

<b><u>Introduction</u></b> .....	1
----------------------------------	---

## **Chapitre I : Les caractéristiques et les différents composants de la technologie 4G LTE**

<b>1.1 Généralités de la technologie LTE</b> .....	3
<b>1.2 Caractéristique de la technologie LTE (4G)</b> .....	3
1.2.1 Augmentation de la capacité.....	3
1.2.2 Augmentation du débit.....	4
1.2.3 Diminution de la latence.....	4
1.2.4 La flexibilité spectrale ou agilité en fréquence.....	4
1.2.5 La mobilité.....	5
<b>1.3 Architecture générale du réseau LTE</b> .....	5
1.3.1 Le réseau cœur EPC.....	5
1.3.2 Le Réseau d'accès E-UTRAN.....	8
1.3.3 Le Réseau CœurCN.....	8

## **Chapitre II : Modèle de propagation de la technologie 4G LTE**

<b>2.1 Le Canal Radio mobile</b> .....	11
2.1.1 Caractéristiques d'un canal radio mobile.....	11
2.1.2 Paramètres de propagation.....	13
<b>2.2 Modèles mathématiques d'un canal de transmission</b> .....	16
2.2.1 Canal invariant à bruit additif.....	17
2.2.2 Canal invariant à trajets multiples.....	17
2.2.3 Canal à trajets multiples variables dans le temps.....	19
<b>2.3 Classification des modèles de propagation</b> .....	19
2.3.1 Classification des environnements terrestres.....	20
2.3.2 Types des modèles de propagation.....	22
<b>2.4 Modèle de propagation standard</b> .....	23
2.4.1 Modèles ITU à trajet multiples.....	23
2.4.2 Le Modèle ITU étendu.....	24

## **Chapitre III : Le dimensionnement de la technologie LTE**

<b>3.1</b>	L'objectif de dimensionnement.....	26
<b>3.2</b>	Dimensionnement de couverture.....	26
3.2.1	Bilan de liaison.....	26
3.2.2	Paramètres du bilan de liaison.....	28
3.2.3	Calcul du bilan de liaison pour les liens montant et descendant.....	31
3.2.4	Modèles de propagation RF.....	34
3.2.5	Calcul du nombre de sites en se basant sur le bilan de liaison.....	39
3.2.6	Dimensionnement des interfaces S1 et X2.....	40

## **Chapitre IV : Simulation d'Algorithme d'optimisation de la technologie LTE**

<b>4.1</b>	Choix du simulateur.....	43
4.1.1	LTE-SIM.....	43
4.1.2	OPNET.....	43
4.1.3	NS-2.....	44
4.1.4	NS-3.....	44
<b>4.2</b>	Présentation du simulateur NS-3.....	44
<b>4.3</b>	Terminologie et abstractions.....	44
4.3.1	Un nœud "Node".....	45
4.3.2	Une application "Application".....	45
4.3.3	Un canal communication "Channel".....	45
4.3.4	Une interface de communication.....	45
<b>4.4</b>	Installation du simulateur NS-3.....	46
<b>4.5</b>	Déroulement de la simulation.....	46
4.5.1	Création d'un script dans le NS-3.....	47
4.5.2	Les indicateurs utilisés dans notre simulation.....	48
4.5.3	Résultats de la simulation.....	49
<b>4.6</b>	Algorithme d'optimisation.....	51
<b><u>Conclusion</u></b>	.....	53
<b><u>AnnexeA</u></b>	.....	54
<b><u>AnnexeB</u></b>	.....	55
<b><u>Références</u></b>	.....	57

## Liste des figures

---

<b><u>Figure 1.1</u></b> : Architecture générale d'un réseau LTE.....	6
<b><u>Figure 2.1</u></b> : Les différents mécanismes de propagation.....	13
<b><u>Figure 2.2</u></b> : Canal invariant à bruit additif.....	17
<b><u>Figure 2.3</u></b> : Canal invariant à trajet multiple.....	18
<b><u>Figure 2.4</u></b> : Canal à trajet multiple variable dans le temps.....	19
<b><u>Figure 2.5</u></b> : Classification des modèles de propagation.....	20
<b><u>Figure 4.1</u></b> : Architecture du nœud NS-3.....	45
<b><u>Figure 4.2</u></b> : Version du système.....	46
<b><u>Figure 4.3</u></b> : Etapes pour la réalisation d'une simulation.....	46
<b><u>Figure 4.4</u></b> : La communication entre UE et eNodeB.....	47
<b><u>Figure 4.5</u></b> : Profil de l'utilisateur (UE).....	47
<b><u>Figure 4.6</u></b> : Simulation sur le NS-3.....	48
<b><u>Figure 4.7</u></b> : SINR en fonction de la distance UE-eNodeB.....	50
<b><u>Figure 4.8</u></b> : CQI en fonction de la distance UE-eNodeB.....	50
<b><u>Figure 4.9</u></b> : TB en fonction de la distance entre UE-eNB.....	51
<b><u>Figure 4.10</u></b> : QOS Implémenté dans les Routeur MPBN.....	52

## Liste des tableaux

---

<b><u>Tableau 3.1</u></b>	: Paramètres pour le calcul de PIRE.....	29
<b><u>Tableau 3.2</u></b>	: Bilan de liaison Montant.....	32
<b><u>Tableau 3.3</u></b>	: Bilan de liaison Descendant.....	33
<b><u>Tableau 3.4</u></b>	: Modèle OKUMURA-HATA.....	36
<b><u>Tableau 3.5</u></b>	: Modèle COST231-HATA.....	37
<b><u>Tableau 3.6</u></b>	: Modèle Walfish-Ikegami.....	37
<b><u>Tableau 3.7</u></b>	: Paramétrage des terrains pour le Modèle Erceig Greenstein.....	38
<b><u>Tableau 3.8</u></b>	: Comparaison entre les Modèles de Propagation.....	39
<b><u>Tableau 3.9</u></b>	: Empreinte du site en fonction du nombre de secteurs.....	40

## Liste des abréviations

---

AuC	Authentication Center
CN	Core Network
CS	Core-switching
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
EIRP	Equivalent Isotrope Radiated Power
E-UTRAN	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
eNodeB	evolved Node B
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GMSC	Gateway Mobile Services Switching Center
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
HLR	Home Location Register
HSS	Home Subscriber Server
IMEI	International Mobile Equipment Identity
LTE	Long Term Evolution
MAPL	Maximum Allowed Path Loss
MME	Mobility Management Entity
MSC	Mobile Switching Center
NAS	Non-access stratum
PCRF	Policy and Charging Rules Function
PDN	Packet Data Network
PGW	Packet Gateway
PS	Packet-switching

PSTN	Public switched telephone network
QCI	QoS Class Identifier
RLB	Radio Link Budget
RLB	Radio Link Budget
SAE	System Architecture Evolution
SGSN	Serving GPRS Support Node
SGW	Serving Gateway
SHG	Gain de soft handover
SINR	Signal to Interference & Noise Ratio
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VLR	Visitor Location Register

## Introduction

---

Durant ces dernières années, les opérateurs de télécommunication à travers le monde, ont vu une croissance exponentielle d'abonnés mobiles. En même temps, le volume du trafic par abonné a été aussi en augmentation rapide ; particulièrement, avec l'introduction de plus en plus de dispositifs mobiles plus avancés et des services en temps réel tel que les services multimédias.

L'optimisation des réseaux d'accès radio devient, pour un opérateur, un enjeu fondamental lui permettant de minimiser les investissements, réduire le nombre de sites à déployer, et de garantir une bonne qualité de service aux utilisateurs. Une fois le réseau est opérationnel, l'opérateur doit veiller à son bon fonctionnement.

Comme pour toutes les autres technologies, le haut débit mobile a ses propres défis, même si des efforts ont été faits jusqu'à présent pour que cela se réalise. Cependant, l'optimisation pour l'amélioration de la performance semble être inévitable à tout moment. Une des préoccupations toujours présentes dans les services omniprésents dans les réseaux cellulaires est l'aspect de la mobilité. Le service doit être maintenu lorsque l'utilisateur est remis d'une cellule à une autre cellule.

Dans le cadre de notre projet, nous nous sommes particulièrement intéressés à l'optimisation des performances du réseau 4G LTE ou « Long Term Evolution ».

Pour cela nous avons structuré notre mémoire comme suit, dans la première partie nous donnons un aperçu sur la 4G LTE, nous avons présenté les caractéristiques et l'architecture de la technologie et ses différentes techniques.

La deuxième partie sera consacré à l'étude des Modèles de propagation du réseau 4G LTE et ses différents types de classifications.

En troisième partie, nous avons étudié le dimensionnement de la technologie suivi des formules mathématiques des propagations.

Le dernier chapitre sera consacré à la partie pratique dans laquelle nous essayerons de simuler les performances de la technologie en utilisant le logiciel NS-3 dans le but de faire des propositions d'algorithme d'optimisation de ces performances.

# CHAPITRE I :

Les caractéristiques et les différents  
composants de la technologie 4G LTE.



Depuis plusieurs années le développement des réseaux mobiles n'a pas cessé d'accroître, plusieurs générations ont vues le jour (1G, 2G, 3G, 4G et prochainement la 5G) et connues une évolution remarquable, en apportant un débit exceptionnel et qui ne cesse d'augmenter, une bande passante de plus en plus large et un des avantages d'une telle bande passante est le nombre d'utilisateur pouvant être supportés.

Tout comme la 3G représentait déjà, à l'époque, une augmentation du débit par rapport aux premiers appareils GSM en 2G, la 4G se caractérise par une augmentation très importante du débit de données, qui peut atteindre 150 Mb/s dans certaines conditions. En pratique, toutefois, la majorité des clients doivent s'attendre à bénéficier d'un débit de 20 Mb/s au maximum. Cette valeur reste certes inférieure au seuil du « très haut débit », fixé à 30 Mb/s, mais elle est environ dix fois supérieure aux débits constatés en 3G (2 Mb/s dans le meilleur des cas). Elle constitue la quatrième génération des technologies de téléphonie mobile et repose sur la nouvelle norme « LTE » ou Long Term Evolution, et succède directement à la technologie 3G et à la 3G+, qui se fondaient quant à elles sur les normes UMTS et HSDPA.

La 4G constitue aujourd'hui une véritable révolution puisqu'elle propose une multiplication des débits grâce à deux phénomènes. Le premier consiste à faire circuler les appels vocaux non plus sur le réseau téléphonique, mais directement sur internet (voix sur IP). Ensuite, le réseau 4G recourt au multiplexage (plusieurs types d'information passant par un même canal), ce qui permet d'augmenter la quantité d'information transmise. Elle se définit ainsi comme le très haut débit mobile. A noter que la norme 4G évolue déjà avec le standard 4G LTE Advanced, communément appelé 4G+ et qui permet d'augmenter encore les débits sur les réseaux mobiles LTE (jusqu'à 300 Mbit/s, 500 Mbit/s, voire plus...). Pour atteindre ce niveau de performance, la 4G emploie des bandes de hautes fréquences spécifiques, qui varient selon les opérateurs et les régions géographiques.

Dans ce chapitre nous allons présenter les caractéristiques et les différents composants de la technologie 4G LTE et leurs architectures.

## **1.1 Généralités de la technologie LTE**

L'idée et le projet pour développer la technologie LTE sont menés par l'organisme de standardisation 3GPP visant à rédiger les normes techniques de la future quatrième génération en téléphonie mobile.

Cette technologie a comme but de permettre le transfert de données à très haut débit, avec une portée plus importante, un nombre d'appels par cellule supérieur (zone dans laquelle un émetteur mobile peut entrer en relation avec des terminaux) et un temps de latence plus faible.

En théorie, elle permet d'atteindre des débits de l'ordre de 50 Mb/s en lien ascendant et de 100 Mb/s en lien descendant, de partager entre les utilisateurs mobiles à l'intérieure d'une même cellule. Pour les opérateurs (qui ont la partie la plus importante pour supporter cette technologie), LTE implique de modifier le cœur du réseau et les émetteurs radio. Il faut également développer des terminaux mobiles adaptés.

En termes de vocabulaire informatique, le futur réseau s'appelle EPS (Evolved Packet System). Il est combiné du nouveau réseau appelé LTE (Long Term Evolution) et du nouveau réseau central appelé SAE (System Architecture Evolution).

## **1.2 Caractéristique de la technologie LTE (4G)**

L'émergence du LTE n'est due surement pas à un coup du hasard mais bien au contraire, à plusieurs facteurs techniques et industriels qui ont poussé cette technologie à naître, on parle alors des motivations pour l'introduction du LTE. Ces dernières se résument en ces points :

### **1.2.1 Augmentation de la capacité**

Le terme capacité est dédié à une cellule d'un réseau mobile quelconque et traduit le trafic maximal (soit en nombre d'appels simultanés ou transmission de données par plusieurs utilisateurs en même temps) que la cellule peut écouler en situation de forte charge au cours d'une période donnée. En LTE. Il est attendu :

- Qu'au moins 200 utilisateurs simultanés par cellule soient acceptés à l'état actif pour une largeur de bande de 5 MHz.
- Qu'au moins 400 utilisateurs simultanés par cellule soient acceptés à l'état actif pour des largeurs de bande supérieures à 5 MHz.

### **1.2.2 Augmentation du débit**

L'évolution des débits suit celle de la capacité, chaque nouvelle technologie de réseaux mobiles augmentant les débits et suscitant une attente de débits supérieurs. Les objectifs de débit maximal définis pour le LTE sont les suivants :

- 100 Mbps en voie descendante pour une largeur de bande allouée de 20 MHz, soit une efficacité spectrale de 5 bps/Hz.
- 50 Mbps en voie montante pour une largeur de bande allouée de 20 MHz, soit une efficacité spectrale de 2.5 bps/Hz.

### **1.2.3 Diminution de la latence**

La latence est définie comme étant la capacité d'un système à réagir rapidement aux demandes et requêtes des utilisateurs. Une latence forte limite l'interactivité du système et s'avère pénalisante pour l'usage de certains services de données. On distingue deux types de latence :

- La latence du plan de contrôle : Elle représente le temps nécessaire pour établir une connexion et à accéder au service. L'objectif du LTE est d'améliorer cette dernière en visant un temps de transition inférieur à 100 ms entre un état de veille de l'UE « User Equipment » et un état actif autorisant l'établissement du plan usager.
- La latence du plan usager : Elle représente le délai de transmission d'un paquet entre la couche IP de l'UE d'un nœud du réseau d'accès ou inversement au sein du réseau et cela une fois la connexion établie bien sûr. Elle est nettement améliorée si nous la comparons à celle de l'UMTS (qui est supérieure à 70 ms) et est inférieure à 5 ms dans des conditions de faible charge du réseau et pour des paquets IP de petite taille, soit un écart d'au moins 65 ms, ce qui est sûrement très bénéfique pour la technologie LTE.

### **1.2.4 La flexibilité spectrale ou agilité en fréquence**

L'un des défis que le LTE se doit de relever est de pouvoir opérer sur des porteuses de différentes largeurs afin de s'adapter à des allocations spectrales variées. Les largeurs initialement requises sont : 1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz, 20 MHz dans le sens montant comme dans le sens descendant.

### **1.2.5 La mobilité**

Le LTE vise à rester fonctionnel de façon optimale pour des UE se déplaçant à des vitesses trop élevées (jusqu'à 350 km/h et même 500 km/h) et mêmes à des vitesses trop faibles (de 0 km/h à 15 km/h). En LTE, il est attendu que :

- Les services temps-réel comme le service voix, soient au moins en même niveau de qualité que ceux offerts par les systèmes UMTS.
- L'effet du Handover intra-système entre deux cellules LTE sur la qualité vocale doit être moindre qu'en GSM, ou équivalent.
- Des mécanismes optimisant les délais et minimisant la perte de paquets lors d'un Handover intra-système soient intégrés.
- Une coexistence avec les autres technologies 3GPP à savoir GSM/GPRS et UMTS, doit être maintenue lors d'un Handover inter-système (le temps d'interruption de service doit rester inférieur à 300 ms pour les services temps-réel et inférieur à 500 ms pour les autres services).

## **1.3 Architecture générale du réseau LTE**

Le réseau de quatrième génération, appelé EPS (Evolved Packet System), est constitué d'une partie cœur EPC (Evolved Packet Core) et d'une partie radio E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network).

### **1.3.1 Le réseau cœur EPC**

Le EPC se compose principalement des entités suivantes : L'entité de gestion de mobilité (MME), la passerelle de service (S-GW), la passerelle PDN (PGW), l'entité serveur de l'abonné résidentiel (HSS) et la fonction de politique de contrôle et de chargement des règles (PCRF), comme indiquée sur la Fig.1.1. On présente dans ce qui suit une description brève des entités de l'EPC.

#### **a) Mobility Management Entity (MME)**

Le MME est le nœud qui gère la signalisation entre l'UE et le réseau cœur. Il est responsable de la gestion de la connexion de signalisation qui est prise en charge par le protocole NAS et de la sécurité entre le réseau et l'UE. Il a en charge la gestion des phases d'établissement, la reconfiguration et le relâche de « bearer ». Il maintient un contexte

contenant notamment les paramètres de sécurité et les capacités radio et réseau de l'UE tant que celui-ci est enregistré au réseau. L'entité MME possède les interfaces suivantes :

- S1-MME avec l'entité eNodeB du réseau d'accès.
- S6a avec l'entité HSS : cette interface supporte la signalisation permettant l'accès aux données du mobile.
- S10 avec l'entité MME : cette interface supporte la signalisation échangée lors d'une mobilité nécessitant le changement d'entité MME.
- S11 avec l'entité SGW : cette interface supporte la signalisation permettant l'établissement du support (bearer) entre les entités eNodeB et SGW.

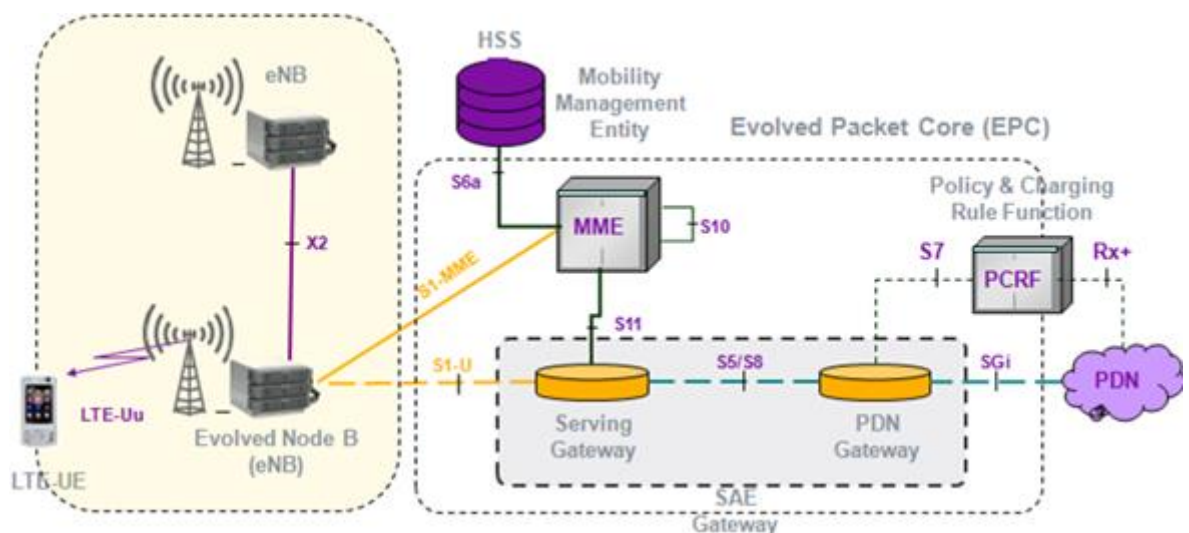


Figure 1.1 : Architecture générale d'un réseau LTE

## b) Serving Gateway (SGW)

La S-GW permet le transfert des paquets IP vers les utilisateurs du réseau. Elle sert de point d'ancrage d'une part pour le « bearer » de données lorsque l'UE est en mobilité entre plusieurs eNodeB et d'autre part pour l'interfonctionnement avec d'autres technologies d'accès comme l'UMTS ou le GPRS. La S-GW conserve également des contextes sur le « bearer » de l'UE lorsqu'il est en veille. Si elle reçoit des données destinées à un UE en veille, la S-GW contacte le MME pour notifier l'UE et rétablir ainsi le « bearer » associés aux contextes. Par ailleurs, la S-GW gère quelques fonctions annexes au sein du réseau visité

dans le contexte d'itinérance, telles que l'envoi d'informations pour la facturation et les interceptions légales. L'entité SGW possède les interfaces suivantes :

- S11 avec l'entité MME.
- S5 avec l'entité PGW.
- S1-U avec l'entité eNodeB.

#### **c) Packet Data Network Gateway (PGW)**

L'entité PGW est le routeur de passerelle, assurant la connexion du réseau EPS au réseau de données PDN. Lorsque l'entité PGW reçoit des données de l'entité eNodeB ou du réseau PDN, elle se réfère à l'identifiant de la classe de service QCI pour la mise en œuvre du mécanisme d'ordonnancement des données. L'entité PGW possède les interfaces suivantes :

- S5 avec l'entité PGW.
- Gx avec l'entité PCRF.
- SGI avec le réseau de données PDN.

#### **d) Home Subscriber Server (HSS)**

Le HSS est la base de données contenant les informations de souscriptions de l'utilisateur telles que le profil de QoS de l'abonné ou les restrictions d'accès en itinérance. Il contient également les informations concernant les réseaux de données (PDN) auxquels l'utilisateur peut se connecter. Le HSS supporte des informations dynamiques telles que l'identité du MME auquel l'utilisateur est actuellement attaché. Il peut aussi intégrer le centre d'authentification ou AuC (Authentication Center) qui permet l'authentification des abonnés et fournit les clés de chiffrement nécessaires.

#### **e) Policy and Charging Rules Function (PCRF)**

Le PCRF est une entité qui exécute principalement deux grandes tâches. La première est de gérer la qualité de service que requiert le réseau, et alloue en conséquence les porteurs appropriés. La deuxième tâche se rapporte principalement à la tarification. En effet, le PCRF gère les politiques de facturation qui doivent être prises en compte par le PDN-GW et applicables en fonction des actions de l'utilisateur.

### 1.3.2 Le Réseau d'accès E-UTRAN

Le réseau d'accès E-UTRAN comprend un seul type entité, la station radioélectrique eNodeB (evolved NodeB) à laquelle se connecte le mobile (UE).

L'entité eNodeB possède les interfaces suivantes :

- **LTE-Uu** avec le mobile UE. Cette interface est utilisée pour la connexion du mobile à l'entité eNodeB. Elle supporte le trafic du mobile et la signalisation échangée entre le mobile et l'entité eNodeB. Cette signalisation supporte la signalisation échangée entre le mobile et l'entité MME du cœur de réseau.
- **X2** avec les autres entités eNodeB. Cette interface est utilisée pour la mobilité intra E-UTRAN et pour l'échange d'information de charge de la cellule. Elle supporte le trafic du mobile et la signalisation échangée entre deux entités eNodeB.
- **S1-MME** avec l'entité MME du réseau coeur. Cette interface est utilisée pour l'établissement du support (bearer) radioélectrique, pour le paging et pour la gestion de la mobilité. Elle supporte la signalisation échangée entre l'entité MME et l'entité eNodeB. Cette signalisation porte la signalisation échangée entre le mobile et l'entité MME.
- **S1-U** avec l'entité SGW du réseau coeur. Cette interface supporte uniquement le trafic du mobile.

### 1.3.3 Le réseau cœur CN

Le réseau cœur de l'UMTS est composé de deux parties distinctes avec une autre commune, qui sont :

- Le domaine CS qui est utilisé pour la téléphonie.
- Le domaine PS qui permet la commutation de paquets.
- Les éléments communs aux domaines CS et PS

**a) Le domaine CS :** Il est composé de plusieurs modules à savoir :

- MSC est en charge d'établir la communication avec l'équipement usager et de commuter les données.
- GMSC est une passerelle entre le réseau UMTS et le réseau téléphonique commuté PSTN. Si un équipement usager contacte un autre équipement depuis un réseau

extérieur au réseau UMTS, la communication passe par le GMSC qui interroge le HLR pour récupérer les informations de l'utilisateur, ensuite, il route la communication vers le MSC dont dépend l'utilisateur destinataire.

- VLR qui est une base de données attachée à un ou plusieurs MSC et qui garde en mémoire l'identité temporaire de l'équipement usager et enregistre les usagers dans une zone géographique.

**b) Le domaine PS :** Il est composé de plusieurs modules :

- SGSN qui est en charge d'enregistrer les usagers d'une zone géographique dans une zone de routage.
- GGSN qui est une passerelle vers les réseaux à commutation de paquets extérieurs tels que l'Internet.

**c) Les éléments communs entre CS et PS sont :**

- HLR qui représente une base de données des informations de l'utilisateur : l'identité de l'équipement usager, le numéro d'appel de l'utilisateur, les informations relatives aux possibilités de l'abonnement souscrit par l'utilisateur.
- AuC qui est en charge de l'authentification de l'abonné, ainsi que du chiffrement de la communication. Si une de ces deux fonctions n'est pas respectée, la communication est rejetée. Il se base sur le HLR afin de récupérer les informations relatives à l'utilisateur et pour ainsi créer une clé d'identification.
- EIR qui est en charge de la gestion des vols des équipements usagers. Il est en possession d'une liste des mobiles « blacklistés » par un numéro unique propre à chaque équipement usager, le numéro IMEI.



# CHAPITRE II :

Modèles de propagation de la  
technologie 4G LTE

La modélisation du canal de propagation s'avère être la phase la plus délicate pour planifier et dimensionner un réseau radio mobile. En effet, on doit tenir compte de l'environnement de propagation vu l'effet des perturbations causées par la mobilité des obstacles, la température, l'humidité...

C'est dans ce cadre, que la prédiction de la variation du canal de propagation semble être l'élément essentiel dans le processus de planification des réseaux mobiles. Il permet d'estimer la valeur de l'atténuation de trajet. Le choix du modèle de propagation est un compromis entre la précision de la prévision et l'efficacité de calcul.

La modélisation des caractéristiques de propagation est essentielle pour deux raisons principales par rapport au système LTE : la performance de la voie de transmission au niveau du système de la technologie LTE peut être évaluée avec précision que lorsque les modèles de canal radio sont réalisés. En particulier, la caractéristique spatiale des modèles de canaux a un effet significatif sur la performance des systèmes multi-antennes.

Dans ce chapitre, nous allons étudier les phénomènes physiques affectant la propagation du signal radio, telles que la diffraction, la réflexion, la diffusion...qui entraînent un affaiblissement assez important. D'où la nécessité d'élaborer un modèle de propagation pour donner une estimation précise de cet affaiblissement qui détériore la qualité du signal reçu. Mais avant d'entamer les notions de modèles de propagation nous allons faire une description d'un canal radio mobile et des modèles mathématiques les plus utilisés dans le cadre de l'estimation de canal.

## 2.1 Le Canal Radio mobile

En communications, le canal de Transmission représente toutes les transformations subies par le signal entre l'émetteur et le récepteur, de par sa propagation dans le milieu de transmission, ainsi que dans les équipements d'émission et de réception. Le canal de transmission détermine la manière dont les données doivent être mises en forme à l'émetteur afin de se propager dans de bonnes conditions dans le milieu. La transmission de l'information sur la voie radio dans les systèmes mobiles s'effectue soit depuis une station de base vers un mobile (liaison descendante ou "downlink"), soit depuis un mobile vers la station de base (liaison montante ou "uplink").

### 2.1.1 Caractéristiques d'un canal radio-mobile

#### a) La propagation radio-mobile

La liaison entre la station de base et le mobile est dépendante du canal radio mobile. Dans une communication sur ce type de canal, le signal transmis est soumis à deux types de perturbations : le bruit additif et les perturbations de propagation à travers le canal.

#### b) Le bruit

Le bruit dans le canal radio mobile provient directement de l'agitation thermique des électrons dans la matière qui ne sont pas à une température absolue nulle ( $T = 0K$ ).

Cette agitation provoque un mouvement chaotique et donc des accélérations aléatoires des électrons dans toutes les directions. Ce bruit est appelé bruit thermique et possède une distribution normale. La densité spectrale de puissance de rayonnement moyenne (mono - latérale notée  $N_0$ ) de la distribution du bruit thermique émise par un corps porté à une certaine température a été modélisée par la loi de Planck. Aux fréquences radio, elle est approximée par l'Eq.2.1 :

$$\gamma_b(f) = K_b T \text{ (exprimée en Watt/Hz)} \quad (2.1)$$

où  $K_b$  est la constante de Boltzmann et vaut  $1.38 \times 10^{-23} \text{ Joules} : K^{-1}$  et  $T$  est la température du corps qui émet le rayonnement exprimée en Kelvins.

### c) Les perturbations de propagation

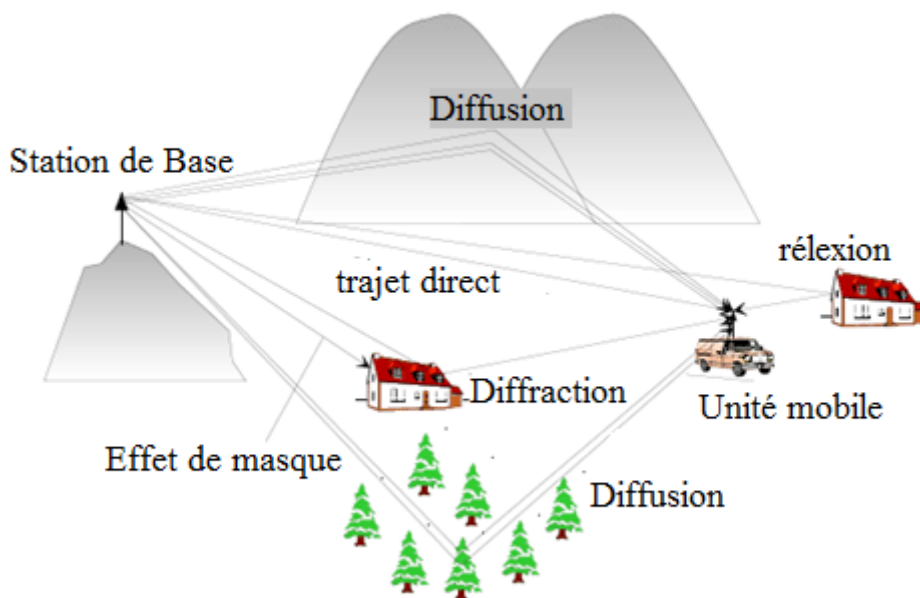
Lors d'une communication radio mobile, le signal émis est porté par une onde électromagnétique qui se propage dans l'air, cette propagation est loin d'être en espace libre. Les obstacles de différentes formes géométriques et de diverses caractéristiques perturbent la propagation (Fig. 2.1), ces perturbations se traduisent par des fluctuations de la puissance du signal reçu en fonction de la distance. On distingue deux types de fluctuations de l'enveloppe du signal reçu : les évanouissements sévères, qui sont causés par l'addition des différents trajets provenant des diffuseurs à proximité du récepteur, et les évanouissements lents, qui sont causées par les variations à grande échelle du milieu de propagation.

Les mécanismes de propagation qui se produisent, en communication mobile, sont :

- La réflexion : elle se produit lorsqu'une onde électromagnétique rencontre des surfaces lisses de très grandes dimensions par rapport à sa longueur d'onde ( $\lambda$ ), comme par exemple la surface de la terre, les bâtiments et les murs.
- La diffraction : elle se produit lorsqu'un obstacle épais et de grande dimension par rapport à sa longueur d'onde obstrue l'onde électromagnétique entre l'émetteur et le récepteur. Dans ce cas, des ondes secondaires sont générées et se propagent derrière l'obstacle ("shadowing").
- La diffusion "Scattering" : elle se produit lorsque l'onde rencontre un obstacle dont l'épaisseur est de l'ordre de sa longueur d'onde, comme par exemple les lampadaires et les feux de circulation. Dans ce cas, l'énergie est dispersée dans toutes les directions.

Le signal transmis doit faire face aux pertes de propagation dues à la distance, aux atténuations induites par les obstacles qu'il trouve sur son parcours et aux évanouissements suscités par l'existence de trajets multiples. De ce fait, le signal reçu est une combinaison de plusieurs trajets dont les amplitudes, les déphasages, les décalages Doppler et les retards diffèrent. Le canal radio mobile est donc un canal fluctuant à trajet multiples. D'une manière générale, le phénomène qui se traduit par une variation de la puissance du signal mesurée à la réception, en fonction du temps ou de la distance qui sépare l'émetteur du récepteur, est connu sous le nom d'évanouissement ("fading"). D'après cette définition, on peut classer les canaux radio-mobiles en deux catégories : "Évanouissement à long terme" et "évanouissement à court terme".

- **L'évanouissement à long terme** : se manifeste lorsque la distance qui sépare l'émetteur du récepteur est importante (de quelques dizaines à quelques milliers de mètres). Il est généralement causé par l'obstruction des ondes par les obstacles (immeubles, forêts, collines, etc.) ou à la forme du terrain.
- **L'évanouissement à court terme** : se réfère à l'évolution spectaculaire de l'amplitude et de la phase du signal sur une courte période de temps. Cette variation rapide est due aux trajets multiples générés par les divers réflecteurs et diffuseurs de la liaison. Le moindre mouvement du mobile engendrera de très fortes fluctuations d'amplitude de l'enveloppe du signal reçu.



*Figure 2.1 : Les différents mécanismes de propagation*

### 2.1.2 Paramètres de propagation

- **Effet des trajets multiples** : La propagation des ondes dans un canal se fait par voie directe, mais plus souvent par réflexion, réfraction et diffusion des ondes par les obstacles artificiels et naturels qui entourent le récepteur. Les trajets multiples sont le résultat des répliques du signal original qui arrivent au récepteur à des instants différents. Ainsi, le signal reçu sera composé d'une somme de plusieurs répliques. Ces derniers suivront des trajets différents, de ce fait chaque trajet sera affecté d'une atténuation, d'un retard et d'un déphasage différent.

- **Effet Doppler** : Dans un environnement radio mobile, le récepteur est souvent en mouvement par rapport à l'émetteur. Ce mouvement introduit un décalage de fréquence dans le contenu spectral du signal reçu. Ce décalage de fréquence, appelé effet Doppler, dépend de la vitesse du mobile, de la longueur d'onde (fréquence porteuse) et de l'angle d'incidence du trajet par rapport à la trajectoire de déplacement. Le décalage Doppler est donné par l'Eq. 2.2 :

$$f_d = \frac{v}{\lambda} \cos(\varphi) \quad (2.2)$$

où  $v$  est la vitesse de déplacement du récepteur,  $\lambda$  est la longueur d'onde et  $\varphi$  est l'angle d'incidence par rapport à la trajectoire de déplacement.

- **La bande de cohérence** : La bande de cohérence est une mesure statistique qui quantifie la sélectivité en fréquence du canal. Elle permet de déterminer la bande à l'intérieur de laquelle le canal est considéré non sélectif en fréquence et laisse passer toutes les composantes spectrales avec approximativement le même gain et une phase linéaire.
- **L'étalement des retards maximal** : Ce paramètre correspond à l'intervalle de temps écoulé entre l'arrivée au récepteur du premier et du dernier **trajet** issus d'une même impulsion à l'émission, déterminé par la fonction d'étalement des retards. De cette manière, l'étude du moment d'ordre deux de la variable aléatoire déterminera la dispersion moyenne des retards, Cette dispersion temporelle des retards se caractérise dans le domaine fréquentiel par une corrélation sur une bande de fréquence. La mesure de la bande de cohérence  $B_c$  permet de quantifier le degré de corrélation entre deux fréquences distinctes. Ainsi, si l'écart fréquentiel entre deux signaux émis est supérieur à la bande de cohérence, alors les signaux reçus sont considérés comme décorrélés. L'expression de la bande de cohérence  $B_c$  est donnée par l'Eq. 2.3 :

$$B_c = \frac{1}{\tau_m} \quad (2.3)$$

où  $\tau_m$  est l'étalement de la réponse impulsionnelle du canal.

- **Le temps de cohérence** : Le temps de cohérence est une mesure de la vitesse à laquelle le canal fluctue. Avec la connaissance de l'étalement Doppler maximal, il est possible d'approximer le temps de cohérence du canal par la relation sur l'Eq. 2.4, qui indique que le temps de cohérence est approximativement l'inverse de la fréquence Doppler maximale.

$$T_c = \frac{1}{F_m} \quad (2.4)$$

Par conséquent, l'étalement Doppler maximal  $F_m$  est considéré comme le taux d'évanouissement typique du canal. Plus tôt,  $T_c$  a été décrit comme la durée de temps en dessous duquel la réponse du canal à une sinusoïde est essentiellement invariable. Si  $T_c$  est défini plus précisément comme la durée de temps en dessous duquel la réponse du canal à une sinusoïde a une corrélation de plus de 0,5, la relation entre  $T_c$  et  $F_m$  est approximativement :

$$T_c = \frac{9}{16\pi F_m} \quad (2.5)$$

- **Sélectivité d'un canal** : Un canal est dit sélectif en temps lorsque la durée du symbole transmis n'est pas faible relativement au temps de cohérence. Il est dit sélectif en fréquence lorsque la largeur de bande du signal n'est pas faible par rapport à la bande de cohérence du canal. Dans ce cas, certaines fréquences du signal sont atténuées d'une façon différente que d'autres fréquences. La robustesse d'un signal de durée de symbole  $T_s$  et de bande  $B_s$  dépendra des rapports  $T_s/T_c$  et  $B_s/B_c$ . On distingue alors quatre cas :
- **$B_s \ll B_c \Leftrightarrow T_s \gg \sigma_\tau$**  : si la bande occupée par le signal est inférieure à la bande de cohérence du canal, ou la durée du symbole émis est largement supérieure à la dispersion des retards, alors, les fréquences du spectre sont corrélées. Ainsi, les fréquences du spectre du signal subissent les mêmes amplifications ou atténuations. Dès lors, le canal est considéré comme non sélectif en fréquence et à « évanouissements plats ».
- **$B_s > B_c \Leftrightarrow T_s < \sigma_\tau$**  : si la bande occupée par le signal est supérieure à la bande de cohérence du canal, ou la durée du symbole émis est inférieure à la dispersion des retards, alors, les fréquences du spectre sont décorrélées. Lors d'un évanouissement dans la bande de cohérence, une partie du signal seulement sera perturbée. Le canal est dit sélectif en

fréquence. En outre, la durée du symbole étant inférieure à la dispersion des retards, des interférences entre symboles apparaissent.

- $B_S > B_d \Leftrightarrow T_S < t_c$  : si la durée du symbole émis est inférieure au temps de cohérence du signal, ou la bande occupée par le signal est supérieure à la bande Doppler, alors, le canal est dit à « évanouissements lents ». Le canal est alors non sélectif en temps. La réponse impulsionnelle du canal reste constante sur plusieurs symboles consécutifs.
- $B_S \ll B_d \Leftrightarrow T_S \gg t_c$  : si la durée du symbole émis est largement supérieure au temps de cohérence du signal, ou la bande occupée par le signal est largement inférieure à la bande Doppler, alors, le canal est dit à « évanouissements plats ». Dans ces conditions, la réponse impulsionnelle du canal varie de façon significative pendant la durée d'un symbole. Le canal est alors sélectif en temps.
- La diversité : La diversité est une technique utilisée pour éliminer l'évanouissement, son principe est de transmettre plusieurs copies de la même information sur plusieurs canaux avec puissance comparable et évanouissement indépendant, donc à la réception il y aurait au moins un ou plusieurs signaux non atténués, et bien sûr sans négliger la probabilité d'avoir une transmission de faible qualité. Il existe deux principales catégories de diversité : explicite et implicite. La première consiste à émettre plusieurs répliques du même message, et la deuxième envoyant une copie, mais à compter sur des concepts tel que les multi parcours pour dupliquer le signal envoyé. Pour la diversité spatiale, il faut que la distance entre antennes soit plus grande que la distance cohérente. Pour la diversité fréquentielle, il faut une séparation fréquentielle supérieure à la cohérence de la bande passante (BP). A la réception, il y a plusieurs antennes, ce qui implique la nécessité d'avoir une combinaison des signaux reçus.

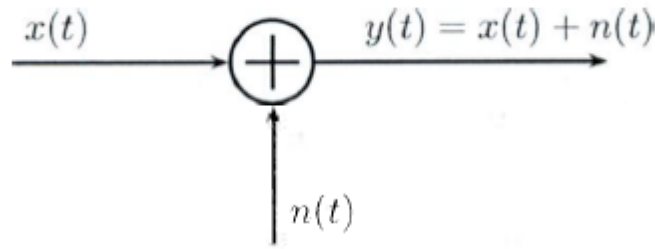
## 2.2 Modèles mathématiques d'un canal de transmission

Dans la conception des systèmes de communications, il est nécessaire de construire les modèles mathématiques qui caractérisent le milieu de propagation. Les modèles les plus utilisés dans les communications sans fil sont donnés dans la suite.



### 2.2.1 Canal invariant à bruit additif

Le modèle le plus simple à générer et à analyser est le canal à bruit additif. Physiquement ce bruit modélise à la fois le bruit d'origine interne et le bruit d'origine externe (antenne, etc.). Habituellement, ce bruit est statistiquement caractérisé comme un processus gaussien comme illustré dans la Fig. 2.2.



*Figure 2.2 : Canal invariant à bruit additif*

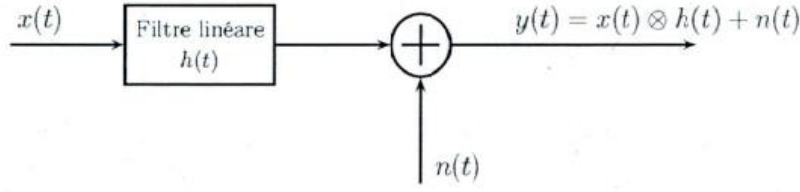
L'effet de l'atténuation de canal peut être facilement incorporé à ce modèle. Quand le signal subit une atténuation par le canal, le signal reçu est illustré par l'Eq.2.6 suivante :

$$y(t) = \alpha x(t) + n(t) \quad (2.6)$$

où  $\alpha$  dénote le facteur d'atténuation et  $n(t)$  le bruit additif caractérisé par un processus aléatoire gaussien de moyenne nulle, de variance  $\sigma_n^2$  et de densité spectrale de puissance bilatérale  $\Phi_{nn} = \frac{N_0}{2}$ .

### 2.2.2 Canal invariant à trajets multiples

Les canaux à trajets multiples (ou dispersifs) sont habituellement caractérisés par des filtres linéaires avec bruit additif. Ce type de canal contient plusieurs coefficients (Eq.2.7), qui sont également étendus dans le temps (Fig.2.3). La réponse impulsionnelle d'un canal à trajets multiples est donnée par :



**Figure 2.3 : Canal invariant à trajet multiple**

$$h(\tau) = \sum_{n=0}^{L-1} \alpha_n e^{j\theta_n} \delta(\tau - \tau_n) \quad (2.7)$$

où  $L$  est le nombre de trajets et  $\alpha_n, \theta_n$  et  $\tau_n$  sont respectivement le facteur d'atténuation, le déphasage et le retard de propagation du  $n$ ème trajet reçu. Un signal qui traverse un canal à trajets multiples subit une convolution avec le filtre linéaire du canal. Ce fait est décrit par la relation dans l'Eq.2.8 suivante :

$$\begin{aligned} y(t) &= x(t) \otimes h(t) + n(t) \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} h(t)x(t - \tau)d\tau + n(t) \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$= \sum_{n=0}^{L-1} \alpha_n e^{j\theta_n} x(t - \tau_n) + n(t)$$

où  $\otimes$  note la convolution. Il devient évident que le canal par trajets multiples introduit l'interférence entre symboles (ISI). Un phénomène qui peut rigoureusement dégrader la performance du système de communications.

### 2.2.3 Canal à trajets multiples variables dans le temps

Ces canaux peuvent être représentés mathématiquement comme des filtres linéaires variables dans le temps. De tels filtres linéaires sont caractérisés par une réponse impulsionnelle de canal variable dans le temps  $h(t; \tau)$ . est la réponse du canal au temps  $t$  due à une impulsion appliquée au temps  $t-T$ . Ainsi, représente la variable âge (temps écoulé). La Figure 2.4 montre un canal variable dans le temps avec un bruit additif. Le modèle de canal dans lequel la réponse impulsionnelle varie dans le temps à la forme de l'Eq.2.9 suivante :

$$h(t; \tau) = \sum_{n=0}^{L-1} \alpha_n(t) e^{j\theta_n(t)} \delta(t - \tau_n(t)) \quad (2.9)$$

où  $\alpha_n(t)$ ,  $\theta_n(t)$  et  $\tau_n(t)$  sont respectivement le facteur d'atténuation, le déphasage et le retard de propagation du  $n$ ème trajet reçu.

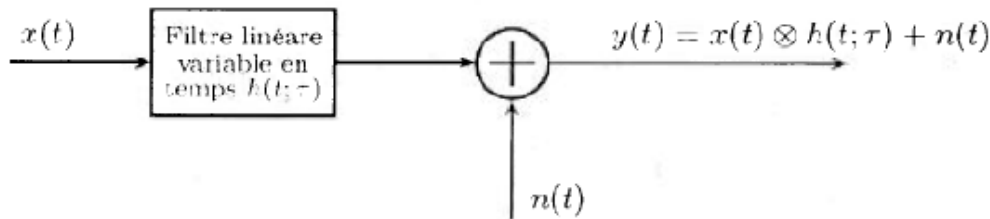


Figure 2.4 : Canal à trajet multiple variable dans le temps

Les trois modèles décrits ci-dessus couvrent la grande majorité des canaux physiques rencontrés dans la pratique.

### 2.3 Classification des modèles de propagation

Les caractéristiques des variations du signal varient lorsqu'il se déplace depuis l'antenne d'émission vers l'antenne de réception. Ces caractéristiques dépendent de la distance entre les deux antennes, le(s) chemin(s) suivi par le signal, et l'environnement (bâtiments et autres objets) autour de la trajectoire. Le profil du signal reçu peut être obtenu à partir de celui du signal transmis, si nous avons un modèle du milieu entre les deux. Ce modèle du milieu est appelé modèle de propagation.

Le modèle de propagation est une procédure essentielle au début de déploiement du réseau car il permet des prédictions précises sur la couverture. Il sert à estimer la portée d'un émetteur radio, déterminer la qualité du signal reçu en fonction de la distance et de l'environnement, calculer le niveau d'interférence lorsque plusieurs émetteurs coexistent ; permet aussi de déterminer et configurer les équipements nécessaires pour assurer une couverture radio, une capacité et une qualité de service suffisante. Dans la plupart des cas, celui-ci est difficile à déterminer avec précision, en raison de la complexité des environnements de propagation terrestre et des effets physiques. La figure 2.5 nous donne idée de l'aisance à obtenir des modèles appropriés en tenant compte toutefois de la précision des modèles ainsi développés.



**Figure 2.5 : Classification des modèles de propagation**

Devant la demande sans cesse croissante, les opérateurs ont été amenés à densifier leur réseau : ils augmentent le nombre de stations de base et réduisent la taille des cellules. La cellule est la zone couverte par une station de base. Elles schématisent des implantations physiques particulières de l'antenne de la station de base et de sa zone géographique déterminée : leurs caractéristiques sont liées à la position, la puissance, la hauteur de l'antenne de la station de base et à l'environnement géographique

### 2.3.1 Classification des environnements terrestres

- **Milieu rural (ou semi-rural) macro-cellule** : leur taille est supérieure à plusieurs dizaines de kms, il présente une faible densité d'obstacles d'origine humaine. Les modèles macro cellulaires sont des modèles semi-empiriques généralement fondés sur l'analyse du profil vertical émetteur-récepteur et des obstacles qui s'y trouvent (colline, forêt, etc.). Ils s'appuient généralement sur des données géographiques de type maillé de sol et de sursol. Une mise au point par ajustement de variables est opérée à l'aide de mesures expérimentales du fait de la pauvreté des informations géographiques fournies (estimation de l'occupation du sol sur une maille de 100 m) et de la simplicité des

algorithmes de calcul. On distingue deux types de modèles : les modèles ruraux et moyennement urbanisés et les modèles montagneux.

- **Le modèle rural** : prend uniquement en compte la coupe de terrain verticale entre l'émetteur et le récepteur pour déterminer les affaiblissements et notamment ceux dus à la diffraction par les obstacles (sol et sursol). Ils permettent d'estimer une couverture radioélectrique avec une précision de l'ordre de 6 à 7 dB d'écart-type sur la moyenne de l'erreur entre valeurs mesurées et valeurs prédites. Les performances peuvent être améliorées en milieu urbain par l'utilisation de données géographiques plus précises. Elles se dégradent lorsque le vallonnement devient important (plus particulièrement en région montagneuse) car les effets des trajets réfléchis deviennent prépondérants.
- **Le modèle montagneux** : prend en compte, outre le trajet direct, les trajets réfléchis sur le flanc des montagnes avoisinantes. L'identification des zones de réflexion rend les algorithmes de calcul de l'affaiblissement plus complexes et plus gourmands en temps de calcul.
- **Milieu urbain, semi-urbain ou micro/pico-cellule** : Leur taille va de quelques dizaines à quelques centaines de mètres à quelques kilomètres, en fonction de la densité d'habitation. Les pertes de propagation évoluent très rapidement en fonction de la distance, en raison du très grand nombre d'obstacles. Contrairement aux modèles statistiques Macrocellules qui prédisent une couverture radio moyenne et pas très précise essentiellement en milieu ouvert, les modèles microcellules essaient de prédire une zone de couverture moins étendue mais plus précise. La modélisation micro cellulaire repose sur une dualité liée aux faibles distances considérées (quelques centaines de mètres tout au plus) : un calcul en visibilité (LOS, Line Of Sight) et un calcul en non-visibilité (NLOS, Non Line of Sight).
- **Milieu indoor(femto-cellule)** : Les cellules femto sont de petites cellules d'une dizaine de mètres de rayon, principalement destinées à couvrir une habitation ou un étage de bureaux. Elles sont associées à des puissances faibles, de l'ordre d'une centaine de mW (20 dBm), et sont généralement déployées à l'intérieur des bâtiments, où la propagation se fait par réflexion le long des couloirs (similaire à une propagation guidée), de

diffraction contre les ouvertures de portes, de passage à travers les cloisons ou les dalles (atténuation importante).

### 2.3.2 Types des modèles de propagation

Un modèle de propagation permet de déterminer la perte de propagation  $L$ , qui relie la puissance reçue  $P_R$  et la puissance émise  $P_E$ , à partir de la fréquence et de la distance, des hauteurs  $h_E$  et  $h_R$  des émetteurs et des récepteurs et des caractéristiques de l'environnement de propagation (absorption des matériaux, prise en compte d'obstacles).

$$P_R = P_E - L(f, d, h_r, \text{environnement}) \quad (2.10)$$

#### a) Les modèles empiriques

L'élaboration de ces modèles repose sur la collecte de données concernant des mesures. Par une analyse statistique de ces données on tire les équations donnant une valeur moyenne d'affaiblissement à une distance donnée, parmi les modèles empiriques on distingue :

- Le modèle Okumura-Hata : Le choix du modèle de propagation est un compromis entre la précision de la prévision et l'efficacité de calcul. C'est le modèle le plus utilisé. Il tient compte de la fréquence, de la radiosité, de la distance entre l'émetteur et le récepteur et de la hauteur de la station de base et du mobile. Il prend en considération également la nature de l'environnement en qualifiant son degré d'urbanisation (urbain, suburbain ou rural).
- Le modèle de COST 231-Hata : Le modèle COST 231-Hata a les mêmes conditions que le modèle d'Okumara-Hata sauf qu'il est développé pour étendre l'utilisation de ce modèle pour les bandes de 1500 à 2000 MHz. Dans le déploiement LTE, pour une meilleure performance, de hautes antennes doivent être utilisées, tandis que le modèle COST-231 Hata doit être utilisé comme modèle de propagation radio puisqu'il présente de meilleurs résultats. Le modèle ne donne pas de bons résultats pour une hauteur de l'antenne moins que 50m.

### **b) Les modèles déterministes**

Les modèles déterministes donnent des résultats beaucoup plus précis mais requièrent une quantité importante d'informations sur la zone où ils vont être appliqués. De plus ils demandent beaucoup de temps de calcul. Ils sont généralement réservés à des lieux particuliers où les autres modèles ne peuvent être utilisés.

### **c) Les modèles semi-empiriques**

L'idée principale de ce modèle est de combiner les avantages de chacun des deux modèles précédents. Ils allient à la fois des aspects théoriques et des mesures. Ils prennent en compte la topologie de la zone à couvrir. Ces types de modèles se révèlent généralement plus légers, en terme de calcul, que les modèles théoriques et plus performants en terme d'estimation de l'atténuation de puissance induit par un site de propagation. Leur usage pour la validation d'une solution sans fil pour un site de propagation tel qu'en indoor, reste relativement peu fréquent en raison de son degré de complexité.

## **2.4 Modèle de propagation standard**

Le modèle de propagation standard est un modèle (dédit de la formule Hata) particulièrement adapté pour la prédiction dans la bande allant de (150MHz à 3500MHz) sur de longues distances (1Km à 20 km), il utilise le profil du terrain, les mécanismes de diffraction (calculé de plusieurs façons) et de prendre en compte les classes d'encombrement et les hauteurs d'antenne efficaces afin de calculer la perte de chemin. Le modèle peut être utilisé pour toute technologie.

### **2.4.1 Modèles ITU à trajet multiples**

Les modèles de l'UIT (proposés par L'union internationale des télécommunication) ont été utilisés dans le développement de la troisième génération "IMT-2000" des systèmes d'accès radio, utiliser pour les milieux indoor, outdoor et pour l'environnement piétons et des véhicules. Les paramètres clés pour décrire chaque modèle de propagation comprend le temps de retard et sa variabilité statistique, les pertes de trajet et les évanouissements.

L'évanouissement peut suivre une distribution de Rayleigh ou de Rice selon la position de UE. L'environnement des véhicules est classé par les grandes cellules macro avec une plus grande capacité, un spectre limité et une grande puissance d'émission. Le signal reçu est composé de répliques de trajets multiples, sans composante LOS.

### **2.4.2 Le modèle ITU étendu**

Les modèles UIT étendus pour les réseaux LTE ont reçu le nom de Extended Pedestrian A et B, et Extended Vehicular A (EVA) et Extended typical urban (ETU). Ces modèles de canal sont classés sur la base de bas, moyen et haut retard de propagation où un faible étalement des retards est utilisé pour modéliser des environnements intérieurs avec des cellules de petites tailles tandis que moyen et haut étalement des retards sont utilisés pour modéliser des environnements urbains avec grandes cellules. Les modèles avec un étalement des retards haut sont selon le modèle urbain typique utilisés en GSM.

Dans ce chapitre nous avons revu les éléments essentiels qui fondent les modèles de propagation pour des communications dans un environnement sans fil en général. Après avoir décrit les paramètres de propagation nous avons donné les modèles mathématiques qui décrivent le comportement de ces canaux de transmission selon l'environnement de calcul. Finalement, nous avons décrit les modèles standardisés et qui sont utilisés dans les situations réelles de communications radio mobiles.



# CHAPITRE III :

Le dimensionnement de la technologie  
4G LTE

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

Le principal objectif d'un opérateur est de regrouper le plus grand nombre d'abonnés pour pouvoir augmenter son chiffre d'affaire, pour cela chaque opérateur mobile devra se focaliser sur les demandes de ces clients ainsi pour augmenter son taux de popularité, pour ça il doit se préoccuper sur l'amélioration de son réseau (couverture, ...) et des paramètres de la Qualité de Service (débit, latence, ...). Lorsqu'une communication est établie, celle-ci doit pouvoir se poursuivre avec un niveau de qualité satisfaisant, même si l'utilisateur est en situation de mobilité. Pour satisfaire ces exigences, l'opérateur du réseau doit déployer un certain nombre de relais radio (stations de base – SB) qui vont assurer l'interface entre les terminaux des abonnés et les infrastructures du réseau de communication.

La portée d'un relais radio est liée aux puissances d'émission du relais et des terminaux, aux contraintes de protection contre les interférences entre relais, terminaux et services, ainsi qu'aux contraintes apportées par le canal radio lui-même (trajets multiples, évanouissements et affaiblissement de propagation). Il faut en conséquence déployer un nombre plus ou moins important de relais radio (selon la géographie du terrain) afin d'assurer une couverture de service continue ou quasi continue pour l'utilisateur.

En effet, tout cela sera traité dans ce chapitre durant lequel on va introduire les concepts de base et les calculs mathématiques nécessaires au dimensionnement du réseau 4G LTE sur le plan couverture tout en précisant les différents modèles de propagation à utiliser pour la planification.

### **3.1 L'objectif de dimensionnement**

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 que l'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 supporter ou desservir le trafic associé 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 est en perpétuelle évolution, intégrant de nouvelles stations de bases, ou simplement de nouveaux TRX associés à chaque station de base.

Le dimensionnement se fait sur deux plans : le plan capacité et le plan couverture. En fait, l'analyse de la couverture reste fondamentalement l'étape la plus critique dans la conception du réseau LTE.

### **3.2 Dimensionnement de couverture**

Le dimensionnement de la couverture d'un réseau consiste à déterminer le nombre des sites nécessaire pour couvrir une zone donnée. On va se baser sur le bilan de liaisons (RLB : Radio Link Budget), qui permet d'estimer le taux perte du trajet (Path Loss). Pour cela, il est nécessaire de choisir un modèle de propagation approprié.

Le résultat final obtenu est la taille de la cellule à couvrir, ce qui donne une estimation sur le nombre total de sites nécessaire pour couvrir le domaine.

#### **3.2.1 Bilan de liaison :**

Le bilan de liaison permet de calculer les pertes de propagation maximale admissible notée MAPL (Maximum Allowed Path Loss) 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 (Rx).

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.

Pour le LTE, l'Eq.3.1 du RLB de base peut être écrite comme suit (en dB) :

$$PathLoss = T_x Power + T_x Gains - T_x Losses - RequiredSINR + R_x Gains - R_x Losses - R_x Noise \quad (3.1)$$

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 :

$$MAPL = Pire - IM + RXg - K + SHG - RX \quad (3.2)$$

Avec :

- MAPL (Maximum Allowed Path Loss) : L'affaiblissement maximal de parcours, exprimé en dB. C'est le paramètre qu'on veut déterminer à travers l'établissement d'un bilan de liaison.
- 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

### 3.2.2 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.
- **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.

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 l'Eq.3.3 :

$$G = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \quad (3.3)$$

Avec :

- A : Aire équivalente de l'antenne
- $\lambda$  : Longueur de l'onde rayonnée L'antenne isotrope de référence à un gain  $G=1$  et donc une aire équivalente  $A = \lambda^2/4\pi$  [B].

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 de l'Eq.3.4 suivante :

$$PIRE = P + G + L_r \quad (3.4)$$

Avec :

- **P** : la puissance fournit à l'entrée de l'antenne
- **G** : le gain de l'antenne étudiée
- **L<sub>r</sub>** : une perte supplémentaire dans la direction considérée

Tableau 3.1: Paramètres pour le calcul de PIRE

Paramètres	UE	eNodeB
$P_{Tx}$	Puissances d'émission de l'UE (23dBm)	Puissances d'émission de l'eNodeB au niveau du connecteur de l'antenne (43 à 49 dBm).
$G_{Tx}$	<b>G<sub>a</sub></b> : Gain de l'antenne de l'UE (dépend du constructeur). <b>G<sub>Tx,d</sub></b> : Gain de diversité (dépend du nombre d'antenne à l'UE).	<b>G<sub>a</sub></b> : Gain de l'antenne de l'eNodeB (dépend du constructeur). <b>G<sub>Tx,d</sub></b> : Gain de diversité (dépend du nombre d'antenne à l'eNodeB).
$L_{Tx}$	<b>L<sub>body</sub></b> : Pertes du corps humain ; dépend de l'équipement de l'utilisateur (clé USB, tablette, Téléphone). <b>L<sub>other</sub></b> : autres pertes liés à l'UE.	<b>L<sub>feeder</sub></b> : Pertes des câbles d'alimentation entre l'eNodeB et le connecteur d'antenne, elle dépend du câble (1 à 6 dBm). <b>L<sub>other</sub></b> : autres pertes liés à l'eNodeB (connecteurs par exemple).

- **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 de l'Eq.3.5 suivante :

$$S = 10 \log_{10} (K.T.B_{Rx}) + SINR_{requis} + NF + IM + G_{Rx,d} \quad (3.5)$$

Avec :

- K : Constante de Boltzmann ( $1,388062 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$  )
- T : Température ambiante en (k).
- $B_{Rx}$ : Largeur de bande de réception, elle dépend du nombre de blocs ressources requis et la largeur d'un bloc de ressources.
- $SINR_{requis}$ : 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  $B_{Rx}$  , débit d'information requis etc.
- NF : RF 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 d'échantillonnage et de 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.

- **Marge de shadowing** : 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.

### 3.2.3 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 3.2 : Bilan de liaison Montant

Paramètres	Unité	Formule	Valeur
<b>Emetteur –UE</b>			
Puissance d'émission	dBm	a	18-23 dBm
Gain d'antenne émetteur	dB <sub>i</sub>	b	-5 → 10 dB <sub>i</sub>
Perte corps humain	dB	c	0 → 5 dB
PIRE (Puissance isotrope rayonnée équivalente)	dBm	$d = a + b - c$	
<b>Récepteur eNodeB</b>			
eNodeB noise figure	dB	e	2 dB
Bruit thermique	dB	f	-118.4 dBm
Bruit récepteur	dBm	$g = e + f$	
SINR	dB	h	-7 dB
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	dB <sub>i</sub>	l	15 → 21 dB <sub>i</sub>
Marge de fading rapide	dB	m	0 dB
Gain du soft handover	dB	n	0 dB
<b>Path Loss Maximal</b>	dB	$o = d - j + l - k + n - i$	

- Formules de calcul pour la liaison Descendante :

***Tableau 3.3 : Bilan de liaison Descendant***

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

### 3.2.4 Modèles de propagation RF

Les méthodes de prédiction de couverture aujourd'hui utilisées mixent avantageusement les approches empiriques et déterministes.

Les méthodes empiriques utilisent des résultats expérimentaux pour estimer la couverture radio. Elles nécessitent de grandes campagnes de mesure, et ne tiennent que très peu compte de la réalité géographique de terrain. Au contraire, les méthodes déterministes intègrent les effets de relief (au niveau macro), sans tenir compte des propriétés locales.

Les méthodes déterministes procèdent soit par profil (comme pour les méthodes empiriques), et dans ce cas négligent l'effet des chemins latéraux et les effets liés à l'environnement 'micro' (immeubles, forêts,) ; soit par des approches semblables au lancer de rayon mais avec dans ce cas un coût de calcul assez prohibitif.

Notons que ces prédictions nécessitent plusieurs types d'information : relief et type de terrain...

Les opérateurs doivent donc acquérir ces bases de données. Les données de terrain proviennent en général des images satellites qui permettent aujourd'hui d'estimer l'élévation locale de terrain avec une résolution de l'ordre de 3m. Ces données coûtent relativement chères.

Les méthodes utilisées intègrent en général les 2 approches. Les méthodes empiriques intègrent en général la prise en compte des effets de masque et de diffraction sur le profil entre émetteur et récepteur, puis pondèrent ces prédictions par des coefficients déterminés par les formules empiriques des différents modèles de propagation (Okumura-Hata ou Erceig Greenstein ou Cost231-Hata ou Walfisch-Ikegami).

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 suivant :

- 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.)

**a) Propagation en espace libre (Free Space) :**

On parle de propagation en espace libre lorsque le signal traverse un milieu vide sans obstacle. Bien que ce modèle soit idéal, il peut être considéré comme point de départ pour tout autre modèle. L'affaiblissement de parcours dans un espace libre est donné par l'Eq.3.6:

$$L_{FS} = 10 \log [(4\pi dF/c)]^2 = 20 \text{ Log } [(4\pi dF/c)] \quad (3.6)$$

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

**b) Le modèle Okumura-Hata :**

C'est le modèle le plus utilisé au niveau des outils de planification cellulaire, il est basé sur des mesures effectuées dans les environnements de Tokyo par Okumura. Ce modèle est appliqué pour des cellules de taille relativement grandes (de rayon supérieur à 1 Km). Les conditions d'applications du modèle sont les suivantes :

- F : désigne la fréquence en MHz  $\in [150, 1000]$
- hb: désigne la hauteur de la station de base en mètre  $\in [30, 200]$
- hm : désigne la hauteur du terminal mobile en mètre  $\in [1, 10]$

L'affaiblissement selon ce modèle en tenant compte des degrés d'urbanisation est précisé dans ce tableau :

Tableau 3.4: Modèle OKUMURA-HATA

<b>Urbain</b>	$L_{ur}(dB) = A + B \log_{10}(R) - E$ <p>Avec : <math>A(db) = 69.55 + 26.16 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_b)</math></p> $B = 44.9 - 6.55 \log_{10}(h_b)$ <p>Pour les villes de taille moyenne ou petite :</p> $E(db) = (1.1 \log_{10}(f) - 0.7) h_m - (1.56 \log_{10}(f) - 0.8)$
<b>Urbain dense</b>	$L_{ur}(dB) = A + B \log_{10}(R) - E$ <p>Avec : <math>A(db) = 69.55 + 26.16 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_b)</math></p> $B = 44.9 - 6.55 \log_{10}(h_b)$ <p>Pour les villes de taille moyenne ou petite :</p> $E(db) = 8.29 \log_{10}(1.54 h_m)^2 - 1.1 : \text{Pour les grandes villes si } f \leq 300 \text{ MHz}$ $E(db) = 3.2 \log_{10}(11.75 h_m)^2 - 4.97 : \text{Pour les grandes villes si } f > 300 \text{ MHz}$
<b>Sous urbain</b>	$L_{su}(dB) = A + B \log_{10}(R) - 2 \log_{10}(f/28))^2 - 5.4$
<b>Rural</b>	$L_{ru} = A + B \log_{10}(R) - 4.78 \log_{10}(f)^2 + 18.33 \log_{10}(f) - 35.94 : \text{zone rurale ouverte}$ $L_{ru} = A + B \log_{10}(R) - 4.78 \log_{10}(f)^2 + 18.33 \log_{10}(f) - 40.94 : \text{zone rurale ouverte}$

**c) Le modèle cost231-Hata :**

Ce modèle vient modifier le modèle Okumura-Hata qui opère uniquement pour une plage de fréquences inférieures à 1000MHz pour pouvoir opérer sur la bande 1500-2000MHz dans les zones urbaines, puis l'ajuster, en ajoutant le terme correctif pour tous les autres environnements (sous urbain et rural). L'affaiblissement  $lu(db)$  est précisé dans le tableau suivant :

Tableau 3.5: Modèle COST231-HATA

<b>urbain</b>	$L_u(dB) = 46.3 + 33.9 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_b) - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_b)) \log_{10}(d) + 3$ <i>Avec:</i> $a(h_m)dB = 3.2 \log_{10}(11.75 h_m)^2 - 4.97$
<b>Sous Urbain et Rural</b>	$L_u(dB) = 46.3 + 33.9 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_b) - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_b)) \log_{10}(d)$ <i>Avec :</i> $a(h_m)dB = (1.1 \log_{10}(f) - 0.7) h_m - (1.56 \log_{10}(f) - 0.8)$

**d) Le modèle Walfish-Ikegami :**

On utilise ce modèle pour les environnements urbains et sous-urbains. Généralement, il est conçu pour des fréquences inférieures à 2 GHz. Mais, il peut être étendu pour atteindre des fréquences jusqu'à 6 GHz. Selon ce modèle, l'expression du path loss peut s'écrire comme étant somme de trois termes d'affaiblissement élémentaires comme indiqué dans l'Eq.3.7:

$$L = L_0 + L_{rst} + L_{msd} \quad (3.7)$$

Tableau 3.6: Modèle Walfish-Ikegami

<b><math>L_0</math> = Perte en espace libre</b>	$L_0 = 32.4 + 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f)$ <i>d : distance du récepteur en Km</i> <i>f : fréquence utilisé en MHz</i>
<b><math>L_{rst}</math> = Perte par diffraction du toit vers la rue</b>	$L_{rst} = -16,9 - 19 \log_{10}(w) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}(h - h_m) + L_{ori}$ <i>h = la hauteur des bâtiments</i> <i>h<sub>m</sub> = la hauteur du mobile</i> <i>w : la largeur de la rue en mètre</i> <i>L<sub>ori</sub> : facteur de correction prenant en compte de l'orientation de la rue</i> $L_{ori} = -10 + 0,354 \varnothing$ pour $0 \leq \varnothing < 35$ degré $L_{ori} = 2,5 + 0,075(\varnothing - 35)$ pour $35 \leq \varnothing < 55$ degré $L_{ori} = 4 - 0,11(\varnothing - 55)$ pour $55 \leq \varnothing < 90$ degré <i>Avec : <math>\varnothing</math> : angle d'incidence du trajet radio par rapport à l'orientation de la rue</i>
<b><math>L_{msd}</math> = Perte par diffraction multi-masque</b>	$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log_{10}(d) + k_f \log_{10}(f) - 9 \log_{10}(b)$ <i>Avec b: séparation entre les bâtiments en mètre</i> $K_a = 54$ , $K_d = 18$ , $K_f = -4 + 0,7 (f / (925 - 1))$ , pour les cités moyennes et centres sous urbains, avec densité d'arbre modéré $K_f = -4b + 0,7(f / (925 - 1))$ , pour les centres métropolitains $L_{bsh} = -18 * \log(1 + (h_b - h))$ si $h_b > h$ <i>Sinon <math>L_{bsh} = 0</math> , avec <math>h_b</math> = la hauteur de la station de base</i>

**e) Le modèle ErceigGreenstein:**

Le modèle ErceigGreenstein est un modèle empirique développé pour les applications sans fil large bande. Le groupe qui l'a développé, a remarqué que le modèle d'Okumura-Hata n'est pas convenable pour les zones boisées et montagneuses, c'est pour cette raison qu'ils ont créé un modèle valable pour trois différents types de terrain A, B et C (Tableau 3.5). L'affaiblissement  $L$  exprimé en dB est donnée par l'Eq.3.8 :

$$L = 20 \log_{10} (4\pi d_0 / \lambda) + 10\gamma \log_{10}(d/d_0) + s + X_f + X_h \quad (3.8)$$

$d_0$  : 100 mètres

$d$  : distance en mètres

$$\gamma = a - (b \cdot h_b) + c/h_b$$

Avec  $h_b$  = la hauteur de la station de base entre 10 et 80m

$a$ ,  $b$ , et  $c$  sont des constantes dépendant de la catégorie de terrain, dont les valeurs sont données dans le tableau :

**Tableau 3.7: Paramétrage des terrains pour le Modèle Erceig Greenstein**

Type du terrain	Description	A	b	c
<b>A</b>	Montagneux avec une lourde densité d'arbres	4,6	4	3,6
<b>B</b>	Vallonné avec une densité modérée d'arbres	0,0075	0,0065	0,005
<b>C</b>	Plat avec faible densité d'arbres	12,6	17,1	20

L'effet de masque est donné par le paramètre  $s$ , qui suit une distribution logarithmique. La valeur typique de l'écart type de «  $s$  » est entre 8,2 et 10,6 dépendant du type de terrain et de la densité des arbres [(Eq.3.9, Eq.3.10, Eq.3.11)].

$$X_f = 6 \log_{10} (f/2000) \quad (3.9)$$

$$X_h = -10.8 \log_{10} (h_m/2), \text{ pour les terrains de type A et B} \quad (3.10)$$

$$X_h = -20 \log_{10} (h_m/2), \text{ pour les terrains de type C} \quad (3.11)$$

Avec :

$h_m$  : est la hauteur de l'antenne entre 2 et 10m.

**Tableau 3.8: Comparaison entre les Modèles de Propagation**

Modèle	Fréquence porteuse (Mhz)	Hauteur du mobile (m)	Hauteur de la station de base (m)	Distance (km)
Okumura-Hata	150 – 1500	1 – 10	30 – 200	1 – 20
Cost231-Hata	1500 – 2000	1 – 10	30 – 200	1 – 20
ErceigGreenstein	500 – 2000	2 – 10	10 – 80	-----
Walfisch-Ikegami	800 – 2000	1 – 3	10 – 80	0,1 – 8

### 3.2.5 Calcul du nombre de sites en se basant sur le bilan de liaison

Après avoir calculé l'affaiblissement de parcours maximum (MAPL) par l'établissement d'un bilan de liaison équilibré, nous pouvons déterminer le rayon de la cellule en utilisant le modèle de propagation adéquat. En effet, lorsque l'affaiblissement de parcours est égal à sa valeur maximale, la distance parcourue est égale au rayon de la cellule.

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

$$MAPL = 69.55 + 26.16 \log (F) - 13.82 \log (h_b) - a(h_m) + [44.9 - 6.55 \log (h_b)] \log (R_{Cell}) \quad (3.12)$$

$$MAPL - (69.55 + 26.16 \log (F) - 13.82 \log (h_b) - a(h_m)) = (44.9 - 6.55 \log (h_b)) \log (R_{Cell}) \quad (3.13)$$

$$\log (R_{Cell}) = [MAPL - (69.55 + 26.16 \log (F) - 13.82 \log (h_b) - a(h_m))] / 44.9 - 6.55 \log (h_b) \quad (3.14)$$



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

$$R_{cell} = 10^{([MAPL - (46,63 + 33,9 \log(F) - 13,82 \log(hb) - a(hm))]/(44,9 - 66,5 \log(hb)))} [\text{Km}] \quad (3.15)$$

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

Tableau 3.9: Empreinte du site en fonction du nombre de secteurs

Nombre de secteur par site	Empreinte
1	$S_{cell} = 2,6 \times R_{cell}^2$
2	$S_{cell} = 1,3 \times 2,6 \times R_{cell}^2$
3	$S_{cell} = 1,95 \times 2,6 \times R_{cell}^2$

Avec l'empreinte du site  $S_{cell}$ , et sachant la superficie totale de la zone de déploiement (noté  $S_{déploiement}$ ), on peut enfin aboutir au nombre de sites demandés pour la couverture  $N_{Site}$ , qui est la plus grande valeur entre le nombre de sites demandés pour la liaison montante  $N_{SiteUL}$  et le nombre de sites demandés pour la liaison descendante  $N_{SiteDL}$  pour s'assurer que les deux liaisons soient équilibrées [(Eq.3.16, Eq.3.17, Eq.3.18)] .

$$N_{SiteUL} = E \left( \frac{S_{déploiement}}{S_{cellUL}} \right) + 1 \quad (3.16)$$

$$N_{SiteDL} = E \left( \frac{S_{déploiement}}{S_{cellDL}} \right) + 1 \quad (3.17)$$

$$N_{Site} = \text{Max} (N_{SiteUL}, N_{SiteDL}) \quad (3.18)$$

### 3.2.6 Dimensionnement des interfaces S1 et X2

Après avoir calculé nombre de sites (eNodeB) nécessaires à la couverture de la zone à étudier, on va procéder au calcul des interfaces X2.

### a) Interface X2

Le calcul du nombre d'interface X2 est une opération beaucoup moins complexe. Vu que l'architecture du réseau d'accès en LTE est plate, les eNodeB sont deux à deux connectés par l'interface X2 (physique ou logique), le nombre d'interface X2 est donc donnée par l'Eq.3.19 :

$$N_{X2} = N_{Site} * 2 \quad (3.19)$$

### b) Interface S1

Chaque eNodeB est connectée au réseau cœur par l'intermédiaire de l'interface S1 qui consiste en S1-Usager entre l'eNodeB et le SGW et S1-Contrôle entre l'eNodeB et le MME. On peut donc déduire que le nombre d'interface S1-U est égale au nombre d'interface S1-C :

$$N_{Site} = N_{S1U} = N_{S1C} \quad (3.20)$$

Pour conclure, L'étape de dimensionnement d'un réseau est l'étape cruciale pour la mise en place du réseau dans le but de l'optimisation du déploiement. En effet, dans ce chapitre, nous avons défini le principe de planification radio, particulièrement la phase de dimensionnement de l'eNodeB en se basant sur les différents modèles de propagation ainsi que le dimensionnement des interfaces X2 et S1. Nous avons défini tout le calcul nécessaire qui nous sera utile pour la conception et au développement de notre application.

# CHAPITRE IV :

Simulation d'Algorithme d'optimisation  
de la technologie LTE

Afin d'améliorer les performances d'un réseau, de nombreuses méthodes sont possibles. Basées à la fois sur les différents paramètres du réseau, tels que la bande passante, la puissance et la cellule, ainsi que différents algorithmes et principe, elles ont pour caractéristique principale soit d'augmenter le débit du réseau, soit de minimiser les interférences entre les cellules.

De nos jours, les réseaux cellulaires connaissent une expansion importante grâce à plusieurs moyens qui ont pu se développer au cours du temps, donc il est coûteux de déployer un banc d'essai complet contenant plusieurs ordinateurs, des routeurs et des liaisons de données pour valider et vérifier un protocole de réseau ou un certain algorithme spécifique. C'est pour cela que les simulateurs de réseaux sont utilisés.

Les simulateurs du réseau offrent beaucoup d'économie, de temps et d'argent pour l'accomplissement des tâches de simulation et sont également utilisés pour que les concepteurs des réseaux puissent tester les nouveaux protocoles ou modifier les protocoles déjà existants d'une manière contrôlée et productrice.

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 la QOS implémenter dans les différents composants. Nous présentons dans ce qui suit le déroulement des étapes d'optimisation et simulation que nous avons menée dans ce travail qui consiste à simuler quelques critères de QOS. Notre intérêt est d'évaluer les paramètres qui influencent sur les performances globales du réseau LTE (4G).

## **4.1 Choix du simulateur**

L'étude des performances des systèmes de communications au niveau des réseaux représente une tâche complexe où des outils de simulation spécialisés doivent être utilisés.

Dans notre étude de cas, sachant que nous nous intéressons aux systèmes cellulaires actuels et futurs, une prise en charge du modèle LTE est d'une importance primordiale. Nous traiterons par la suite, le choix du simulateur réseau retenu pour produire les résultats et nous exposerons les performances au niveau de ce réseau, selon différents scénarios.

En général, un simulateur de réseau est composé d'un large éventail de technologies et de protocoles réseaux et aide les utilisateurs à construire des réseaux complexes à partir de blocs de construction de base comme des grappes de nœuds et de liens.

Il existe plusieurs simulateurs réseaux, nous allons présenter par la suite quelques un que nous avons travaillé et essayé de travailler avec, tel que :

### **4.1.1 LTE-SIM**

La plupart des fournisseurs d'équipements de communication mobiles ont mis en œuvre leurs propres simulateurs. Par ailleurs, d'autres simulateurs, développés dans les coopérations universitaires-industriel, peuvent être achetés au moyen d'une licence commerciale, et leurs codes sources ne sont pas accessibles au public. Un simulateur LTE basé sur Matlab a été proposé avec la mise en œuvre d'une liaison descendante conforme à la couche physique de la norme LTE, la modulation adaptative, plusieurs utilisateurs, transmission MIMO mais il ne tient pas compte des aspects pertinents de simulation LTE.

### **4.1.2 OPNET**

OPNET est très réputé dans l'industrie pour la modélisation et aussi la simulation des réseaux. Parmi ses avantages, il permet de concevoir et d'étudier des réseaux de communications, des nouvelles technologies, des protocoles et des applications avec facilité et évolutivité. Il est utilisé spécialement par les entreprises des technologies les plus performantes pour accélérer et améliorer leurs procédés de recherches et de développements. Mais, les versions qui sont compatibles avec le LTE méritent une licence.

### **4.1.3 NS-2**

NS-2 bénéficie d'utilisation répandue dans le milieu de la recherche, le code de simulation a été contribué par plus de cent personnes et organisations, et l'utilisation du simulateur est toujours référencé dans de nombreux travaux de recherche en réseau.

Cependant, une lacune majeure de NS-2 est son évolutivité en termes d'utilisation de la mémoire et du temps d'exécution de la simulation. Ceci est particulièrement un problème en ce qui concerne les nouveaux domaines de recherche dans les réseaux informatiques, ou des architectures maillées qui exigent une simulation de réseaux très larges.

### **4.1.4 NS-3**

Le simulateur NS-3 est un simulateur réseau, utilisant des scripts écrit en C++ ou en Python. Nous avons choisi de travailler avec ce simulateur pour la simple raison que ce simulateur possède des scripts dont nous pouvons les utiliser n'importe quand contrairement aux autres simulateurs, par exemple le simulateur OPNET est un simulateur qui n'est pas gratuit donc c'est impossible de l'utiliser ou de travailler avec ce type de simulateur.

## **4.2 Présentation du simulateur NS-3**

Le simulateur NS-3 vise à remplacer NS-2, écrit en C++, python et OTel (version orientée objet de Tel), pour tenter de remédier à ses limites (l'utilisation de multiples interfaces sur un nœuds). Il peut être utilisé sur les plateformes Linux/Unix, OS X (Mac) et Windows.

Les développeurs de NS-3 ont décidé que l'architecture de simulation devait être remaniée complètement en partant du Zéro. Dans cette optique, l'expérience tirée de NS-2 doit être associée avec les progrès des langages de programmation et du génie logiciel. L'idée de la rétrocompatibilité avec NS-2 a été abandonnée dès le départ. Cela libère NS-3 de contraintes héritées de NS-2 et permet la construction d'un simulateur qui est bien conçu depuis le début.

## **4.3 Terminologie et abstractions**

Il est important de bien comprendre le sens des termes employés au sein du simulateur, ainsi que les abstractions qui ont été faites. NS-3 utilise des termes largement employés dans le domaine des réseaux, mais qui peuvent avoir une signification particulière au sein du simulateur. Voici les principaux :

### 4.3.1 Un nœud "Node"

Représente tout élément de réseau. La composition d'un nœud peut être gérée (ajout de composants, d'applications et de protocoles).

### 4.3.2 Une application "Application"

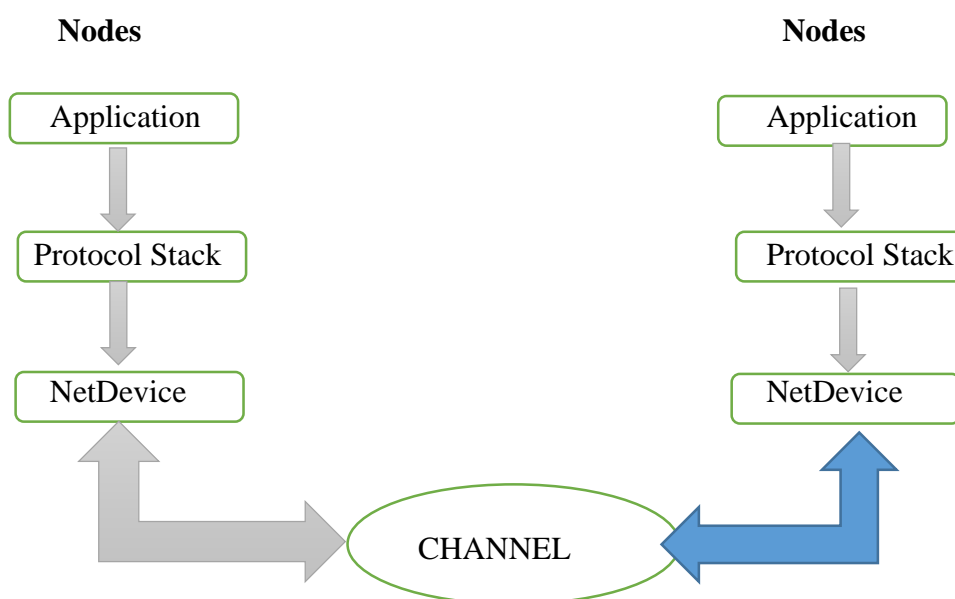
Représente un code exécuté par un utilisateur. Ce code peut être nécessaire au déroulement d'une simulation. L'échange de paquets durant une simulation nécessite par exemple la description d'une application au sein des nœuds participants. Les applications peuvent être attachées à un Node.

### 4.3.3 Un canal de communication "Channel"

Channel est le lien qui relie les NetDevices installés dans les nœuds. Des spécialisations de cette classe sont définies, comme par exemple LTE Channel pour modéliser un réseau LTE.

### 4.3.4 Une interface de communication

Appelée NetDevice, qui modélise à la fois les équipements et les pilotes de communication. Des spécialisations sont fournies comme par exemple LTE NetDevice qui peut être reliée à un LTE Channel. S'il s'agit de connecter un grand nombre de nœuds pour un réseau, ce processus peut être très lourd. NS-3 fournit des Topology Helpers pour faciliter ce genre de tâches (exemple LTE Helper). Voici l'architecture complète du nœud NS-3.



*Figure 4.1 : Architecture du nœud NS-3*

#### 4.4 Installation du simulateur NS-3

Pour installer NS-3 nous devons avoir un serveur puissant pour traiter les données en temps réels, alors dans la partie système nous choisissons le système Ubuntu 18.10, qui est une distribution de Linux présentant plusieurs avantages : la sécurité, la simplicité etc. [Annexe A].

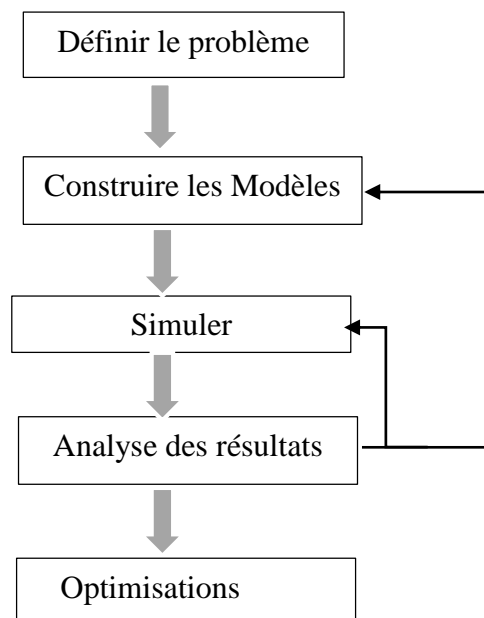
```
Transient hostname: MILAZAVATA-MVR
Icon name: computer
Machine ID: b0e3ac15aa014fe4b9e24cc8ca974c9e
Boot ID: 85ab950335ad40e1b87bbf04ce81f7ce
Operating System: Ubuntu 18.10
Kernel: Linux 4.18.0-10-generic
Architecture: x86-64
root@MILAZAVATA-MVR:~#
```

*Figure 4.2 : Version du système*

#### 4.5 Déroulement de la simulation

Voici les démarches de déroulement d'une simulation, telles qu'illustrées à la Fig. 4.3.

Premièrement, il faut définir le problème, comprendre et avoir une vue d'ensemble du problème (conception).



*Figure 4.3 : Etapes pour la réalisation d'une simulation.*



### 4.5.1 Création d'un script dans le NS-3

Dans notre premier script, nous avons créé un réseau LTE composé d'un UE et un point de communication eNodeB, qui supporte la QOS avec un adressage aléatoire.

**UE** : +261 33 15 00 992

(Connecté en 4G LTE)



**eNodeB**



*Figure 4.4* : La communication entre UE et eNodeB

#### a) Vérification du profil de l'UE

Dans un premier temps, il faut vérifier dans le MME si l'UE est bien connectée en 4G avant de créer un pont de communication entre les deux. La Figure 4.5 montre que l'UE est attachée au MME.

```
Mobile Subscriber ISDN No. : 261331500992
IMEI : 
UE Category : Information not available
UE Mode : Information not available
Roaming Status : Home
Suspend Status : Not Suspended
HSS Address : an1hss02s6a.epc.mnc001.mcc646.3gppnetwork.org
Home PLMN APN Operator Id : mnc001.mcc646.gprs
APN OI Replacement : Information not available
SDS Service : None
Data over NAS : Not Used
Subscribed Teleservices : No SMS
Network Access Mode : Packet/Circuit Switched
Regional Subscription Zone Code List : 
Radio Access Technology : LTE
```

*Figure 4.5* : Profil de l'utilisateur (UE)

## b) Création d'un script et simulation dans NS-3

La Figure 4.6 montre un aperçu de la simulation

```
root@MILAZAVATA-MVR:~/workspace/ns-allinone-3.28/ns-3.28# ./test.py -c core
Waf: Entering directory `~/root/workspace/ns-allinone-3.28/ns-3.28/build'
Waf: Leaving directory `~/root/workspace/ns-allinone-3.28/ns-3.28/build'
Build commands will be stored in build/compile_commands.json
'build' finished successfully (0.828s)

Modules built:
antenna                aodv                applications
bridge                buildings          config-store
core                  csma              csma-layout
dssdv                 dsr               energy
fd-net-device         flow-monitor      internet
internet-apps        lr-wpan          lte
mesh                 mobility         mpi
netanim (no Python)  network          nix-vector-routing
olsr                 point-to-point   point-to-point-layout
propagation          sixlowpan        spectrum
stats                tap-bridge       test (no Python)
topology-read        traffic-control  uan
virtual-net-device   wave            wifi
wimax

Modules not built (see ns-3 tutorial for explanation):
brite                  click              openflow
visualizer

PASS: TestSuite ptr
PASS: TestSuite build-profile
PASS: TestSuite global-value
PASS: TestSuite callback
PASS: TestSuite attributes
PASS: TestSuite command-line
PASS: TestSuite sample
PASS: TestSuite config
PASS: TestSuite time
PASS: TestSuite event-garbage-collector
PASS: TestSuite timer
PASS: TestSuite traced-callback
```

*Figure 4.6 : Simulation sur le NS-3*

### 4.5.2 Les indicateurs utilisés dans notre simulation

La norme LTE définit des indicateurs de qualité qui servent de mesure pour la qualité de transmission en liaison descendante (downlink) et ascendante (uplink). Parmi ces indicateurs on trouve notamment le CQI (Channel Quality Indicator) l'indicateur de la qualité du canal mais aussi le SINR (Signal Interference noise Ratio) rapport signal sur bruit et le TB (Transport Block).

#### **a) Le CQI**

Le CQI est un élément très important dans le réseau LTE, cet indicateur est principalement évalué sur le lien descendant dans une communication ainsi pour tester la qualité du canal de transmission, ainsi il est reçu par l'UE, alors que ce dernier le renvoi au eNodeB pour savoir s'il doit l'augmenter pour avoir en final une bonne communication.

#### **b) Le SINR**

Le rapport signal sur bruit est un indicateur de la qualité de la transmission d'une information qui s'exprime généralement en décibels (dB). C'est le rapport des puissances entre :

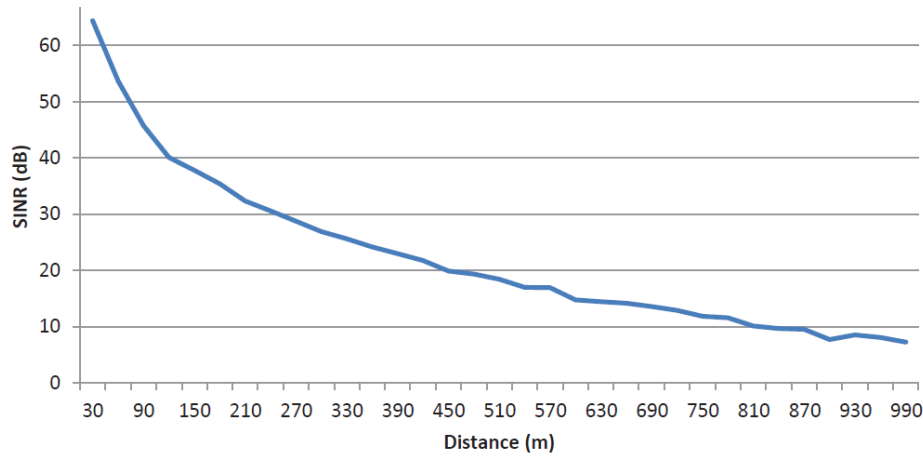
- Le signal d'amplitude maximale, déterminée par la valeur maximale admissible pour que les effets restent à une valeur admissible.
- Le bruit de fond, information non significative correspondant en général au signal présent à la sortie du dispositif en l'absence d'une information à l'entrée.

#### **c) Le TB**

Dans LTE un TB (le Bloc de Transport) est défini comme les données acceptées par la couche physique à être conjointement codé. Le chronométrage (le choix du temps) de bloc de transmission est alors lié exactement à cette Couche 1, par exemple chaque bloc de transmission est produit précisément chaque 10ms, ou un multiple de 10ms.

### **4.5.3 Résultats de la simulation**

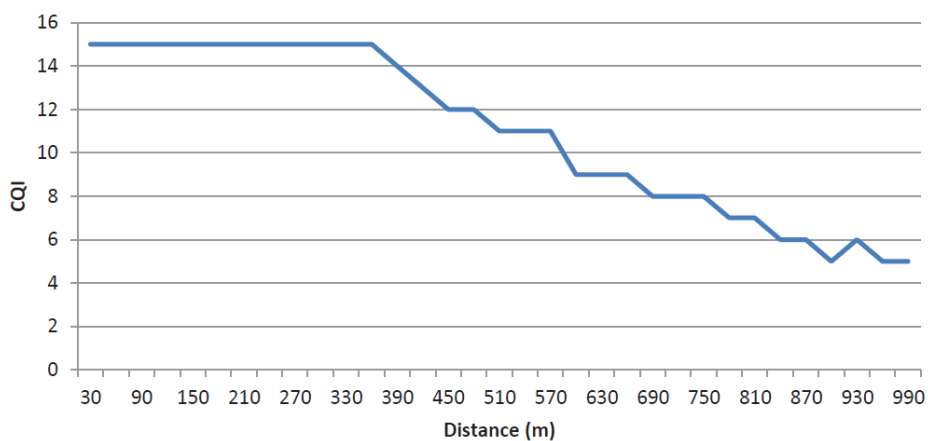
Grace à ce simulateur NS-3 nous avons pu tester quelques paramètres de Qos (CQI, SINR, TB) pour voir ainsi l'influence de quelques facteurs sur ces paramètres, nous allons présenter tous nos résultats sur des graphes. Notons que les graphes ci-dessous est les résultats des tests entre UE à Fort-Duchesne connecté à l'antenne eNodeB à Ampasapito.



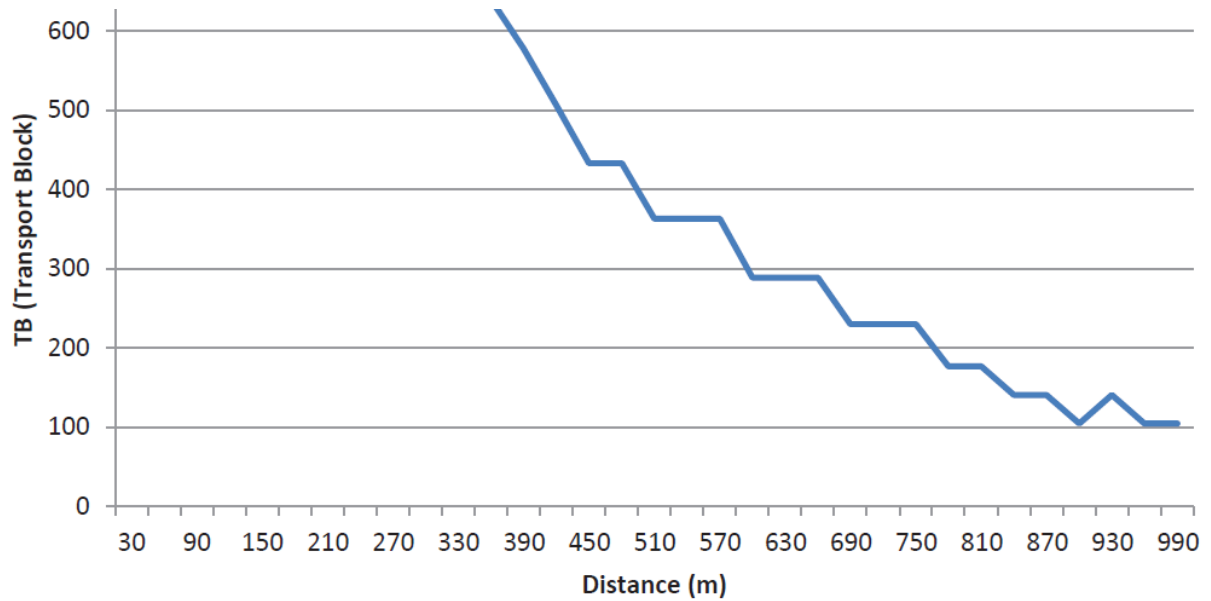
**Figure 4.7 : SINR en fonction de la distance UE-eNodeB.**

On voit clairement sur la Fig. 4.7 une diminution excessive du rapport SINR et qui se rapproche de la valeur 0 a presque 1km de distance séparant l'utilisateur (UE) et l'antenne (eNodeB) tout en considérant une valeur fixe du bruit à -148,947 dB, ceci est due principalement aux atténuations du signal, le fading, les dispersions et les multi trajets.

Le graphe ci-dessous (Fig.4.8) nous indique la qualité du canal suivant la distance séparant l'UE du eNodeB, ainsi on remarque que la qualité est meilleur de 0 jusqu'à 360m, après cette valeur on observe une dégradation en escalier, cette dégradation et due essentiellement à la diminution de l'intensité du signal, l'augmentation du taux d'erreur binaire mais aussi aux interférences.



**Figure 4.8 : CQI en fonction de la distance UE-eNodeB.**



***Figure 4.9 : TB en fonction de la distance entre UE-eNB***

Ce graphe de la Fig 4.9 nous indique le nombre de block transporté suivant la distance séparant l'UE du eNodeB, ainsi on remarque que le transport est meilleur de 0 jusqu'à 360m, après cette valeur on observe une dégradation en escalier, cette dégradation est due essentiellement à la diminution de l'intensité du signal, l'augmentation du taux d'erreur binaire mais aussi aux interférences.

Les simulations que nous avons présentées dans ce travail se sont focalisées sur l'estimation de canal pour la voie descendante à l'aide des symboles pilotes insérés dans la grille temps fréquence par le CQI correspondant à un SINR calculé au niveau de l'équipement usager. Les résultats obtenus montrent que la qualité de service indique la fiabilité du réseau en impliquant des paramètres performants pour la transmission car ceci conduit à une détérioration de la qualité de service et des problèmes d'accessibilité au réseau. Une très faible couverture pourrait être due à la présence d'obstacles proches de l'antenne à Ampasapito.

#### **4.6 Algorithme d'optimisation**

La réservation de ressources dans un réseau de communication est un domaine d'application très vaste, qui implique des problèmes algorithmiques nombreux et variés. La modélisation d'un réseau sous la forme d'un graphe permet, indépendamment de sa nature physique (éventuellement hétérogène), de développer des algorithmes pour déterminer quels sont les nœuds et/ou les liens du réseau qui doivent être réservés pour répondre à un problème

donné. Il s'agit alors de proposer des algorithmes gérant au mieux l'attribution de ces ressources pour les membres qui interagissent via le réseau.

- Afin de résoudre ce problème de couverture, nous avons proposé d'augmenter la propagation des signaux des cellules voisines de (15,2, -3,1) à (18,2, -3,1) et aussi d'ajuster les tilts et azimuts des antennes [A3]. Si le problème persiste une intégration d'un nouveau site peut s'avérer nécessaire pour améliorer la couverture.
- La mise en place de la QOS au niveau des équipement intermédiaire MPBN « Mobile Packet Backbone Network » [Annexe B] comme la montre la Fig 4.10 ci-dessous pour améliorer la qualité des services des utilisateurs (UE) dans cette zone.

```

class-of-service {
  classifiers {
    dscp dscp-mpbn {
      forwarding-class network-control {
        loss-priority low code-points nc-csc7;
      }
      forwarding-class expedited-forwarding {
        loss-priority low code-points [ ef dscp-AF41 dscp-AF42 dscp-AF43 ];
      }
      forwarding-class assured-forwarding {
        loss-priority low code-points af11;
        loss-priority high code-points [ af12 af13 ];
      }
      forwarding-class best-effort {
        loss-priority low code-points be1;
        loss-priority high code-points be;
      }
      forwarding-class SIGNALING {
        loss-priority low code-points [ dscp-LU1 dscp-LU2 dscp-CS4 dscp-CS5 dscp-CS6 ];
      }
      forwarding-class AF3x {
        loss-priority low code-points [ dscp-AF31 dscp-AF32 dscp-CS1 dscp-CS2 ];
      }
    }
    dscp dscp-class {
      forwarding-class AF2x {
        loss-priority low code-points [ dscp-AF21 dscp-AF22 dscp-AF23 ];
      }
    }
  }
  exp exp-mpbn {
    forwarding-class network-control {
      loss-priority high code-points nc-csc7;
    }
    forwarding-class expedited-forwarding {
      loss-priority low code-points ef;
    }
    forwarding-class assured-forwarding {
      loss-priority low code-points af11;
      loss-priority high code-points af12;
    }
    forwarding-class best-effort {
      loss-priority low code-points be1;
      loss-priority high code-points be;
    }
    forwarding-class SIGNALING {
      loss-priority low code-points exp-LU;
    }
  }
  exp exp-class {
    forwarding-class AF3x {
      loss-priority low code-points exp-AF3x;
    }
    forwarding-class AF2x {
      loss-priority low code-points exp-AF2x;
    }
  }
}

```

***Figure 4.10 : QOS Implémenté dans le Routeur***

Les générations successives de téléphonie mobile ont été développées pour garantir des performances de plus en plus élevées et donc offrir une meilleure qualité de service pour les utilisateurs. De nouvelles technologies ne cessent donc de se développer et elles ont contribué à la création d'un environnement propice à la concurrence incitant ainsi les opérateurs à se soucier de la qualité de leurs prestations et des performances de fonctionnement de leurs réseaux.

Avec les années, on va apercevoir l'utilisation à grande échelle de la technologie LTE (4G) qui demande en parallèle l'amélioration de la qualité de service. À cette effet, l'étude qu'on a réalisée ouvre une voie et donne un aperçu sur les meilleurs algorithmes et mécanismes qui s'adaptent et qui donnent de meilleurs résultats au niveau de la qualité de service.

L'objectif principale de notre projet est de procéder à une analyse globale de la technologie mobile LTE (4G) dans le but de faire des propositions d'algorithmes d'optimisation de ces performances est cela en proposant plusieurs configurations et améliorations dans les équipements connectés aux Réseaux.

# ANNEXES



**Procédure d'installation de logiciel NS-3 sous Ubuntu 18.10**

Dans ce document nous allons en mettre en place la procédure d'installation du logiciel LTE-SIM sous les environnements Linux Ubuntu, Il faut suivre deux étapes :

**Package pour C++, c'est le package minimal pour le besoin de l'installation de ns-3.**

```
sudo apt-get install gcc g++ python
```

**Package pour Python.**

```
sudo apt-get install gcc g++ python python-dev
```

**Package pour Mercurial.**

```
sudo apt-get install mercurial
```

**Package pour Bazaar utiliser pour l'exécution des scripts Python sur ns-3.**

```
sudo apt-get install bazaar
```

**Debugging:**

```
sudo apt-get install gdb valgrind
```

**GNU Scientific Library (GSL) pour éviter les erreurs dans les modèles du réseau WiFi**

```
sudo apt-get install gsl-bin libgsl0-dev libgsl0ldbl
```

**The Network Simulation Cradle (nsc) requires the flex lexical analyzer and bison parser generator:**

```
sudo apt-get install flex bison libfl-dev
```

**Installation des paquets gcc et g++ de la leur dernière version.**

```
sudo apt-get install g++-4.6 gcc-4.6
```

**To read pcap packet traces**

```
sudo apt-get install tcpdump
```

**Database support for statistics framework**

```
sudo apt-get install sqlite sqlite3 libsqlite3-dev
```

### **Xml-based version of the config store (requires libxml2 >= version 2.7)**

```
sudo apt-get install libxml2 libxml2-dev
```

### **A GTK-based configuration system**

```
sudo apt-get install libgtk2.0-0 libgtk2.0-dev
```

### **To experiment with virtual machines and ns-3**

```
sudo apt-get install vtun lxc
```

### **Support for utils/check-style.py code style check program**

```
sudo apt-get install uncrustify
```

### **Doxygen and related inline documentation:**

```
sudo apt-get install doxygen graphviz imagemagick
```

```
sudo apt-get install texlive texlive-extra-utils texlive-latex-extra
```

**The ns-3 manual and tutorial are written in reStructuredText for Sphinx (doc/tutorial, doc/manual, doc/models), and figures typically in dia:**

```
sudo apt-get install python-sphinx dia
```

### **Support for Gustavo Carneiro's ns-3-pyviz visualizer**

```
sudo apt-get install python-pygraphviz python-kiwi python-pygoocanvas libgoocanvas-dev
```

### **Support for openflow module (requires some boost libraries)**

```
sudo apt-get install libboost-signals-dev libboost-filesystem-dev
```

### **Support for MPI-based distributed emulation**

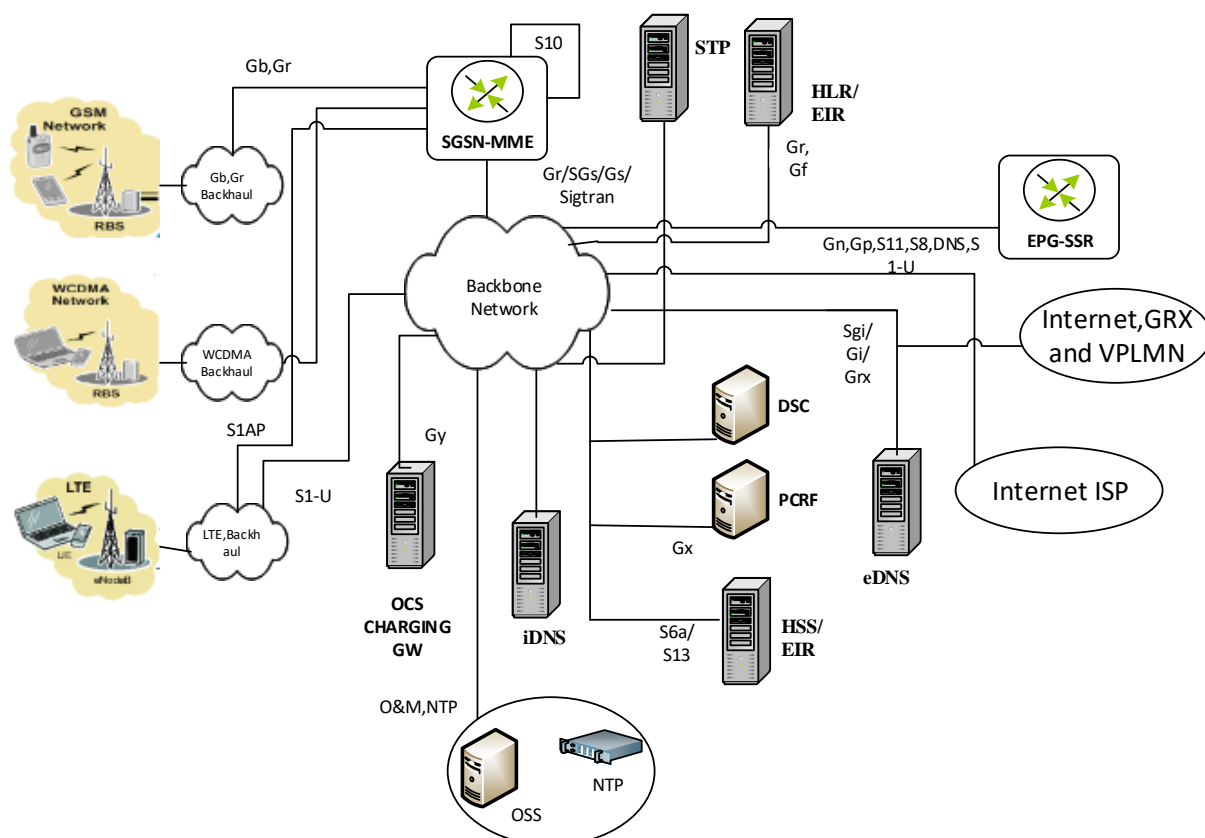
```
sudo apt-get install openmpi*
```

Après toutes ces étapes nous allons maintenant passer à l'installation de ns-3, en commençant par le téléchargement du dossier NS-3.

- mkdir tarballs
- cd tarballs
- wget <http://www.nsnam.org/release/ns-allinone-3.13.tar.bz2>
- tar xjf ns-allinone-3.13.tar.bz2

Voici la topologie complète des équipements intermédiaires entre l'Utilisateur (UE) et les équipements eNodeB.

### Topologie complet du MPBN



*Figure A1.2 : MPBN Topologie*

- [1] Yannick Bouguen et Éric Har douin , "LTE et les réseaux 4G", © Groupe Eyrolles, 2012
- [2] Pierre Beaufils, "Réseaux 4G technologies et services", hermes science, novembre 2008
- [3] LASSOUED ali, Rapport PFE, Outil de planification et de dimensionnement dans l'EUTRAN LTE-Advanced, Sup'Com, 2012
- [4] Xavier Lagrange et al. , « Réseaux GSM », Hermes, Paris, 1995, 1996, 1997, 1999,2000
- [5] JAMMAZI eya, Rapport de PFE, Optimisation du réseau pilote 4G pour Tunisie Télécom, ENIG, 2013
- [6] : TONYE.E et EWOUSSAOUA.L, « Planification Et ingénierie Des Réseau De Télécoms », mémoire pro 2 de télécommunication, Université de Yaounde I, 2011
- [7]: GHASSEN.A. A, MAHAMOD.I et KASMIRAN.J, “Modeling and Performance Evaluation of LTE Networks with Different TCP Variants”, Académie mondiale des sciences, 2011.
- [8] : URDAREANU.A, « Réseau de 4ème Génération », Rapport bibliographique, Université de RENNES, 2007.
- [9] : SEIDE.G, « Planification d'un réseau de quatrième génération à Partir D'un Réseau De Troisième Génération », Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de maîtrise des sciences appliquées (génie informatique), Université de MONTREAL, 2011.
- [10] : YOE.S.H et ALWIS, « Evaluation des Performances Des Techniques D'Accès OFDMA et SC-FDMA Dans La Technologie LTE », Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en télécommunication, Université de Tlemcen, 2012.
- [11] : <http://pf-mh.uvt.rnu.tn/861/1/Optimisation-couverture-radio-reseau-4G-TunisieTelecom.pdf>

**Auteur** : MILAZAVATA Mahairae Tsimiondra

**Titre** : « Algorithme d'optimisation des performances de la technologie LTE (4G) »

**Nombre de pages** : 57

**Nombre de figures** : 16

**Nombre de tableaux** : 09

---

## **RESUME**

Les réseaux mobiles et sans fil ont connu un essor sans précédent ces dernières années. Dans plusieurs pays à travers le monde, la mise en œuvre du réseau LTE est en train de se développer. LTE comprend une architecture tout- IP, et une interface radio qui lui a permis de présenter de multiples qualités, en particulier des débits élevés entre la station de base et les terminaux. En outre, la réduction de l'intervalle de transmission des données (latence) devrait optimiser considérablement la réactivité du terminal, son autonomie s'en trouve rallongée malgré la connexion à un service de données à large bande tel que les services multimédias qui exige une certaine qualité de service (QOS).

**Mots-clés** : IP, QOS, Radio, Latence, Large bande

---

## **ABSTRACT**

The mobile and wireless networks knew an unprecedented development these last years. In several countries around the world, the implementation of LTE has started. LTE offers an all IP architecture and a radio interface that provides high data rates between base stations and mobile terminals. Moreover, the reduction of the interval of transmission of the data (latency) should optimize considerably the reactivity of the terminal, its autonomy is some lengthened in spite of connection to a service of data to broad band such as the services multi-media which requires a certain quality of service (QOS).

**Keywords:** IP, QOS, Radio, Latency, broad band

---

**Directeur de mémoire** : Madame RABEHERIMANANA Lyliane Irène

**Adresse de l'auteur** : [tsimiondra.milazavata@gmail.com](mailto:tsimiondra.milazavata@gmail.com) / +261 33 15 00 992