 m/s	Vitesse type en centre-ville d'environ 50 km/h (14 m/s)
Urbain/suburbain faiblement élevé	1,5 m/s	Environ 50 km/h (14 m/s); routes express jusqu'à 100 km/h (28 m/s)
Résidentiel	1,5 m/s	Environ 40 km/h (11 m/s)
Rural	1,5 m/s	80-100 km/h (22-28 m/s)

Le type de mécanisme de propagation qui domine dépend, notamment, de la hauteur à laquelle se situe l'antenne de la station de base par rapport aux bâtiments environnants.

Le Tableau 4 définit les types de cellule usuels pour une propagation sur une petite distance à l'extérieur des bâtiments.

Tableau 1. 6 : Types de cellule. [15].

Type de cellule	Rayon de la cellule	Emplacement type de l'antenne de la station de base
Macro-cellule de petite taille	0,5 km à 3 km	En extérieur, installée au-dessus du niveau moyen des toits, certains bâtiments environnants pouvant être plus hauts que la hauteur d'antenne de la station de base
Microcellule	100 m à 500 m	En extérieur, installée au-dessous du niveau moyen des toits
Pico-cellule	Jusqu'à 100 m	En intérieur ou en extérieur (installée au-dessous du niveau des toits)

Un modèle de propagation RF (Radio Fréquence) est une formule mathématique utilisée pour caractériser la propagation de l'onde radio entre l'émetteur et le récepteur. Cette formule dépend de plusieurs facteurs, à savoir :

- La fréquence de l'onde.
- La distance parcourue par l'onde.
- Les hauteurs des antennes de l'émission et de la réception.
- Type de terrain (morphologie).
- Clutter (caractéristiques et densité des bâtiments).

Il existe plusieurs modèles de propagation RF, on cite quelques modèles les plus utilisés :

1.5.2.1 Modèles de propagation en espace libre :

Le modèle de prédiction de la propagation en espace libre est le premier modèle qui a été proposé, il est utilisé en supposant que le chemin entre l'émetteur et le récepteur est complètement dégagé. C'est le cas des communications par satellites. La puissance reçue après une distance d de l'émetteur est égale à :

$$P_r = \frac{P_e G_e G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2 L} \quad (1.6)$$

Avec :

- λ : Longueur d'onde.
- P_e : Puissance émise.
- G_e : Gain de l'antenne d'émission.
- G_r : Gain de l'antenne de réception.
- L : Facteur de perte du système, il est indépendant de la propagation et toujours supérieur ou égal à 1, Il est dû aux pertes des filtres, des antennes etc....
- $L=1$ indique que le système ne possède aucune perte.

L'atténuation du parcours est définie comme une grandeur positive exprimée en dB qui traduit la différence (dB) entre la puissance émise et la puissance reçue. En appliquant cette définition dans le cas de la propagation en espace libre, l'atténuation de parcours est donnée par :

$$PL \text{ (dB)} = 10 \log \left(\frac{P_e}{P_r} \right) = -10 \log \left(\frac{G_e G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2} \right). \quad (1.7)$$

Lorsque $G_e=G_r=1$, l'atténuation résultante entre l'émetteur et le récepteur est :

$$PL \text{ (dB)} = 20 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right). \quad (1.8)$$

Il est à noter que le modèle de propagation en espace libre n'est utilisé que lorsque le récepteur est suffisamment éloigné de l'émetteur, ou situé dans la région de Fraunhofer. La région de Fraunhofer d'une antenne est définie comme la région au-delà d'une distance qui dépend de la dimension de l'aire équivalente de l'antenne et la longueur d'onde de la porteuse.

Elle est donnée par : $df = \frac{2D^2}{\lambda}$. (1.9) : Où D est la dimension de l'antenne physique.

En pratique la puissance reçue en un point situé à une distance d dans la région de Fraunhofer se calcule par rapport à une distance de référence d_0 . La puissance P (d_0) peut être calculée ou dégagée à partir des mesures faites dans un environnement donné.

1.5.2.2 Modèles empiriques :

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

Leur qualification d'empirique vient du fait que ces modèles sont élaborés à partir des statistiques effectuées sur un ensemble de mesures. La classification des modèles empiriques se fait selon leurs distances d'application. On distingue deux catégories : **Outdoor** et **Indoor**.

1.5.2.2.1 Modèles Outdoor :

1.5.2.2.1.1 Modèle d'Okumura-Hata

Le modèle **Okumura-Hata** est une formulation empirique des données de perte de trajectoire graphique pour bande 150-1500 MHz [15]. La distance de séparation entre l'émetteur et le la portée du récepteur est de 1 à 20 km. La formule standard pour l'affaiblissement du trajet médian dans les zones urbaines est donnée par l'équation (1.10) :

$$PL_{\text{urban}} = 69.55 + 26.16 \log(f) - 13.82 \log(h_b) + (44.9 - 6.55 \log(h_b)) \log(d) - a(h_m). \quad (1.10)$$

Les facteurs de correction pour la hauteur des antennes mobiles en milieu urbain sont donnés par les équations (1.11) et (1.12)

$$a(h_m) = 8.29 [\log(1.54 h_m)]^2 - 1.1 \quad \text{pour } f \leq 400 \text{ Mhz} \quad (1.11)$$

$$a(h_m) = 3.2 [\log(11.75 h_m)]^2 - 4.97 \quad \text{pour } f \geq 200 \text{ Mhz} \quad (1.12)$$

L'expression des pertes Pour un environnement suburbaine :

$$PL_{\text{suburban}} = PL_{\text{urban}} \text{ (dB)} - 2 [\log (f/28)]^2 - 5.4 \quad (1.13)$$

L'expression des pertes Pour un environnement rural dégagé :

$$LP_{\text{rural}} = PL_{\text{urban}} \text{ (dB)} - 4.78 [\log (f)]^2 + 18.33 \log (f) - 40.98. \quad (1.14)$$

Avec:

- f : fréquence en Mhz ($150 \text{ Mhz} \leq f \leq 1500 \text{ Mhz}$).
- d : distance entre la station de base et le mobile en Km ($1 \text{ Km} \leq d \leq 20 \text{ Km}$).
- h_b : hauteur de la station de base en m ($30\text{m} \leq h_b \leq 200 \text{ m}$).
- h_m : hauteur du mobile en m ($1 \text{ m} \leq h_m \leq 10 \text{ m}$).

Le modèle d'Okumura-Hata ne tient toutefois pas compte des reliefs précis tels que les masques de diffraction, de plus la bande de fréquence interdit son utilisation pour des applications comme la planification de LTE. A cet effet un modèle amélioré a été proposé, c'est celui de COST231 de HATA.

1.5.2.2.1.2 Modèle COST 231 de Hata :

Le COST 231 étend le modèle Hata pour couvrir la gamme de fréquences de 1500 à 2000 MHz [17]. La hauteur de l'émetteur varie de 30 à 200 m. La hauteur du récepteur peut être entre 1 et 10 m. Le modèle de perte de trajectoire est donné par les équations (1.15), (1.16) et (1.17) :

$$LP=46.3+33.9 \log (f)-13.82 \log \left(h_b\right)-a\left(h_m\right)+\left[44.9-6.559 \log \left(h_b\right)\right] \log (d)+C \quad (I.15)$$

Pour les villes rurales et suburbaines :

$$a\left(h_m\right)=\left[\left(1.1 \log (f) 0.7\right) * h_m\right]-1.56 \log (f)+0.8 \quad (1.16)$$

Pour les villes urbaines :

$$a\left(h_m\right)=\left[3.2 \log \left(11.75 * h_m\right)\right]^2-7.97 \quad (1.17)$$

Les valeurs de C sont données comme suivant :

- Pour les zones suburbaines et rurales : $C = 0$
- Pour les zones urbaines : $C = 3$

Les plages des paramètres est le suivant :

- f : 1500–2000 MHz
- h_b : 30–200 m

- h_m : 1–10 m
- d : 1–20 km

1.5.2.2.1.3 Modèle d'Egli

Ce modèle est applicable à la gamme de fréquences de 40 à 900 MHz à une distance de séparation maximale de 60 km [18]. Il a été élaboré à partir de données de mesure sur les ondes UHF et VHF des transmissions télévisées dans plusieurs grandes villes. La formule du modèle Egli de perte de trajectoire est donnée par l'équation (1.18) :

$$PL = 20 \log f + 40 \log d - 20 \log (h_b) + \begin{cases} 73.6 - 10 \log (h_m) & , h_m \leq 10 \text{ m} \\ 85.9 - 20 \log (h_m) & , h_m \geq 10 \text{ m} \end{cases} \quad (1.18)$$

1.5.2.2.1.4 Modèle Ericsson 9999

L'équation spécifiant la perte de trajet pour ce modèle est illustrée dans l'équation (1.19) :

$$P_{Ericsson} = a_0 + a_1 \log d + a_2 \log h_b + a_3 \log h_b \log d - 3.2 \log(11.76 h_m)^2 g(f) \quad (1.19)$$

$$\text{Avec : } g(f) = 44.49 \log f - 4.78 \log_f 2$$

Les paramètres a_0 , a_1 , a_2 et a_3 , donnés dans l'équation (1.19) sont des constantes, qui peuvent être réglées au mieux s'adapter aux conditions de propagation spécifiées. Les valeurs par défaut d' a_0 , a_1 , a_2 et a_3 pour différents les catégories d'environnement sont spécifiées dans le tableau suivant :

Tableau 1. 7 : Les valeurs par défaut de a_0 , a_1 , a_2 et a_3

Type de zone	a_0	a_1	a_2	a_3
Urbaine	36.2	30.2	12.0	0.1
Suburbaine	43.20	68.93	12.0	12.1
Rurale	45.95	100.6	12	0.1

1.5.2.2.2 Modèles Indoor :

Plusieurs types de modèles empiriques étaient proposés pour résoudre le problème de propagation Indoor.

Exemples : Modèle SUI, Modèle Log Normal SHADOWING.....

1.6 Conclusion

Le système LTE commence tout juste à être déployé que déjà les ingénieurs ont commencé à normaliser la quatrième génération de réseaux mobiles.

Avec LTE-Advanced, on peut maintenant vraiment parler de nouvelle génération dans la mesure où ce système a été accepté en octobre 2010 par l'ITU comme faisant partie des technologies dites IMT-Advanced.

Il a fallu pour cela remplir un certain nombre de conditions en termes d'efficacité spectrale, de bande passante, de latence, de mobilité, de couverture et de capacité.

L'IMT-Advanced exige par exemple des débits crête de 15 bps/Hz sur la voie descendante (pour une configuration MIMO 4×4) et 6,75 bps/Hz sur la voie montante (MIMO 2×4).

Une capacité de 2,2 bps/Hz/cellule (MIMO 4×2) est requise sur la voie descendante, 1,4 bps/Hz/cellule (MIMO 2×4) sur la voie montante.

Le débit en bordure de cellule doit atteindre 0,06 bps/Hz/utilisateur sur la voie descendante et 0,03 bps/Hz/utilisateur sur la voie montante.

Une bande passante d'au moins 40 MHz doit être supportée. Le 3GPP, avec son nouveau système, va au-delà de ces chiffres et permet ainsi au LTE-Advanced d'obtenir le label de l'IMT-Advanced.

Il ne s'agit pas seulement d'une réussite symbolique et technique mais c'est aussi la possibilité d'accéder à de nouveaux spectres réservés par l'ITU pour la quatrième génération.

CHAPITRE 2 : ALGORITHME PSO

2.1 Les méthodes approchées

Les méthodes approchées ont pour but de trouver une solution admissible dans un temps raisonnable, mais sans garantie l'optimalité de cette solution. L'avantage principal de ces méthodes est qu'elles peuvent s'appliquer à n'importe quelle classe de problèmes, faciles ou très difficiles. De plus, elles ont démontré leurs robustesses et efficacités face à plusieurs problèmes d'optimisation combinatoires. [19]

Elles englobent deux classes : Heuristiques et Méta-heuristiques

- Heuristiques : Les heuristiques sont des règles empiriques simples basées sur l'expérience, ne fournissant pas nécessairement une solution optimale.
- Méta-heuristiques : peut être définie comme une méthode algorithmique capable de guider et d'orienter le processus de recherche dans un espace de solution (souvent très grand) à des régions riches en solutions optimales dans le but de trouver des solutions, peut-être pas toujours optimales, en tout cas très proches de l'optimum, en un temps raisonnable. de l'optimum en un temps raisonnable.

2.2 PSO (Particle Swarm Optimization)

PSO est un algorithme heuristique de Méta proposé à l'origine par Kennedy et Eberhart. L'algorithme simule le comportement des volées d'oiseaux volant ensemble dans un espace multidimensionnel à la recherche d'un lieu optimal, ajuster leurs mouvements et leurs distances pour une meilleure recherche.

La PSO est une méthode de calcul évolutive similaire à l'algorithme génétique (GA). Les essaims appelés particules sont initialisés de manière aléatoire et recherchent ensuite l'optimum en mettant à jour PSO a deux approches : l'une est dite cognitive et l'autre sociale.

L'algorithme imite une particule volant dans l'espace de recherche et se déplaçant vers l'optimum global. Une particule dans l'OSP peut être définie comme $P_i \in [a, b]$ avec $i=1,2, 3 \dots D$ et $a, b \in R$, D est pour les dimensions et R est pour les nombres réels [6]. Chaque particule a sa propre vitesse et sa propre position qui sont initialisées de façon aléatoire au départ. Chaque particule doit maintenir sa position P_{best} Connue comme la meilleure position locale et G_{best} qui est connue comme la meilleure position globale parmi toutes les particules.

Souvent Les équations sont utilisées pour mettre à jour la position et la vitesse de la particule. [20]

2.3 Définition

Dans la PSO le comportement social est modélisé par une équation mathématique permettant de guider les particules durant leur processus de déplacement [21]. Le déplacement d'une particule est influencé par trois composantes : la composante d'inertie, la composante cognitive et la composante sociale. Chacune de ces composantes reflète une partie de l'équation, figure 2.1 [22] :

- La composante d'inertie : la particule tend à suivre sa direction courante de déplacement.
- La composante cognitive : la particule tend à se diriger vers le meilleur site par lequel elle est déjà passée.
- La composante sociale : la particule tend à se diriger vers le meilleur site atteint par ses voisins.

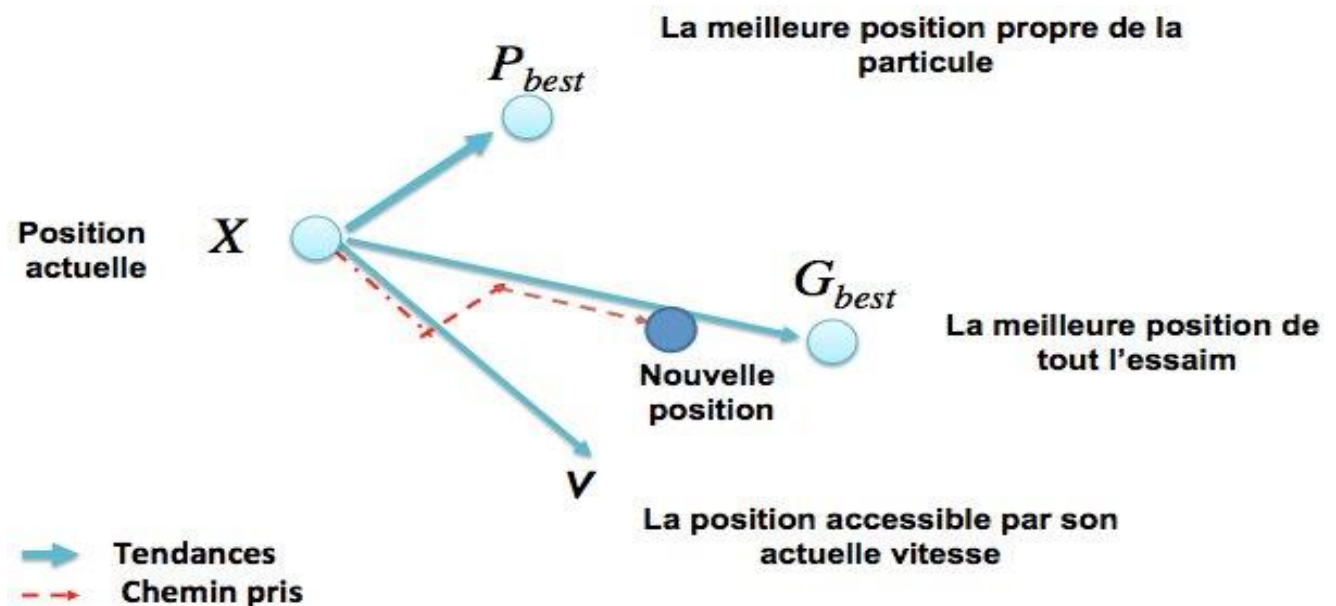


Figure 2. 1 : Déplacement d'une particule [23].

2.4 Les caractéristiques principales de PSO

Ce modèle présente quelques propriétés intéressantes, qui en font un bon outil pour de nombreux problèmes d'optimisation, particulièrement les problèmes fortement non linéaires, continus ou mixtes (certaines variables étant réelles et d'autres entières) :

- Il est facile à programmer, quelques lignes de code suffisent dans n'importe quel langage évolué.

- Il est robuste (de mauvais choix de paramètres dégradent les performances, mais n'empêchent pas d'obtenir une solution) [24].

Pour réaliser son prochain mouvement, chaque particule combine trois tendances :

- Suivre sa vitesse propre,
- Revenir vers sa meilleure performance,
- Aller vers la meilleure performance de ses informatrices.

2.5 Trois règles locales

Comprendre ces phénomènes et la coordination des mouvements de ces populations Chaque « boid » se déplace selon sa propre perception de l'environnement avec des règles simples.

- Séparation : ne pas heurter ses voisins en s'éloignant des proches

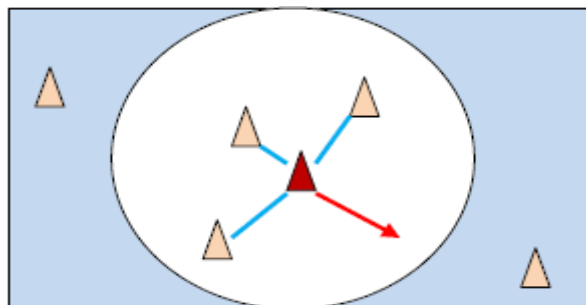


Figure 2. 2 : Séparation.

- Alignement : Se déplacer dans la même direction que l'ensemble en moyennant les vitesses et les directions

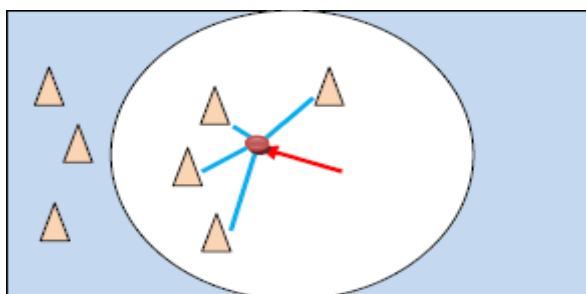


Figure 2. 3 : Alignement.

- Cohésion : se maintenir dans le groupe en se déplaçant vers le centre perçu de la formation

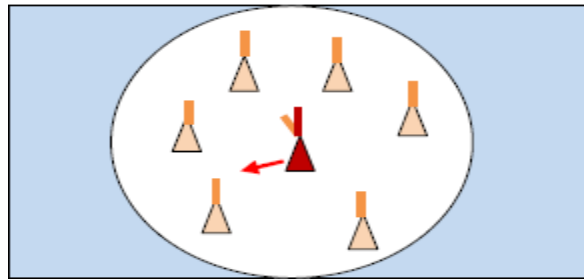


Figure 2.4 : Cohésion.

Ces trois règles de bases, permettent l'attraction et la répulsion de chacun des individus et permet la stabilité de l'ensemble [25].

2.6 Formulation

Une particule i de l'essaim dans un espace de dimension \mathbf{D} est caractérisée à l'instant \mathbf{t} par :

- V_i est la vitesse
- X_i est la position
- P_{best} est la meilleure position personnelle de la particule
- G_{best} est la meilleure position globale pour la PSO.
- r_1, r_2 sont deux plages de nombres aléatoires $[0, 1]$
- C_1, C_2 sont les facteurs d'inclinaison

Le déplacement de la particule i entre les itérations t et $t+1$ se fait selon les deux équations 2.1 et 2.2 :

$$V_i(t + 1) = V_i(t) + C_1 * r_1(P_{best} - X_i(t)) + C_2 * r_2(G_{best} - X_i(t)) \quad (2.1)$$

$$X_i(t + 1) = X_i(t) + V_i(t + 1) \quad (2.2)$$

2.7 Algorithme de principe

L'algorithme de base de la méthode PSO commence par une initialisation aléatoire des particules dans leur espace de recherche, en leurs attribuant une position et une vitesse initiales.

À chaque itération de l'algorithme les particules se déplacent selon les équations 2.1 et 2.2 et les fonctions objectives (fitness) des particules sont calculées afin de pouvoir calculer la meilleure position de tout l'essaim G_{best} . La mise à jour des P_{best} et G_{best} est faite à chaque itération suivant l'algorithme cité en figure 2.5

Le processus est répété jusqu'à satisfaction du critère d'arrêt.

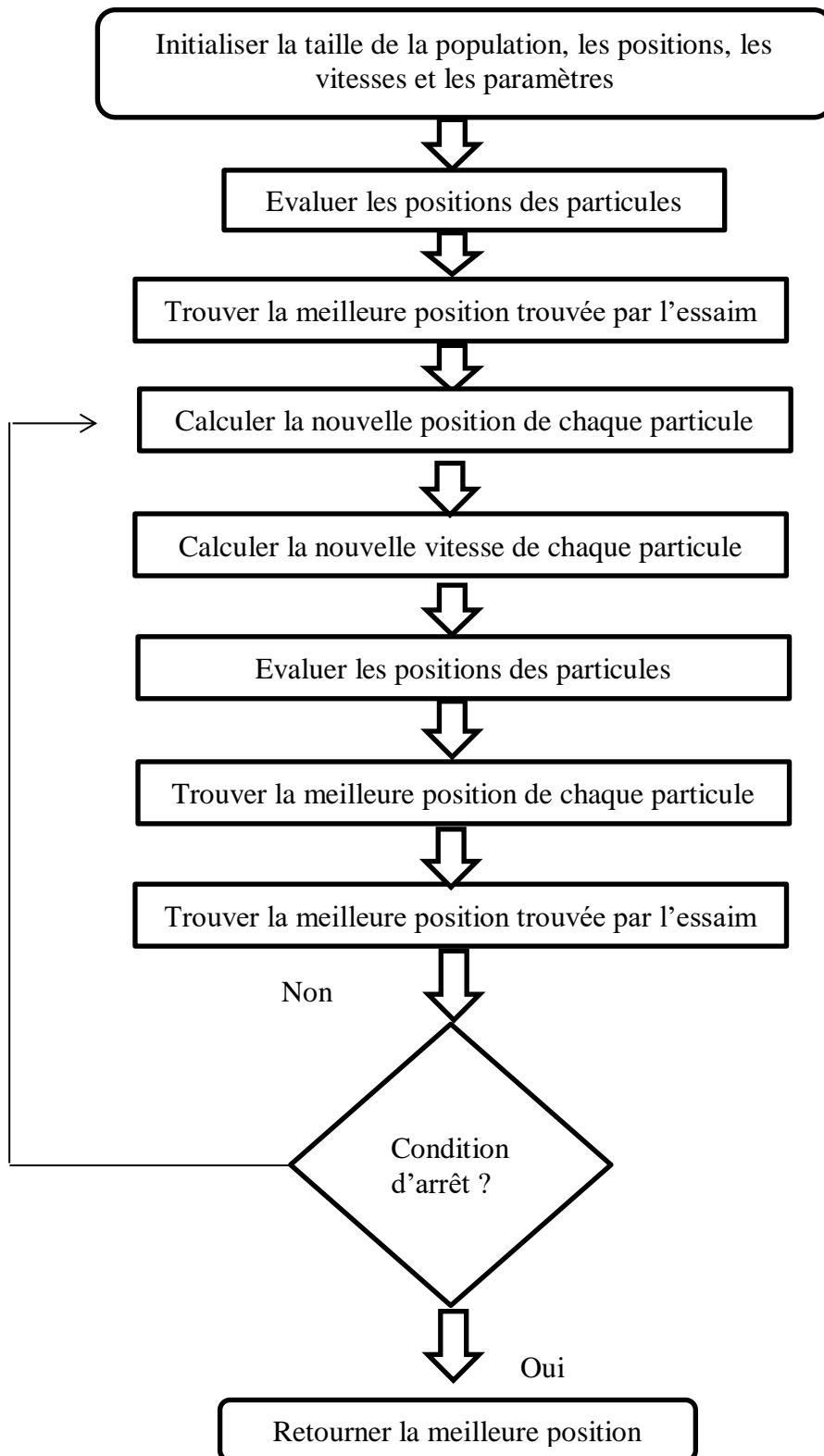


Figure 2. 5 : Organigramme de l'algorithme d'optimisation par essaim de particules.

- **Les variables et paramètres de l'algorithme :**
 - N nombre de particules
 - V_i est la vitesse,
 - X_i est la position
 - P_{best} est la meilleure position personnelle de la particule
 - G_{best} est la meilleure position globale pour la PSO.
 - r_1, r_2 sont deux plages de nombres aléatoires

- **Initialisations :**

Initialiser aléatoirement la population.

- **Traitement :**

Répéter

Pour **i** de **1** à **N** faire

Si ($F(X_i) > P_{best}$)

$$P_{best} \leftarrow F(X_i)$$

$$X_{P_{best}} \leftarrow X_i$$

Fin Si

Si ($F(X_i) > G_{best}$)

$$G_{best} \leftarrow F(X_i)$$

$$X_{G_{best}} \leftarrow X_i$$

Fin Si

Fin Pour

Pour **i** de **1** à **N** faire

$$V_i = V_i + C_1 * r_1(P_{best} - X_i) + C_2 * r_2(G_{best} - X_i)$$

$$X_i = X_i + V_i$$

Fin Pour

Jusqu'à ce que (le processus converge)

2.8 Les Paramètres

Parmi les paramètres de cet algorithme nous avons :

- La dimension du problème
- Le nombre des particules
- Les coefficients de confiance
- La notion du voisinage
- La vitesse maximale
- Le facteur d'inertie
- Le facteur de construction
- Le critère d'arrêt

2.8.1 La dimension du problème

C.-à-d. le nombre de paramètres qui va optimiser par cet algorithme.

2.8.2 Le nombre des particules

La quantité de particules allouées à la résolution du problème dépend essentiellement de deux paramètres :

- La taille de l'espace de recherche
- Le rapport entre les capacités de calcul de la machine et le temps maximum de recherche.

Il n'y a pas de règle pour déterminer ce paramètre, faire de nombreux essais permet de se doter de l'expérience nécessaire à l'appréhension de ce paramètre [25].

2.8.3 Les coefficients de confiance

Les variables de confiance pondèrent les tendances de la particule à vouloir suivre son instinct conservation ou son panurgisme. Les variables aléatoires $p1$ et $p2$ peuvent être définis de la façon

suivante :
$$\begin{cases} P1 = r1 + c1 \\ P2 = r2 + c2 \end{cases}$$

Où $r1$ et $r2$ suivent une loi uniforme sur $[0..1]$ et $c1$ et $c2$ sont des constantes positives déterminées de façon empirique et suivant la relation $c1 + c2 \leq 4$ [25].

2.8.4 La notion du voisinage

Le voisinage constitue la structure du réseau social. Les particules à l'intérieur d'un voisinage communiquent entre-elles. En général, pour une nuée d'oiseaux, le voisinage suit trois types de topologies :

- Topologie en étoile (Figure 2.6 (a)) : le réseau social est complet, donc une communication complète et une attirance vers la meilleure particule.
- Topologie en anneau (Figure 2.6 (b)) : chaque particule communique avec n voisines immédiates. Chaque particule tend à se déplacer vers la meilleure dans son voisinage local.
- Topologie en rayon (Figure 2.6 (c)) : 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.

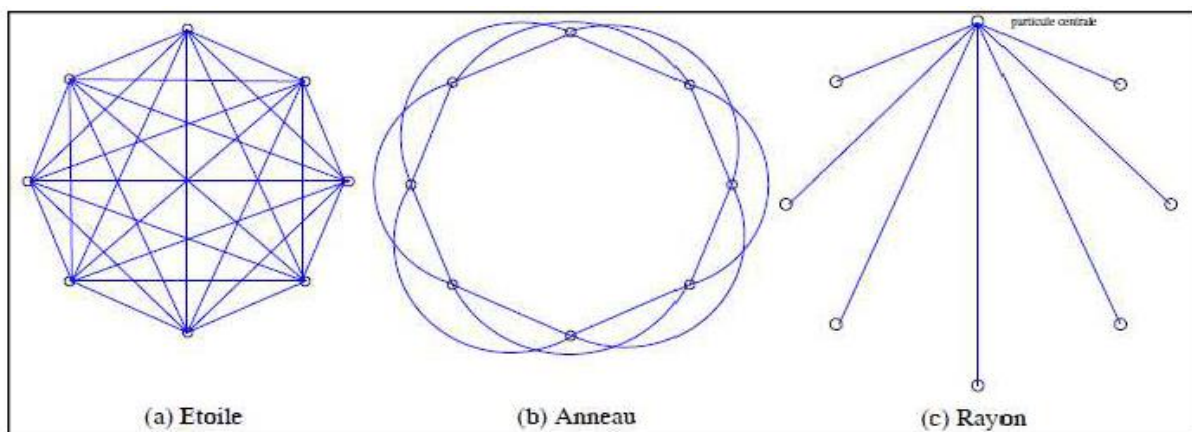


Figure 2. 6 : différents types de topologie pour un essaim de particule [26].

2.8.5 La vitesse maximale

La vitesse peut être limitée par une vitesse maximale V_{max} et une vitesse minimale V_{min}

Pour éviter que les particules se déplacent trop rapidement ou trop lentement d'une région à une autre dans l'espace de recherche.

2.8.6 Le facteur d'inertie

Le coefficient d'inertie w a été introduit pour contrôler l'influence de la direction de la particule sur le déplacement futur [27]. Le but de l'introduction de ce paramètre est de réaliser un équilibre entre la recherche locale (exploitation) et la recherche globale (exploration). La formule 2.1 de calcul de la vitesse devient :

$$V_i(t + 1) = wV_i(t) + C_1 * r_1(P_{best} - X_i(t)) + C_2 * r_2(G_{best} - X_i(t)) \quad (2.3)$$

La valeur de w est généralement constante, mais peut être variable dans certains cas, une grande valeur de w est synonyme d'une grande amplitude de mouvement et donc d'exploration globale de l'espace de recherche. Les études menées par [27] indiquent une meilleure convergence pour w entre 0.8 et 1.2.

La détermination de la meilleure valeur de ce paramètre pour chaque algorithme se fait à travers des expérimentations numériques. Un coefficient d'inertie dynamique qui varie au cours du temps a été proposé [28], et diminue linéairement au cours du processus de l'optimisation. Il commence par une valeur proche de 0.9 et descend linéairement pour arriver à 0.4.

2.8.7 Le facteur de construction

Le facteur de constriction k a été proposé dans le but d'améliorer la convergence de l'algorithme, de prévenir l'explosion de l'essaim et de contrôler la vitesse des particules afin d'échapper au problème de la divergence de l'essaim qui cause la convergence prématurée de l'algorithme [29].

La formule de la vitesse 2.1 devient alors :

$$V_i(t + 1) = kV_i(t) + C_1 * r_1(P_{best} - X_i(t)) + C_2 * r_2(G_{best} - X_i(t)) \quad (2.4)$$

$$\text{Où : } k = \frac{2}{|2 - \sigma - \sqrt{\sigma^2 - 4\sigma}|} \quad \text{avec } \begin{cases} \sigma = \sigma1 + \sigma2 \geq 4.0 \\ \sigma1 = c1 * r1 \\ \sigma2 = c2 * r2 \end{cases}$$

Selon d'autres études dans certains cas, le coefficient de constriction seul ne permet pas la convergence vers la solution optimale pour un nombre d'itérations donné [30]. Pour résoudre ce problème, il peut être intéressant de fixer $V_{max} = X_{max}$ en plus du coefficient de constriction, ce qui permet d'améliorer les performances globales de l'algorithme.

2.8.8 Le critère d'arrêt

Le critère d'arrêt diffère suivant le problème d'optimisation posé et les contraintes de l'utilisateur, il est fortement conseillé de doter l'algorithme d'une porte de sortie puisque la convergence vers la solution optimale globale n'est pas garantie dans tous les cas de figure même si les expériences dénotent la grande performance de la méthode. De ce fait plusieurs études ont été menées dans ce sens [31], différentes propositions ont eu lieu : l'algorithme doit alors s'exécuter tant que l'un des critères de convergence n'a pas été atteint cela, Peut-être : le nombre maximum d'itérations, l'optimum global est connu a priori, on peut définir une "précision acceptable". D'autres critères d'arrêt peuvent être utilisés selon le problème d'optimisation posé et des contraintes utilisateurs.

2.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les méthodes approchées qui ont pour but de trouver une solution admissible en un temps raisonnable, et aussi bien l'algorithme d'optimisation par essaim particulaire (PSO) inspiré du monde des animaux (espèces d'oiseaux).

En raison de la simplicité de ce dernier et de son efficacité sur une vaste gamme de problèmes, cette méthode a rencontré un franc succès, sans toutefois que l'utilisateur ait à modifier la structure de base de l'algorithme.

Le PSO bien qu'il se soit heurté à des problèmes majeurs (comme la convergence prématurée, qui peut conduire les algorithmes de ce type à stagner dans un optimum local par exemple) a pu (grâce à son caractère, capacité/évolutionnaire) être amélioré de façon permanente et significative. Cette maniabilité lui confère sans-contredit de nombreuses perceptives et solutions non anodines.

CHAPITRE 3 : RÉSULTATS ET DISCUSSION

Contacteur : djellabhanane@yahoo.fr

Conclusion Générale

Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes intéressées au problème d'affaiblissement dans une interface UM (user mobile) dans le réseau cellulaire de quatrième génération (4G).

A travers ce projet de fin d'études, nous avons développé un outil d'optimisation permettant de minimiser l'erreur entre les pertes prédites et mesurées dans le réseau 4G basé sur l'optimisation par essaim de particule.

Pour évaluer les performances de notre algorithme, nous avons considéré le réseau cellulaire de l'opérateur MOBILIS pour la ville de TEBESSA. En effet, nous avons ajusté les paramètres d'un modèle empirique en fonction de mesures réelles dans un environnement suburbain de l'eNoodB 12668 cité 1^{er} Novembre de la wilaya de Tébessa. Cela a rendu le modèle plus précis pour la prédiction d'affaiblissement.

Dans l'étape de simulation, on a remarqué que le modèle cost231 et Ericsson donne des meilleurs résultats par rapport aux autres modèles empiriques (Hata et égli) dans le milieu SubUrbain.

Comme perspectives, on peut utiliser d'autres modèles hybrides en combinant les méthodes de prédictions et d'optimisations.

Enfin ce travail nous a été très enrichissant. Il nous a permis de toucher de près une partie très importante dans la planification des réseaux 4G.

Références Bibliographiques

- [1] Bouguerra Yaaqoub et Delloum Sarra, Master Académique, Optimisation paramétrique pour estimation des pertes dans un réseau GSM utilisant l'algorithme PSO, 2017
- [2] Christopher Cox. An introduction to LTE, LTE-Advanced, SAE, VoLTE and 4G mobile communications. 2014
- [3] MEHTA, Heman. Exploration of Fourth Generation–LTE Wireless System and Design: A Survey. Work, 2004.
- [4] PRIYANTO, Basuki E., CODINA, Humbert, RENE, Sergi, et al. Initial performance evaluation of DFT-spread OFDM based SC-FDMA for UTRA LTE uplink. In: 2007 IEEE 65th Vehicular Technology Conference-VTC2007-Spring. IEEE, 2007. p. 3175-3179.
- [5] Davide Sartori, Prof. Roberto Corvaja, LTE : Caratteristiche della Rete di Accesso, Università degli Studi di Padova, 2012
- [6] Thierry Letertre, Méthodologie pour l'évaluation des signaux émis par les technologies émergentes : application à la compatibilité électromagnétique des systèmes et à l'exposition des personnes, Soutenue le 11 Décembre 2013.
- [7] ETSI TS 136 101. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception. 2011.
- [8] Mayada Faris Ghanim, Aws Zuheer Yonis
Ninevah University, Mohammad Faiz Liew Abdullah, LTE-FDD and LTE-TDD for cellular communications, January 2012
- [9] JAMLOS, Mohd Aminudin, MUSTAFA, Wan Azani, IDRUS, Syed Zulkarnain Syed, et al. Mimo Antenna for LTE Advance Application. In : Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2020. p. 042016.
- [10] GHAYOULA, E., BOUALLEGUE, A., GHAYOULA, R., et al. Capacity and Performance of MIMO systems for Wireless Communications. Journal of Engineering Science and Technology, Review, 2014, vol. 7, no 3.
- [11] Houda Tounsi, Optimisation de la couverture radio du réseau 4G de tunisie Telecom, Master professionnel 2015-2016
- [12] Xavier Lagrange et al, « Réseaux GSM », Hermes, Paris, 1995, 1996, 1997, 1999, 2000

- [13] Hamlili Heyem <<Conception et développement d'un outil d'aide à la planification et dimensionnement de l'E-UTRAN d'un réseau LTEAdvanced >> Université Aboubakr Belkaïd–Tlemcen, mai 2016.
- [14] LASSOUED ali, Rapport PFE, Outil de planification et de dimensionnement dans l'E-UTRAN LTE-Advanced, Sup'Com, 2012
- [15] CHIHAOUI Dihia, MOUDIR Sonia, MASTER ACADEMIQUE : Dimensionnement d'un réseau 4G LTE, Soutenu publiquement le 2018.
- [16] HOLMA, Harri et TOSKALA, Antti (ed.). LTE for UMTS: OFDMA and SC-FDMA based radio access. John Wiley & Sons, 2009.
- [17] Masahara, H.: Empirical formula for propagation loss in land-mobile radio services. IEEE Trans. Veh. Technol. 29(3), 317–325 (1980)
- [18] Netherlands, The Hague, COST 231 Project: Urban Transmission Loss Models for Mobile Radio in the 900 and 1800 MHz band, COST 231 TD (90) 119 Rev. 2, (1991)
- [19] Parsons, J.D.: The Mobile Radio Propagation Channel, 2nd edn. Wiley, New York (2000)
- [20] HEURISTIQUES ET METHA HEURISTIAUES, Mm ARROUSI, Master 2015-2016
- [22] Alessandro Passaro and Antonina Starita , Particle Swarm Optimization for Multimodal Functions:A Clustering Approach, Received 13 July 2007; Revised 18 December 2007; Accepted 8 February 2008.
- [23] 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.
- [24] COOREN Y., Perfectionnement d'un algorithme adaptatif d'Optimisation par Essaim Particulaire. Applications en génie médical et en électronique. Thèse de Doctorat, Université de Paris 12 Val de Marne, France. 2008.
- [25] ZEMZAMI, Maria, ELHAMI, Norelislam, MAKHLOUFI, Abderahman, et al. Application d'un modèle parallèle de la méthode PSO au problème de transport d'électricité. OpenScience-ISTE Science Publishing, 2016.
- [26] A.Toumi, Ab.Taleb-Ahmed, Kh. Benmahammed, N.Rechid, « Optimisation par essaim de particules : Application à la restauration supervisée d'image », LIRISCNRS, 2005, pp18.
- [27] M. Bombrun, A. Sene, « L'optimisation par essaim particulaire pour des problèmes D'ordonnancement », Institut Supérieur d'Informatique de Modélisation et de leurs

Applications, France, Rapport d'ingénieur, 2011/2012.

[28] G. Calas, « Optimisation par essaim particulaire », revue, EPITA, 2009, pp1-3.

[29] SHI Y., EBERHART R.C., Parameter selection in particle swarm optimization. In : Proceedings of the Seventh Annual Conference on Evolutionary Programming, pp. 591-600. 1998.

[30] SHI Y., EBERHART R.C., Empirical study of particle swarm optimization. In : Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), pp.1945-1950. 1999.

[31] CLERC M., KENNEDY J., The particle swarm - explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space. In: IEEE Trans. Evolutionary Computation, 6(1): pp.58-73.an international journal, 1(2-3), pp.235- 306. 2002.

[32] RUSS C., EBERHART SHI R., Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization. In: Proceedings of the Congress on Evolutionary Computing, pp. 84-89. 2000.